

Diplomarbeit

# Ressourceneffiziente und kreislauffähige Planung im mehrgeschossigen Holz-Hybrid-Wohnungsbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Resource-efficient and circular planning in multi-story timber hybrid housing construction

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

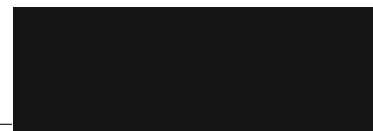
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

**Maximilian Huber, BSc**

Matr.Nr.: 12045137

Betreuung: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alirza Fadai**  
Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/259.2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2024





TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der  
Bezeichnung

## D I P L O M A R B E I T

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten  
Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle  
verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

28.05.2024

Datum



Unterschrift

## Kurzfassung

Nachdem der Fokus im Bauwesen lange darauf lag, den Energieverbrauch und die Emissionen des Gebäudebetriebs zu senken, ist man nun an einem Punkt, an welchem die Herstellungsenergie und die damit verbundenen Emissionen einen erheblichen Anteil der gesamten Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus des Gebäudes ausmachen. Das Senken der Emissionen aus Gebäudeerrichtung stellt daher aktuell eine große Herausforderung für das Bauwesen dar. Im Zuge dieser Bemühungen hat der Holzbau zunehmend an Bedeutung gewonnen, da der natürlich nachwachsende Rohstoff CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre bindet und dieses speichert. Neben der Herausforderung, CO<sub>2</sub>-neutral zu bauen, steht das Bauwesen auch vor der Herausforderung, eine Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft durchzuführen. Kreislauffähige Bauweisen stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung und es existieren noch keine Standards und gängigen Praktiken zum zirkulären Bauen. Diese Arbeit soll daher einen Überblick über die Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 geben. Es soll erörtert werden, welche Merkmale ein kreislauffähiges Gebäude aufweisen muss und wie diese Merkmale in Holzbauweise umgesetzt werden können. Weiterhin soll die Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Holzgebäuden thematisiert werden, insbesondere im Hinblick auf Wohngebäude der Gebäudeklassen 4 und 5, um festzustellen, inwieweit diese sich bereits kreislauffähig errichten lassen.

Um zu klären, welche Eigenschaften kreislauffähige Gebäude aufweisen und wie sich eine zirkuläre Bauweise in Holzbauweise umsetzen lässt, wird eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Diese befasst sich mit dem kreislauffähigen Bauen im Allgemeinen, dem aktuellen Status quo im Holzbau sowie der zirkulären Bauweise mit Holz. Daraus geht hervor, dass wesentliche Prinzipien der Kreislaufwirtschaft wie die Ressourceneffizienz, die Reparaturfähigkeit durch Trennung funktionaler Bauteilschichten, die Flexibilität und Umnutzbarkeit sowie die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit sich mit einer Holzskelettbauweise besonders gut umsetzen lassen. Hinderlich bei der Umsetzung sind dabei teilweise Anforderungen, die aus dem Schallschutz und dem Brandschutz resultieren. Zudem bedarf es der Entwicklung und Standardisierung neuer, wieder lösbarer Verbindungsknoten und Bauteilaufbauten. Grundsätzlich weist der Holzbau jedoch gute Voraussetzungen auf, um eine zirkuläre Bauweise zu entwickeln. Besonders hervorzuheben sind dabei die Vorfertigung und die Modularität sowie die Eignung des biogenen Werkstoffs Holz, in einem geschlossenen Materialkreislauf geführt zu werden.

Anhand der Ergebnisse aus der Literaturrecherche und unter Zuhilfenahme aktueller Gebäudezertifizierungssysteme aus Deutschland und der Schweiz wird in dieser Arbeit ein Bewertungssystem entwickelt, um die Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude beurteilen zu können. Dabei erfolgt die Beurteilung anhand von drei Themenfeldern: Reduce (Ressourceneffizienz), Long-Use (Flexibilität und Langlebigkeit) und Re-Use und Recycle (Wiederverwendbarkeit). Um zu beurteilen, inwieweit Wohngebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 bereits heute kreislauffähig errichtet werden können, wird das Bewertungssystem bei drei Referenzgebäuden angewendet. Dabei fällt auf, dass insbesondere die Wiederverwendbarkeit häufig nicht erreicht wird und deren Implementierung einen hohen Planungs- und Entwicklungsaufwand mit sich bringt. An einem eigenen Entwurf wird das Bewertungsschema angewandt, um mögliche Verbesserungspotenziale und Grenzen hinsichtlich der Kreislauffähigkeit aufzudecken. Hier werden die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche bestätigt, dass die Trennbarkeit der Bauteilaufbauten, insbesondere der Bodenaufbauten, durch den Schallschutz und die Wahl ökologischer Baustoffe durch den Brandschutz eingeschränkt wird.



## Abstract

After the construction industry has been reducing energy consumption and emissions from building operation, we are at a point where the emissions for the building production make up a significant part of the greenhouse gas balance over the building's life cycle. Reducing emissions from the production of buildings is therefore a major challenge for the construction industry. As part of these efforts, timber construction has become increasingly important, as timber is able to bind and store CO<sub>2</sub> from the atmosphere. In addition to the goal of building carbon neutral, the construction industry is also challenged by moving towards a circular economy. There are no existing standards or common practices for circular construction, as those methods are still at the beginning of their development. The purpose of this thesis is to provide an overview of the circularity of multi-story timber residential buildings in Building Classes 4 and 5. This thesis clarifies the characteristics of circular buildings. It shows how these characteristics can be implemented in timber construction and how the circularity of timber buildings can be assessed. In addition, an analysis of existing buildings will show the extent to which residential timber buildings in Building Classes 4 and 5 fulfill circularity.

A comprehensive literature review is undertaken to clarify the characteristics of circular buildings and how circularity can be achieved in timber construction. The review covers: circular construction in general, the current state of timber construction and circular construction with timber. The results show that resource efficiency, reparability through separation of functional component layers, flexibility of floor plans, and disassembly and reuse are key principles of the circular economy. In timber construction, this can be achieved in a particularly good way by using a skeleton structure. Barriers to the implementation of circular construction methods are often based on soundproofing and fire safety requirements. New detachable connection nodes and component structures also need to be developed and standardized. In principle, however, timber construction is well suited to the development of circular construction methods. Prefabrication and modularity are particularly noteworthy, as well as the ability of wood to be used in a closed material loop. Based on the results of the literature review and with the help of building certification systems from Germany and Switzerland, a rating system is developed to evaluate the circularity of multi-story timber residential buildings. The assessment is based on three themes: Reduce (resource efficiency), Long-Use (flexibility and durability) and Re-Use and Recycle (reusability). The rating scheme is applied to three existing buildings to assess the extent to which timber residential buildings in Building Class 4 and 5 can already be built in a circular way. It shows that reusability is often not achieved and its implementation is related to a high level of planning and development effort. The evaluation scheme is applied to an own design to identify potential for improvement and limits with regard to circularity. The results of the analysis confirm that the separability of the component structures, especially the floor structures, is limited by soundproofing requirements and the choice of ecological building materials is limited by fire safety requirements.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVATION.....	1
1.1.1. Nachfrage nach nachhaltigem Wohnraum in urbanen Räumen .....	1
1.1.2. Treibhausgas-Emissionen des Gebäudesektors.....	1
1.1.3. Schlüsselrolle des Bauwesens bei Ressourcenschonung und Abfallvermeidung.....	2
1.1.4. Zusammenfassung der Motivation .....	2
1.2. FORSCHUNGSFRAGEN .....	3
1.3. ZIELE UND GRENZEN.....	6
1.3.1. Beurteilungskriterien der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude.....	6
1.3.2. Stärken und Schwächen des mehrgeschossigen Holzbaus nach aktuellem Stand der Technik hinsichtlich seiner Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit.....	6
1.3.3. Entwicklung eines Entwurfs für ein mehrgeschossiges Holzwohngebäude unter dem Gesichtspunkt der Kreislaufwirtschaft .....	6
1.3.4. Grenzen.....	7
<b>2. KREISLAUFWIRTSCHAFT IM BAUWESEN .....</b>	<b>8</b>
2.1. PRINZIPIEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT.....	8
2.1.1. Grundprinzipien nachhaltigen Handelns .....	9
2.1.2. Abfallhierarchie .....	10
2.1.3. Reduktion des Ressourcenverbrauchs (Reduce).....	11
2.1.4. Maximierung der Lebensdauer (Long-Use).....	11
2.1.5. Wieder- und Weiterverwendung .....	12
2.1.6. Verwertung .....	12
2.1.7. Hierarchien kreislauffähiger Neubauten.....	14
2.2. KREISLAUFWIRTSCHAFT IN DER GESETZGEBUNG.....	15
2.2.1. Europäische Union.....	15
2.2.2. Nationales Recht im DACH-Raum .....	17
2.2.3. Zusammenfassung.....	19
2.3. WIRTSCHAFTLICHE ANREIZE DES ZIRKULÄREN BAUENS .....	19
2.3.1. Lenken von Investitionsströmen.....	19
2.3.2. Gebäudezertifizierung.....	20
2.3.3. Versorgungssicherheit .....	20
<b>3. STATUS QUO - TECHNISCHE UND KONSTRUKTIVE GRUNDLAGEN DES MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAUS</b>	<b>21</b>
3.1. ROHSTOFFVERFÜGBARKEIT .....	21
3.2. MATERIALEIGENSCHAFTEN .....	22
3.3. KONSTRUKTIONSMETHODEN .....	23
3.3.1. Definition Bauelement und Bauteil.....	23
3.3.2. Linienförmige Bauelemente.....	23
3.3.3. Flächige Bauelemente .....	23
3.3.4. Skelettbau .....	24
3.3.5. Holztafelbau .....	24
3.3.6. Massivholzbau .....	25
3.3.7. Holz-Hybrid-Bauweise.....	25
3.3.8. Aussteifung .....	25
3.4. GEBÄUDE- UND BAUTEILSCHICHTEN IM HOLZBAU .....	26
3.4.1. Scherschichten .....	26
3.4.2. Schichtenaufbau der Gebäudehülle in Holzbauweise .....	27
3.4.3. Schichtenaufbau der Innenbauteile in Holzbauweise .....	29
3.5. VERBINDUNGSMITTEL IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU.....	30

3.5.1.	<i>Lösbarkeit gängiger Fügmethoden im Holzbau</i> .....	30
3.5.2.	<i>Demontierbarkeit auf Gebäudeebene</i> .....	31
3.5.3.	<i>Trennbarkeit auf Bauteilebene</i> .....	34
3.6.	FAZIT ZUM STATUS QUO .....	36
<b>4.</b>	<b>BESCHREIBUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN STANDES DES KREISLAUFFÄHIGEN BAUENS IN BEZUG AUF MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU</b> .....	<b>37</b>
4.1.	METHODIK DER LITERATURANALYSE .....	37
4.2.	SUFFIZIENZ .....	37
4.2.1.	<i>Verzicht auf Flächenverbrauch</i> .....	38
4.2.2.	<i>Suffizienz durch Innovation</i> .....	38
4.2.3.	<i>Fazit zur Suffizienz</i> .....	39
4.3.	RESSOURCENEFFIZIENZ .....	39
4.3.1.	<i>Grenzen und Verfügbarkeit der Ressource Holz</i> .....	39
4.3.2.	<i>Reduktion der Rohstoffentnahme</i> .....	40
4.3.3.	<i>Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen</i> .....	40
4.3.4.	<i>Ressourceneffiziente Holzbauweise versus CO<sub>2</sub>-Speicher</i> .....	44
4.3.5.	<i>Verringerter Ressourcenverbrauch durch Leichtbauweise</i> .....	44
4.3.6.	<i>Ressourceneffiziente Verbundkonstruktionen</i> .....	44
4.3.7.	<i>Ressourceneinsparung durch Vorfertigung</i> .....	47
4.3.8.	<i>Materialdokumentation</i> .....	47
4.3.9.	<i>Bestandsmodernisierung</i> .....	48
4.3.10.	<i>Fazit zur Ressourceneffizienz</i> .....	48
4.4.	MAXIMIERUNG DER LEBENSDAUER IM HOLZBAU .....	49
4.4.1.	<i>Dauerhaftigkeit von Holztragwerken</i> .....	49
4.4.2.	<i>Reparaturfähigkeit mehrgeschossiger Holzgebäude</i> .....	54
4.5.	RE-USE UND RECYCLING IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU .....	61
4.5.1.	<i>Ebenen der Wiederverwendung</i> .....	61
4.5.2.	<i>Wiederverwendungspotenzial auf Gebäudeebene – Standortwechsel von Gebäuden</i> .....	63
4.5.3.	<i>Wiederverwendungspotenzial auf Bauteilebene – Re-Use von Bauteilen</i> .....	66
4.5.4.	<i>Wiederverwendungspotenzial auf Bauelement- und Komponentenebene – Re-Use von Komponenten</i> .....	67
4.5.5.	<i>Umsetzung zirkulärer Bauweise im mehrgeschossigen Holzbau</i> .....	69
4.5.6.	<i>Materialrecycling</i> .....	74
4.5.7.	<i>Planung mit wiederverwendeten Bauteilen und Materialien</i> .....	77
4.6.	UMSETZUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN STANDES DES KREISLAUFFÄHIGEN BAUENS IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZWOHNUNGSBAU .....	78
<b>5.</b>	<b>BEWERTUNGSKRITERIEN ZUR BESTIMMUNG DER KREISLAUFFÄHIGKEIT DER REFERENZGEBÄUDE</b> .....	<b>79</b>
5.1.	THEMENFELDER .....	79
5.2.	KRITERIEN ZUM THEMENFELD REDUCE .....	80
5.3.	KRITERIEN ZUM THEMENFELD LONG-USE .....	81
5.4.	KRITERIEN ZUM THEMENFELD RE-USE UND RECYCLE .....	81
5.5.	MESSGRÖßEN .....	82
5.5.1.	<i>Methodik der Beurteilung</i> .....	82
5.5.2.	<i>Messgrößen zum Themenfeld Reduce</i> .....	83
5.5.3.	<i>Messgrößen zum Themenfeld Long-Use</i> .....	90
5.5.4.	<i>Messgrößen zum Themenfeld Re-Use und Recycle</i> .....	95
<b>6.</b>	<b>REFERENZANALYSE</b> .....	<b>101</b>
6.1.	AUSWAHL DER REFERENZGEBÄUDE .....	101
6.2.	HAUS DES HOLZES (CH) .....	101
6.2.1.	<i>Grundlagen</i> .....	101
6.2.2.	<i>Analyse – Reduce</i> .....	105
6.2.3.	<i>Analyse - Long-Use</i> .....	109
6.2.4.	<i>Analyse - Re-Use &amp; Recycle</i> .....	115
6.2.5.	<i>Auswertung Haus des Holzes</i> .....	121
6.3.	BIKES & RAILS (AT) .....	122

6.3.1.	<i>Grundlagen</i> .....	122
6.3.2.	<i>Analyse – Reduce</i> .....	126
6.3.3.	<i>Analyse - Long-Use</i> .....	130
6.3.4.	<i>Analyse - Re-Use &amp; Recycle</i> .....	136
6.3.5.	<i>Auswertung Bikes &amp; Rails</i> .....	143
6.4.	WALDEN 48 (DE).....	145
6.4.1.	<i>Grundlagen</i> .....	145
6.4.2.	<i>Analyse – Reduce</i> .....	148
6.4.3.	<i>Analyse - Long-Use</i> .....	153
6.4.4.	<i>Analyse - Re-Use &amp; Recycle</i> .....	158
6.4.5.	<i>Auswertung Walden 48</i> .....	167
6.5.	LESSONS-LEARNED.....	167
6.5.1.	<i>Gegenüberstellung Reduce</i> .....	168
6.5.2.	<i>Gegenüberstellung Long-Use</i> .....	169
6.5.3.	<i>Gegenüberstellung Re-Use &amp; Recycle</i> .....	169
6.5.4.	<i>Fazit</i> .....	170
<b>7.</b>	<b>ENTWURF HOLZRIEGELHOF WOODEN CITY</b> .....	<b>172</b>
7.1.	VORSTELLUNG DES ENTWURFS.....	172
7.1.1.	<i>Aufgabenstellung</i> .....	172
7.1.2.	<i>Grundkonzept zur Lösung der Aufgabenstellung</i> .....	172
7.1.3.	<i>Grundrisse und Nutzungen</i> .....	176
7.1.4.	<i>Technische Ausführung</i> .....	179
7.1.5.	<i>Gestalterische Aspekte</i> .....	184
7.2.	ANALYSE HOLZRIEGELHOF.....	187
7.2.1.	<i>Analyse – Reduce</i> .....	187
7.2.2.	<i>Analyse - Long-Use</i> .....	191
7.2.3.	<i>Analyse - Re-Use &amp; Recycle</i> .....	196
7.2.4.	<i>Auswertung Holzriegelhof</i> .....	203
<b>8.</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>207</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIO</b> .....	<b>211</b>
	LITERATURVERZEICHNIS.....	215
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	225
	TABELLENVERZEICHNIS.....	227
	ANHANG – EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNGEN PROJEKTARBEIT.....	230



# 1. Einleitung

Mit dem Green Deal [1] soll Europa bis 2050 ein klimaneutraler Kontinent werden. Der Weg dorthin birgt insbesondere für die Bauindustrie große Herausforderungen. Eine fortschreitende Urbanisierung, angetrieben vom demografischen Wandel und der Einwanderung, sorgt für eine steigende Nachfrage nach Wohnraum in städtischen Räumen. Dort ist der Baugrund rar und die Bauwirtschaft steht vor der Aufgabe, die Nachfrage nach neuem Wohnraum in den Städten schnell und vor allem klimaneutral zu bedienen. Dabei liegt der Fokus bei der Erstellung eines nachhaltigen Gebäudes längst nicht mehr ausschließlich auf der Betriebsenergie des Gebäudes, sondern auch auf der grauen Energie. Diese umfasst die zur Herstellung erforderliche Energie, welche in der Gebäudesubstanz steckt. Dazu kommt die Erkenntnis in Politik und Forschung, dass auch der Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen drastisch gesenkt werden müssen. Insbesondere für die ressourcenintensive Baubranche stellt das eine zusätzliche Herausforderung dar. Häufig wird die Kreislaufwirtschaft als Teil der Lösung dieser komplexen Problemstellungen genannt. Im Zuge dieser Arbeit soll erörtert werden, ob und wie eine ressourcenschonende, kreislauffähige Bauweise für Wohngebäude im urbanen Raum in Holzbauweise umsetzbar ist.

## 1.1. Motivation

### 1.1.1. Nachfrage nach nachhaltigem Wohnraum in urbanen Räumen

Obwohl die Bevölkerung in Europa bis zum Jahr 2050 nur moderat wächst, sind durch Bevölkerungsverschiebungen und Zuwanderung in Europa wachsende urbane Räume zu erwarten [2]. In Österreich wird das Bevölkerungswachstum fast ausschließlich in und um den Landeshauptstädten stattfinden [3]. Es wird mit einem Bevölkerungszuwachs von 10 % bis zum Jahr 2050 gerechnet [3]. Auch wenn die Europäische Kommission davon ausgeht, dass bis zum Jahr 2050 noch 85 % bis 95 % der heute bestehenden Gebäude in Betrieb sein werden [4], wird der Neubau durch diese Bevölkerungsverschiebung in Städten weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Die fortschreitende Urbanisierung geht also mit einem hohen Bedarf an Wohngebäuden im städtischen Raum einher. Dieser Wohnraum wird idealerweise durch Nachverdichtung und Maximierung der Nutzfläche bei möglichst geringer Bodenversiegelung, nämlich durch Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5, geschaffen. Dadurch lässt sich die fortschreitende Bodenversiegelung minimieren [5].

### 1.1.2. Treibhausgas-Emissionen des Gebäudesektors

Europaweit beträgt der Anteil der Treibhausgasemissionen, welche direkt und indirekt durch Gebäude verursacht werden, etwa 36 % [6]. Der Anteil der Gebäude am Energieverbrauch beträgt 40 % [6]. Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, müssen im Gebäudesektor tiefgreifende Veränderungen geschehen. Die Europäische Kommission verfolgt dabei das Ziel, durch die Renovierung und den energieeffizienten Betrieb der Bestandsgebäude bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 95 % gegenüber 1990 zu erreichen [7]. Neubauten müssen in der Europäischen Union seit 2019 im öffentlichen Bereich und seit 2021 für alle Gebäude die Anforderungen von nahezu Null-Energie-Gebäuden (Nearly zero-energy buildings, NZEB) erreichen [8]. Dies wird durch die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) auf europäischer Ebene geregelt. Trotz der Anforderungen, im Betrieb nahezu klimaneutral zu sein, sind Neubauten dennoch für einen erheblichen Teil der Treibhausgasemissionen verantwortlich. So entfallen etwa 10 % der weltweiten Gesamtemissionen auf die Herstellung von Baustoffen für den Gebäudesektor [4]. Dadurch

wird deutlich, dass die graue Energie, welche für die Herstellung der Baustoffe, für die Herstellung des Gebäudes sowie für Rückbau und Entsorgung anfällt, keinesfalls vernachlässigbar ist [9]. Da der Anteil der grauen Energie aufgrund sinkender Betriebsenergieverbräuche immer höher wird, ist es unumgänglich, den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes bei dessen Nachhaltigkeitsbewertung zu betrachten. Um die graue Energie beim Neubau zu minimieren, eignet sich der Einsatz nachwachsender Werkstoffe. Holz in der Tragstruktur kann die graue Energie eines Gebäudes senken. Während des Wachstums bindet ein Baum CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Der Werkstoff Holz wirkt somit in Kombination mit nachhaltiger Forstwirtschaft wie ein Kohlenstoffspeicher [10].

### 1.1.3. Schlüsselrolle des Bauwesens bei Ressourcenschonung und Abfallvermeidung

Die lineare Wirtschaft verwendet Rohstoffe von der Gewinnung über die Produktion und Nutzung bis zur Entsorgung (siehe Abbildung 1-1) und ist das weltweit vorherrschende Wirtschaftsmodell [11]. Die Rohstoffe werden durch den Abbau ihren natürlichen Lagerstätten entnommen und dem Wirtschaftssystem zur Verwendung zugeführt. Im Anschluss erfolgt eine Wertsteigerung durch die Produktion. Im Laufe der Lebensdauer verliert das Produkt an Wert und am Ende der Lebensdauer werden die Produkte beziehungsweise deren Rohstoffe vorwiegend als Abfall betrachtet [12] und entsorgt [11]. Dieses Modell wird auch als *Cradle-to-grave* bezeichnet [11]. Das lineare Wirtschaftsmodell ist einerseits für einen hohen Verbrauch endlicher Ressourcen und andererseits für ein hohes Abfallaufkommen verantwortlich. Wobei der Bausektor als einer der ressourcen- und abfallintensivsten Sektoren gilt [13]. Der Bausektor ist in Deutschland für etwa 38 % des nationalen Ressourcenverbrauchs [14] und für 55 % des nationalen Abfallaufkommens verantwortlich [15]. In Österreich verursacht der Bausektor sogar 71 % des Abfallaufkommens [16]. Bei der Schonung natürlicher Ressourcen und dem Vermeiden von Abfall nimmt das Bauwesen aufgrund des hohen Rohstoffbedarfs also eine Schlüsselrolle ein. Der schonende Umgang mit Ressourcen sowie die Möglichkeit eines hochwertigen Recyclings der eingesetzten Baustoffe nehmen daher bei der Errichtung von Gebäuden eine wichtige Rolle ein.



Abbildung 1-1: Lineares Wirtschaftsprinzip (Eigene Darstellung nach [17])

### 1.1.4. Zusammenfassung der Motivation

Aus den wachsenden Städten, dem hohen Ressourcenverbrauch und Abfallaufkommen sowie dem großen Anteil des Gebäudesektors an den Treibhausgasemissionen ergeben sich komplexe Anforderungen an den Wohnungsbau in der Zukunft. Bauwerke werden reparierbar, wiederverwendbar und recycelbar geplant und gebaut werden müssen. Zeitgleich können nachwachsende Rohstoffe vermehrt eingesetzt werden, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Errichtung eines Gebäudes zu senken. Durch kompakte Bauweisen sowie gezielte Nachverdichtung ist es möglich, neuen Wohnraum in bereits bebauten urbanen Räumen zu schaffen und die steigende Nachfrage zu decken. Bereits heute ist bekannt, dass Holz bei der Transformation hin zur nachhaltigen Wohnungswirtschaft eine tragende Rolle spielen kann [10]. In Verbindung mit einer nachhaltigen und regionalen Holzwirtschaft steht dem Hochbau ein nachwachsender, CO<sub>2</sub>-speichernder und in der Bearbeitung energiearmer Rohstoff zur

Verfügung. Im Gegensatz zum Mauerwerks- oder Stahlbetonbau ist der Holzbau zudem deutlich leichter und kann große Mengen an mineralischen Ressourcen bei der Erstellung der Gebäude einsparen und maßgeblich zur Ressourceneffizienz im Hochbau beitragen [5]. Der Holzbau zeichnet sich neben seiner leichten Bauweise auch durch die Vorfertigung in Elementen sowie einen schichtartigen Aufbau aus [18]. Dieser Aufbau kann den Austausch einzelner Schichten ermöglichen [18]. Zudem sollte ein elementweise errichtetes Gebäude theoretisch auch wieder in die einzelnen Elemente und später in die einzelnen Schichten der Elemente zerlegt werden können [18]. Der Holzbau ermöglicht den Einsatz mechanischer Verbindungsmittel wie beispielsweise Steckverbindungen, Bolzen oder Schrauben [5] und eine serielle Elementbauweise [5]. So kann der Holzbau in der Theorie eine wiederverwendbare und recycelbare Bauweise darstellen. Aktuell wird wenig Augenmerk auf die spätere Wiederverwendbarkeit und Recyclbarkeit gelegt. So werden im Holzbau häufig nicht zerstörungsfrei lösbare Verbindungen wie geklammerte Platten, vernagelte Winkel oder verklebte Folien eingesetzt. Aus diesen Gründen soll in der vorliegenden Arbeit die Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holz-Wohngebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 analysiert werden. Durch die Beantwortung der nachfolgenden Fragestellungen sollen die Stärken und Schwächen der aktuellen Holzbauweisen im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Recyclbarkeit untersucht werden, um darauf aufbauend die Grundlagen für eine nachhaltige, ressourceneffiziente und kreislauffähige Holzbauweise herauszuarbeiten.

## 1.2. Forschungsfragen

Die zentrale Forschungsfrage, die im Verlauf dieser Arbeit erörtert werden soll, lautet:

**Wie können Wohngebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 in Holzbauweise im Sinne der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit errichtet werden?**

Der mehrgeschossige Holzbau erfüllt viele Grundvoraussetzungen des zirkulären Bauens und ermöglicht bereits heute die Errichtung ressourceneffizienter Gebäude. Durch Anpassungen der Konstruktion, Grundrisse, Bauteilaufbauten, Material- und Verbindungsmittelwahl können in Zukunft kreislauffähige Gebäude in Holzbauweise errichtet werden. Im Verlauf dieser Arbeit soll herausgearbeitet werden, welche Tragwerke, Konstruktionsprinzipien, Verbindungsmittel und Bauteilaufbauten besonders geeignet sind, um einen kreislauffähigen Holzbau zu errichten. Darüber hinaus ist auch klar, dass die Kreislauffähigkeit eines Gebäudes nicht nur über technische Maßnahmen zu erreichen ist. Grundsätzliche Entscheidungen wie die Lage des Grundstücks oder architektonische Entscheidungen wie Grundrisswahl oder Wohnungsspiegel haben einen großen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit des Gebäudes.

Neben dem Wissen über die Grundkonzepte des kreislauffähigen Bauens ist die Bewertbarkeit der Zirkularität eines Gebäudes ein entscheidender Faktor, um im Entwurfsprozess zu erkennen, an welcher Stelle Verbesserungspotenzial besteht. Zertifizierungssysteme wie DGNB/ÖGNI und SNBS beschäftigen sich mit der Zirkularität von Gebäuden. Darauf aufbauend und mit den Grundkonzepten zum kreislauffähigen Holzbau soll ein Bewertungssystem für mehrgeschossige Holzwohngebäude entwickelt werden. Durch die Analyse von Referenzgebäuden soll mit dem entwickelten Bewertungssystem herausgearbeitet werden, wo der mehrgeschossige Holzbau aktuell auf dem Weg zur Kreislauffähigkeit steht, und welche Maßnahmen bei der Planung eines mehrgeschossigen Holzwohngebäudes besonders viel Einfluss auf die Kreislauffähigkeit haben. Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage werden nachfolgende Teil-Forschungsfragen im Verlauf dieser Arbeit beantwortet.

### **Ist der mehrgeschossige Holzwohnungsbau in seiner aktuellen Form kreislauffähig?**

Der mehrgeschossige Holzwohnungsbau bietet Grundvoraussetzungen, die zirkuläres Bauen begünstigen. Mit den aktuell verwendeten Bauteilaufbauten, Verbindungstechniken und Baupraktiken kann jedoch am Ende des Lebenszyklus noch keine Wiederverwendung stattfinden.

### **Wie lässt sich die Kreislauffähigkeit von mehrgeschossigen Holzgebäuden objektiv bewerten?**

Zirkuläres Bauen ist ein komplexes Themenfeld, bei dem viele Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen und sich gegenseitig beeinflussen. Bei der Planung eines zirkulären Gebäudes besteht während der Entwurfsphase Bedarf an einer laufenden Analyse und Einschätzung der Kreislauffähigkeit des Gebäudes. Dabei liefert die Bewertung bestehender Gebäude wertvolle Erkenntnisse über Zusammenhänge im kreislauffähigen Bauen.

### **Kann mehrgeschossiger Holzbau zu einer Verringerung der Flächenversiegelung im Neubau oder zu einer Erhöhung der Nutzungsintensität beitragen?**

Durch Suffizienz lässt sich der Ressourcenverbrauch eines Gebäudes besonders effektiv senken. Ein Großteil der Ressourceneinsparungen geschieht durch den Verzicht der Nutzer auf Fläche und ist unabhängig von der Bauweise. Trotzdem hat auch die Bauweise Auswirkungen auf die versiegelte Fläche oder die mögliche Nutzungsintensität. Der mehrgeschossige Holzbau eignet sich aufgrund seiner Leichtbauweise besonders gut für eine Nachverdichtung durch Aufstockung. Durch die kurzen Montagedauer und die vergleichsweise geringe Lärmbelastung kann der Holzbau aber auch ideal für die Nachverdichtung innerstädtischer Baulücken eingesetzt werden.

### **Wie lässt sich ein mehrgeschossiger Holzbau besonders ressourceneffizient ausführen?**

Im mehrgeschossigen Holzbau werden verschiedene Konstruktionsarten wie Massivholzbau, Holztafelbau, Skelettbau, Holzhybridbau oder Modulbau eingesetzt. Diese verschiedenen Konstruktionsarten gehen jeweils mit einem unterschiedlichen Materialeinsatz einher. Bei der Beurteilung der Ressourceneffizienz ist ausschlaggebend, dass mit möglichst geringem Material- und Ressourceneinsatz die notwendigen Produkteigenschaften erfüllt werden. Darüber hinaus ermöglicht der Holzbau durch seinen hohen Vorfertigungsgrad effiziente Herstellungs- und Montagebedingungen.

### **Von welchen Aspekten hängt die Umnutzung des Verwendungszwecks im mehrgeschossigen Holzwohnbau ab und wie lässt sich eine Umnutzung mit angemessenem Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand erreichen?**

Um die Lebensdauer eines Gebäudes zu verlängern, ist die Umnutzungsfähigkeit eines Gebäudes besonders wichtig. So kann das Gebäude in Zukunft auch bei einer geänderten Nachfrage weitergenutzt werden und muss so nicht abgerissen werden.

### **Welche Aspekte erhöhen die Reparaturfähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude, sodass mit einem angemessenen Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand die Nutzungsdauer des Gebäudes verlängert werden kann?**

Neben der Umnutzungsfähigkeit kann die Reparaturfähigkeit die Lebensdauer eines Gebäudes verlängern. Dabei ist neben der Dauerhaftigkeit der Tragstruktur auch die einfache Erreichbarkeit und Austauschbarkeit sämtlicher Bauteilschichten und Installationen ausschlaggebend.

### **Welche Bauteile, Bauelemente und Komponenten weisen im mehrgeschossigen Holzbau am Ende des Lebenszyklus ein hohes Wiederverwendungspotenzial auf und durch welche Maßnahmen kann dieses Potenzial voll ausgeschöpft werden?**

Eine Wiederverwendung bedeutet, dass ein Produktbestandteil am Ende des Lebenszyklus wieder für denselben Zweck und in seiner ursprünglichen Form bei der Herstellung eines neuen Produktes eingesetzt wird. Bei einem Gebäude kann die Wiederverwendung auf der Ebene des Bauteils, des Bauelements oder der Komponente stattfinden. Entscheidend ist dafür jeweils, dass sich die Verbindungen schadensfrei und mit angemessenem Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand lösen lassen.

### **Lässt sich die Rückbaubarkeit und Trennbarkeit von Bauteilen mit effizienter maschineller Vorfertigung der Bauteile und elementweiser Montage vereinbaren?**

Um die Rückbaubarkeit und Trennbarkeit von Holzgebäuden und Bauteilen zu verbessern, müssen die Verbindungsmittel zwischen den verschiedenen Bauteilen sowie die Verbindungsmittel innerhalb eines Bauteils zwischen den jeweiligen Bauteilschichten entsprechend gewählt werden. Dies führt zu einer Veränderung der aktuellen Herstellungs- und Montageverfahren. Dennoch bleibt eine elementweise Vorfertigung ein Schlüssel zum kreislauffähigen Bauen.

### **Wie ist das Materialrecycling im Kontext der Kreislaufwirtschaft zu betrachten und welche Baustoffe und Materialien lassen sich im mehrgeschossigen Holzbau am Ende des Lebenszyklus im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wiederverwerten?**

Beim Recycling werden die Baustoffe oder Materialien zum einen durch eine technische Aufbereitung wieder zu Ausgangsstoffen für den Produktionsprozess und zum anderen durch Kompostierung zu biologischen Nährstoffen für Pflanzenwachstum. Das Ziel ist es, einen geschlossenen Stoffkreislauf zu schaffen und für den Recyclingprozess möglichst wenig Energie aufzuwenden. Ausschlaggebend dafür ist die Möglichkeit zur sortenreinen Trennung der Baustoffe und Materialien. Zudem muss der Baustoff für den Recyclingprozess geeignet sein.

### **Welche Maßnahmen haben einen besonders großen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit und Ressourceneffizienz des Holzgebäudes?**

Es werden zahlreiche Maßnahmen genannt, um die Zirkularität im Holzbau zu erhöhen. Dabei sind unter den genannten Maßnahmen solche, die einen sehr großen Einfluss auf die Verbesserung des Kreislaufpotenzials haben. Umgekehrt existieren auch Baupraktiken, die einen weitreichenden negativen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit des Gebäudes haben.

### **Welche Hindernisse und Bedenken existieren aktuell in Bezug auf die Wiederverwendung im Holzbau?**

Obwohl der Gesetzgeber die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft anstrebt, existieren im Bauwesen aktuell noch viele Hindernisse, die von legislativer Seite geklärt werden müssen.

### **Welche Vorteile weist der Holzbau auf, wenn es darum geht, ein kreislauffähiges Gebäude zu errichten?**

Grundprinzipien des mehrgeschossigen Holzbaus wie die Modularität und die Vorfertigung in Verbindung mit dem leichten Werkstoff Holz bringen bei der Errichtung eines zirkulären Gebäudes Vorteile mit sich.

### 1.3. Ziele und Grenzen

Das Hauptziel der Arbeit ist es, herauszuarbeiten, welche Maßnahmen ein ressourceneffizientes und kreislauffähiges Bauen im mehrgeschossigen Holzwohnungsbau ermöglichen. Dafür werden drei Teilziele definiert. Das erste Teilziel ist, den aktuellen Stand der Forschung im mehrgeschossigen Holzbau hinsichtlich Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit darzustellen. Mit dem zweiten Teilziel soll ein Bewertungsschema für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohnungsbauten erarbeitet werden. Durch die Analyse von Referenzgebäuden sollen die Stärken und Schwächen der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit im mehrgeschossigen Holzbau aufgezeigt werden. Aus den Erkenntnissen der vorhergegangenen Teilziele soll im letzten Teilziel ein Entwurf für einen zirkulären Holzbau in Wien entstehen. Durch die Anwendung der Analyse auf den eigenen Entwurf sollen Schwächen aufgezeigt werden und entsprechende Vorschläge zur Verbesserung des Entwurfs diskutiert werden.

#### 1.3.1. Beurteilungskriterien der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude

Die Grundlagen des kreislauffähigen Bauens werden in der Literatur beispielsweise im „Atlas Recycling“ [19] oder im „Circular Housing-Report“ [5] ausführlich beschrieben. Aufbauend auf den Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft wurden verschiedene Bewertungsmethoden für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden entwickelt, wie zum Beispiel durch die DGNB [20] oder den „Urban Mining Index“ [21]. Einige Forschungsarbeiten haben sich bereits mit Konzepten zur Entwicklung einer kreislauffähigen Holzbauweise beschäftigt. Basierend auf dem aktuellen Stand der Forschung sollen Beurteilungskriterien ausgearbeitet werden, um die Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzwohngebäude zu bewerten. Dabei soll insbesondere auch auf die Maximierung der Lebensdauer eingegangen werden. Im Wohnungsbau ist die Verlängerung der Lebensdauer ein wichtiger Teil der Kreislauffähigkeit.

#### 1.3.2. Stärken und Schwächen des mehrgeschossigen Holzbaus nach aktuellem Stand der Technik hinsichtlich seiner Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit

Anhand der Bewertungskriterien sollen ausgewählte Referenzprojekte mehrgeschossiger Holzwohngebäude analysiert werden. Die Referenzgebäude sollen den aktuellen Stand der Technik des mehrgeschossigen Holzbaus darstellen, wobei auf die aktuelle Vielfalt der Konstruktionsarten eingegangen wird. So werden möglichst viele unterschiedliche Konstruktionsweisen und Konzepte bei der Analyse berücksichtigt. Aus den Ergebnissen der Analyse sollen die Stärken und Schwächen der Referenzprojekte hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit ersichtlich werden.

#### 1.3.3. Entwicklung eines Entwurfs für ein mehrgeschossiges Holzwohngebäude unter dem Gesichtspunkt der Kreislaufwirtschaft

Aus den Stärken und Schwächen, die bei der Beurteilung der Referenzprojekte identifiziert wurden, soll ein Entwurfskonzept entwickelt werden, welches den Kriterien der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit entspricht. Konkrete Konstruktionsarten und Bauteile aus den Referenzgebäuden sollen mithilfe des aktuellen Stands der Forschung sowie innovativen Verbindungsmitteln und nachhaltigen Materialien weiterentwickelt werden. Die so entwickelten Bauteile und Konstruktionsprinzipien sollen zu einem kreislauffähigen und ressourceneffizienten Entwurf für einen mehrgeschossigen Holzwohnbau zusammengeführt

werden. Eine Analyse des Entwurfs soll aufzeigen, in welchen Bereichen dies gelungen ist und wo der Entwurf Verbesserungspotenzial aufweist.

#### 1.3.4. Grenzen

In der vorliegenden Arbeit wird explizit auf den Wohnungsbau in urbanen Räumen eingegangen. Dadurch ergeben sich hinsichtlich der betrachteten Nutzungsdauer andere Voraussetzungen als beispielsweise im Industriebau. Durch den betrachteten Nutzungszeitraum von mindestens 50 bis 100 (+) Jahren rückt die Verlängerung der Lebensdauer der Bauwerke verstärkt in den Mittelpunkt. Konzepte für temporäre Bauwerke mit Fokus auf häufigem Auf- und Abbau des Gebäudes sind daher nicht Bestandteil dieser Arbeit. Ziel ist es, ein Planungskonzept für mehrgeschossige Holzwohngebäude im Sinne der Kreislaufwirtschaft auszuarbeiten. Für die Ausarbeitung dieses Planungskonzeptes wird unter anderem auch der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich seiner Kreislauffähigkeit untersucht. Allerdings ist es nicht das Ziel dieser Arbeit, ein Planungskonzept auszuarbeiten, wie der Gebäudebestand im Sinne der Kreislaufwirtschaft weitergeführt werden kann, sondern wie der Neubau in Zukunft kreislauffähig gestaltet werden kann.

## 2. Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Das Wirtschaftsmodell der Kreislaufwirtschaft versucht, den Verbrauch endlicher Ressourcen von der Wirtschaftsleistung durch Wiederverwendung und Recycling zu entkoppeln und somit das Anfallen von Abfall zu eliminieren [5, 22]. Obwohl der Bausektor die gesetzlich vorgegebene Verwertungsquote von 70 % in Deutschland deutlich überschreitet (88 % Verwertung) [15], bedeutet dies noch keine Abkehr vom linearen Wirtschaftsmodell. Denn die verwerteten Abfälle aus dem Bauwesen werden zumeist nicht hochwertig, sondern zum Verfüllen von Gruben mit Bauschutt oder in gebrochener Form als Recycling-Gesteinskörnung für den Straßenbau verwendet [12]. Eine hochwertige Wiederverwendung im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist im Hochbau bisher nur in Ansätzen vorhanden. In Zukunft wird eine kreislauffähige Bauweise durch ökologische, gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche Anforderungen verstärkt in den Fokus rücken und soll auf lange Sicht die lineare Wirtschaft im Bauwesen verdrängen. Aufgrund seiner Eigenschaft als nachwachsender Rohstoff, welcher bei nachhaltiger Forstbewirtschaftung gleichzeitig CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden und im Bauwerk über lange Zeit speichern kann [10], spielt Holz bei der Umsetzung des kreislauffähigen und klimaneutralen Bauens eine tragende Rolle.

### 2.1. Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, ein Wirtschaftssystem zu schaffen, in dem keine endlichen Primärrohstoffe aus ihren natürlichen Lagerstätten abgebaut werden. Die Ressourcen zur Herstellung neuer Produkte stammen aus nachwachsenden Quellen oder werden durch Wiederverwendung oder Recycling aus anthropogenen Lagerstätten gewonnen (Sekundärrohstoffe) [17]. Um den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten, müssen die Rohstoffe immer in Kreisläufen geführt werden, die möglichst wenig Ressourcen- und Energieverbrauch erfordern. Das heißt, dass Produktionsvermeidung vor ressourceneffizienter Produktion kommt oder dass die Reparatur eines Produktes vor dessen Entsorgung geht. In Abbildung 2-1 sind die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft dargestellt und werden in den folgenden Unterkapiteln auf das Bauwesen bezogen erläutert.



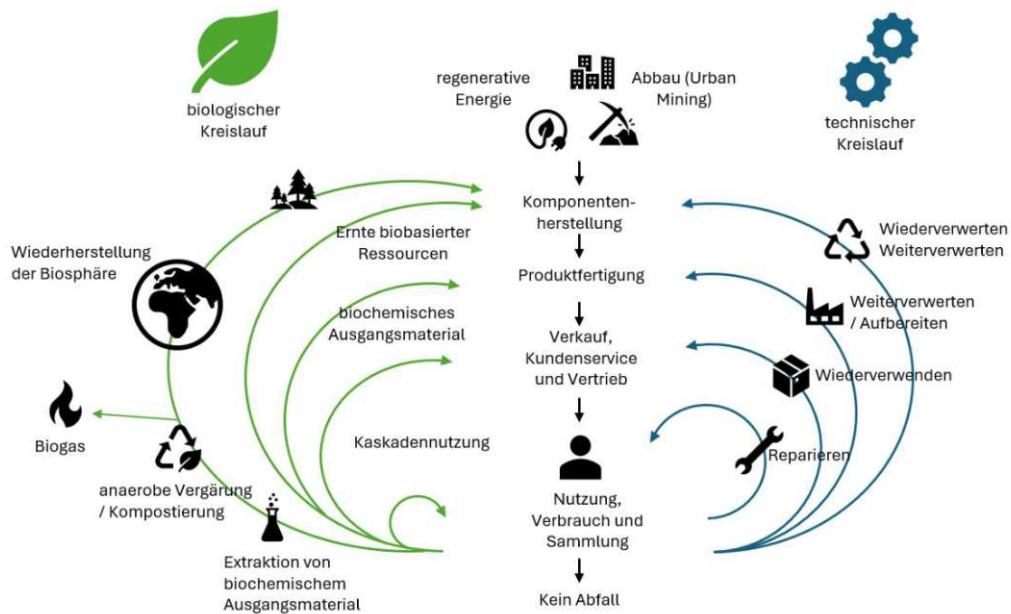


Abbildung 2-1: Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Eigene Darstellung nach [17])

### 2.1.1. Grundprinzipien nachhaltigen Handelns

Bisher steht in der linearen Wirtschaft eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs häufig an erster Stelle, wenn es um die Verbesserung der Nachhaltigkeit eines Systems oder Produktes geht. Im Bauwesen gibt es verschiedene Stellschrauben, um den Ressourcenverbrauch zu senken. Dennoch ist es offensichtlich, dass die Bauwirtschaft nicht ausschließlich durch eine Verringerung des Verbrauchs langfristig nachhaltig sein kann. Um eine Transformation hin zu einer ganzheitlich nachhaltigen Wirtschaftsweise zu schaffen, müssen die Prinzipien nachhaltigen Handelns ineinandergreifen.

#### Suffizienz

Suffizienz bedeutet eine Reduktion des Konsums (Verzicht), also einen genügsamen Umgang mit den vorhandenen Ressourcen und nur das zu verbrauchen, was tatsächlich benötigt wird [5]. Die Suffizienz ist eine direkte und effektive Maßnahmen, um den Ressourcenverbrauch noch vor der Herstellung zu senken [23]. Der Verzicht ist zumeist mit einer Umstellung des Konsumverhaltens des Verbrauchers verbunden und ist häufig aufgrund der persönlich spürbaren Auswirkung schwer vermittelbar [21].

#### Effizienz

Durch Effizienz werden bestehende Systeme optimiert, sodass ein gleiches Ergebnis mit einem verringerten Ressourceneinsatz möglich wird [21]. Dabei werden die für das Produkt notwendigen Rohstoffe und Ressourcen im Herstellungsprozess so weit wie möglich minimiert [21]. Somit wird die geforderte Produktbeschaffenheit mit einem verringerten Materialeinsatz erreicht. Für die Konsumenten ist dies in der Regel angenehmer als die Ressourceneinsparung durch Suffizienz, da für sie kein spürbarer persönlicher Verzicht notwendig ist, um ein nachhaltigeres Produkt zu erhalten. Für die produzierenden Unternehmen geht eine gesteigerte Effizienz auch häufig mit Kosteneinsparungen im Produktionsprozess einher [21].

### *Konsistenz (Verträglichkeit)*

Die Transformation der linearen Wirtschaft hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft kann nur durch Konsistenz erreicht werden [21]. Durch Suffizienz und Effizienz kann der Ressourcenverbrauch zwar reduziert werden, sie können jedoch weder den Abbau endlicher Ressourcen noch das Anfallen von Abfall verhindern, sondern lediglich verringern [21]. Viel entscheidender als die Menge des Ressourcenverbrauchs ist also „die Verträglichkeit (Konsistenz) der Produktionskreisläufe mit den natürlichen Stoffkreisläufen“ [21]. Die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft sollen die vom Menschen geschaffenen technischen Produktionskreisläufe nach Vorbild der natürlichen (biotischen) Stoffkreisläufe formen.

### *Cradle-to-Cradle*

Aus der Konsistenz der Produktionskreisläufe folgt das Prinzip der Kreislaufwirtschaft, bei dem durch geschlossene Materialkreisläufe auf den Abbau nicht nachwachsender (fossiler, metallischer und mineralischer) Rohstoffe verzichtet werden kann [21]. In den geschlossenen Materialkreisläufen entsteht kein Abfall, da alle Bestandteile oder Rohstoffe eines Produktes am Ende dessen Lebensdauer ohne Qualitätsverlust wieder der Produktion zugeführt werden [21]. Lediglich Rohstoffe aus biotischen Materialien, die natürlich nachwachsen und somit selbst einen Kreislauf bilden, werden dann noch abgebaut und dem Produktionsprozess zugeführt [21]. Da Rohstoffe in diesem System immer wiederverwendet und nicht aus natürlichen Vorkommen abgebaut werden, ist die eingesetzte Menge an Rohstoffen in der Theorie nicht relevant [21]. Dieses Prinzip wird auch Cradle-to-Cradle genannt [21]. Cradle-to-Cradle beschreibt den Lebenszyklus eines Rohstoffs in einem geschlossenen Produktkreislauf von der Gewinnung des Primärrohstoffs bis zur Wiedergewinnung als Sekundärrohstoff. Bisher werden die meisten Produkte als Cradle-to-Gate (Gewinnung bis zur fertigen Herstellung) oder Cradle-to-Grave (Gewinnung bis zur Entsorgung) betrachtet. In den folgenden Kapiteln werden Handlungsprinzipien der Kreislaufwirtschaft vorgestellt, um diese Transformation von einer linearen Wirtschaftsweise hin zu einem geschlossenen Kreislauf zu vollziehen.

#### 2.1.2. Abfallhierarchie

Wendet man die Prinzipien der Suffizienz, Effizienz und Konsistenz auf die Wirtschaft an, ergibt sich das Prinzip der Kreislaufwirtschaft. Dieses Prinzip kann aus der Abfallhierarchie abgelesen werden. In einer Kreislaufwirtschaft werden Produkte am Ende des Lebenszyklus nicht entsorgt, sondern unter größtmöglichem Werterhalt dem Produktionszyklus wieder zugeführt [5]. Der Ansatz der Kreislaufwirtschaft geht jedoch über die Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus hinaus und verfolgt zunächst das Vermeiden von Überproduktion (Suffizienz), die Ressourcenschonung bei der Produktion (Reduce), die Verlängerung der Lebensdauer (Long-Use) und erst nachrangig die Wiederverwendung (Re-Use) und das Recycling. Die Kreislaufwirtschaft stellt „den Wert bzw. die Werterhaltung von Gütern und Materialien sowie die mit ihnen verbundenen Umweltwirkungen in den Mittelpunkt“ [5]. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollen Produkte am Ende ihres Lebenszyklus zunächst (1) geteilt, (2) gewartet, (3) wiederverwendet, (4) instandgesetzt und erst in letzter Instanz (5) recycelt werden [22]. Die vom Gesetzgeber vorgegebene Abfallhierarchie (siehe Abbildung 2-2 und Kapitel 2.2) spiegelt im Grunde die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft wider.

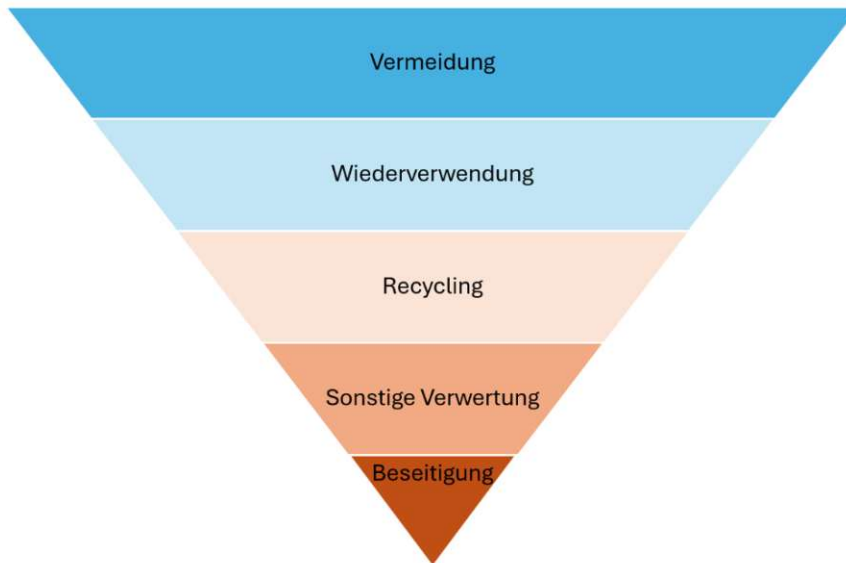


Abbildung 2-2: Abfallhierarchie (Eigene Darstellung nach [12])

### 2.1.3. Reduktion des Ressourcenverbrauchs (Reduce)

Im Unterkapitel 2.1.1 werden die Grundprinzipien des nachhaltigen Handelns vorgestellt. Durch Suffizienz und Effizienz können Ressourcen bereits vor oder während der Herstellung eingespart werden. Im Kontext des Bauwesens kann Suffizienz eine Reduktion der benötigten Grundfläche oder eine Erhöhung der Nutzungsintensität durch Verzicht auf private Flächen zugunsten von Gemeinschaftsflächen bedeuten [5]. Als besonders ressourceneffizient gilt die Leichtbauweise, mit welcher sich der Materialeinsatz für ein technisch gleichwertiges Gebäude gegenüber der Massivbauweise verringern lässt [5]. Ein geringerer Flächenverbrauch und eine leichte, ressourceneffiziente Bauweise müssen einhergehen, um den Ressourcenverbrauch im Bauwesen zu senken.

#### *Rolle des Ressourcenverbrauchs in der Kreislaufwirtschaft*

In einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft ist der Ressourcenverbrauch eher nebensächlich, solange mit den verfügbaren Ressourcen aus anthropogenen Lagerstätten die Nachfrage der Produktion gedeckt werden kann. Die eingesetzten Ressourcen werden nur vorübergehend in einem Produkt genutzt und stehen für die Produktion am Ende des Lebenszyklus wieder als Ressource zur Verfügung - es werden also keine Primärressourcen verwendet [21]. Dennoch spielt der Ressourcenverbrauch auf dem Weg hin zur Kreislaufwirtschaft eine große Rolle, denn solange keine geschlossenen Materialkreisläufe existieren, bedeutet die Ressourceneffizienz auch immer einen Verzicht auf den Abbau von Primärressourcen.

### 2.1.4. Maximierung der Lebensdauer (Long-Use)

Ein Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft ist die Maximierung der Lebensdauer, um Neuproduktion und den damit verbundenen Ressourcenverbrauch zu verringern. Die Lebensdauer lässt sich durch Umnutzungsfähigkeit und Reparaturfähigkeit verlängern.

#### *Umnutzungsfähigkeit*

Ein zentraler Aspekt der Kreislaufwirtschaft ist, ein Produkt möglichst lange zu nutzen [5], um eine Neuproduktion und den dadurch entstehenden Ressourcenverbrauch zu minimieren.

Eine Möglichkeit zur Verlängerung der Nutzungsdauer, welche sich im Bauwesen gut anwenden lässt, ist die Nutzungsflexibilität eines Produktes [5]. Das bedeutet, dass sich ein Produkt über seinen ursprünglichen Zweck hinaus zum Beispiel durch Anpassung oder Umbau nutzen lässt. Für den Fall einer zukünftig sinkenden Nachfrage nach dem Produkt kann dessen Nutzungsdauer durch die Umnutzungsfähigkeit verlängert werden [5, 19, 23]. Dabei muss die Anpassung an die neue Nutzung mit angemessenem Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand möglich sein [24]. Im Hochbau kann Nutzungsflexibilität bedeuten, dass ein ursprünglich als Wohngebäude geplantes Gebäude auch für Büro- oder Verkaufszwecke genutzt werden kann [23].

### *Reparaturfähigkeit*

Eine lange Nutzungsdauer wird durch die Reparaturfähigkeit des Produktes gewährleistet [5, 22, 23]. Die Teile des Produktes, die einen häufigeren Verschleiß aufweisen, sollen dabei möglichst einfach und ohne Zerstörung anderer Teile zu warten, zu reparieren oder auszutauschen sein [5, 19]. Für die Wartung und Reparatur gilt analog zum Umbau, dass die Arbeiten mit einem angemessenen Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand durchführbar sein sollen [5].

#### 2.1.5. Wieder- und Weiterverwendung

Sollte es trotz Umnutzung und Reparatur zum Abbruch eines Gebäudes kommen, ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Wiederverwendung stets anderen Verfahren vorzuziehen, da diese den größten Werterhalt, verbunden mit dem geringsten Ressourceneinsatz, garantiert.

### *Wiederverwendung (Re-Use)*

Bei der sogenannten Wiederverwendung bleibt das Produkt nach dem Rückbau in seiner ursprünglichen Form erhalten und wird für seinen ursprünglichen Zweck eingesetzt [21]. Die Wiederverwendung stellt die qualitativ hochwertigste Nutzung am Ende des Lebenszyklus dar. Es tritt kein nennenswerter Qualitätsverlust auf [12, 19]. Darüber hinaus bleiben „alle ehemals zur Herstellung eingesetzten Rohstoffe einschließlich der Energie erhalten“ [12, 19]. Ein entscheidender Faktor dafür ist die Dauerhaftigkeit sowie eine schadensfreie Lösbarkeit des Bauteils [5, 17]. Im Bauwesen haben insbesondere Systembauweisen mit standardisierten und modularen Elementen ein hohes Potenzial zur Wiederverwendung [5, 18].

### *Weiterverwendung (Further-Use)*

Bei der Weiterverwendung behält das Bauteil wie auch bei der Wiederverwendung seine ursprüngliche Form bei, wird jedoch nicht für seinen ursprünglichen Zweck eingesetzt, da es beispielsweise nicht mehr die geforderte Qualität aufweist [25]. Die Weiterverwendung geht in den meisten Fällen mit einem Qualitätsverlust einher, allerdings werden keine Ressourcen und Energie für Bearbeitungsprozesse aufgewendet [25].

#### 2.1.6. Verwertung

Erst wenn eine Wiederverwendung oder Weiterverwendung nicht möglich ist, sollte die Verwertung auf der Materialebene stattfinden. Hierbei sind die durch Recycling zu erreichende Produktqualität und der zum Recycling notwendige Ressourcenaufwand zu berücksichtigen.

### Wiederverwertung (Recycling)

Bei der Wiederverwertung bleibt die Ursprungsform des Produktes nicht erhalten [25]. Im technischen Kreislauf (siehe Abbildung 2-3) werden die Ausgangsstoffe nach der sortenreinen Trennung technisch-industriell aufbereitet [25], wobei dieser Prozess immer mit Energieverbrauch gekoppelt ist [25]. „Der Kreislauf gilt als geschlossen, wenn die daraus hervorgehenden Sekundärrohstoffe die gleiche Qualität wie die Primärrohstoffe aufweisen und es im Aufbereitungsprozess nur zu vernachlässigbarem Masseverlust kommt“ [25]. Ist ein nahezu geschlossener Stoffkreislauf möglich, spricht man von „Closed-Loop-Materialien“ [5]. Insbesondere Metalle können durch Einschmelzen als Recyclingmaterial wieder dieselbe Qualität wie das Ursprungsmaterial aufweisen [25].

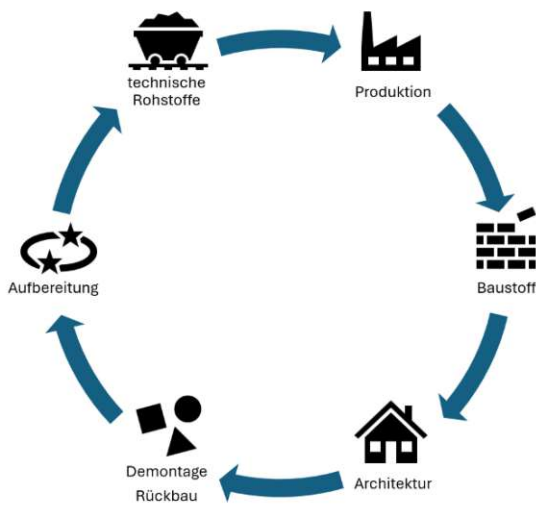


Abbildung 2-3: Technischer Kreislauf (Eigene Darstellung nach [25])

### Weiterverwertung (Downcycling)

Ist ein Material nur unter Qualitätsverlust weiterverwertbar, spricht man von Downcycling [25]. Wenn im Zuge des Aufbereitungsprozesses der Ausgangsstoffe ein neues Produkt mit einer geringeren Qualitätsstufe entsteht, wird dies als Kaskadennutzung bezeichnet [25]. Mit dem Qualitätsverlust gehen bei der Kaskadennutzung auch meist Ressourcenverlust und Abfallaufkommen einher [25]. Daher ist das Downcycling „nur bei nachwachsenden Rohstoffen grundsätzlich als positiv zu betrachten“ [25]. Die Herstellung von Spanplatten durch gehacktes Brettsperrholz (BSP) ist ein Beispiel für Kaskadennutzung im Bauwesen [18].

### Kompostierung (organisches Recycling)

Im biotischen Stoffkreislauf können natürliche, unbehandelte und sortenreine Stoffe, die der Natur entnommen wurden, ihrem natürlichen Kreislauf durch Kompostierung wieder zugeführt werden (siehe Abbildung 2-4) [25]. Durch die Kompostierung entstehen Nährstoffe, welche das Wachstum neuer biotischer Ausgangsstoffe ermöglichen. Der biotische Kreislauf ist nur geschlossen, wenn es sich um einen nachwachsenden Rohstoff aus zertifizierter und nachhaltiger Ernte handelt [25]. Eine Kompostierung ist dann sinnvoll, wenn am Ende einer Kaskadennutzung kein weiteres Downcycling möglich ist und für die Herstellung des ursprünglichen Produktes wenig graue Energie verwendet wird [18].

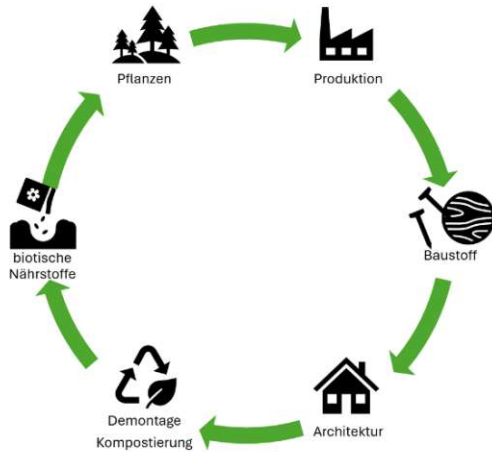


Abbildung 2-4: Biotischer Kreislauf (Eigene Darstellung nach [25])

### Energetische Verwertung

Bei der energetischen Verwertung wird durch Verbrennung der Stoffe am Ende des Lebenszyklus die im Material enthaltene Energie genutzt, um Energie oder Fernwärme in Kraftwerken zu erzeugen [18]. Hierfür sind brennbare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen geeignet, bei deren Herstellungsprozess ein geringer Anteil an grauer Energie aufgewendet wird [18]. Idealerweise steht die energetische Verwendung dann am Ende einer Nutzungskaskade [25]. Infrage kommen dafür zum Beispiel verwitterte Fassadenbekleidungen aus Massivholz oder biotische Dämmstoffe [18]. Energetische Verwertung findet in der Praxis auch häufig für Produkte oder Materialien statt, welche keinen masserelevanten Anteil am Bauwerk ausmachen, beispielsweise Dübel, Silikon oder nicht sortenreine Folien [25].

#### 2.1.7. Hierarchien kreislauffähiger Neubauten

Die Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft lassen sich im Bauwesen auf eine fünfstufige Hierarchie (siehe Abbildung 2-5) zirkulärer Bauwerke übertragen.

- (1) Auf Gebäudeebene wird das angestrebte Ziel der langen Nutzung (Long-Use) durch eine möglichst hohe Nutzungsflexibilität des Grundrisses, Aufstockungs- und Umbaumöglichkeiten gewährleistet [26].
- (2) Auf der Bauteilebene kann durch einen schadensfreien Aus- oder Rückbau ganzer Bauteile eine maximal hochwertige Wiederverwertung erreicht werden [26].
- (3) Eine Gliederung der Bauteile in ausbaufähige Bauelemente ermöglicht einfache Reparaturen und einen effizienten Austausch einzelner Konstruktionsschichten [26], so kann einerseits eine lange Nutzungsdauer (Long-Use) und andererseits durch Auflösen des Bauteils in seine Bauelemente eine Wieder- (Re-Use) oder Weiterverwendung (Further-Use) von Bauelementen.
- (4) Reversible Verbindungen zwischen den Komponenten (z. B. Schwelle, Steher, Holzwerkstoffbekleidung) garantieren die Rückbaubarkeit der Bauelemente in ihre Komponenten und ermöglichen damit deren Wieder- oder Weiterverwendung [26].
- (5) Auf der Materialebene können Stoffe dem biotischen oder technischen Kreislauf zum Recycling zugeführt werden [26]. Die Qualität des Recyclingproduktes ist abhängig von den Materialeigenschaften und der Sortenreinheit nach dem Rückbau. Bei geschlossenen technischen und biotischen Kreisläufen entstehen durch technische Verfahren beziehungsweise Kompostierung und Pflanzenwachstum Recyclingbaustoffe mit derselben Qualität wie die Ausgangsprodukte. Beim Downcycling kann das

ursprüngliche Qualitätsniveau des Ausgangsmaterials bei der Verwertung nicht wieder erreicht werden.

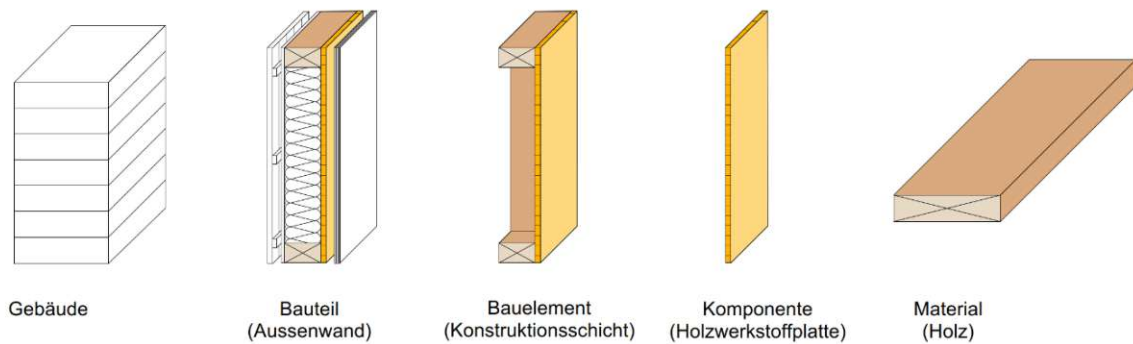


Abbildung 2-5: Hierarchie kreislauffähiger Neubauten (Eigene Darstellung nach [26])

## 2.2. Kreislaufwirtschaft in der Gesetzgebung

Im folgenden Abschnitt wird aufgezeigt, durch welche gesetzgeberischen Maßnahmen von Seiten der EU und der Mitgliedsstaaten versucht wird, einen Umbau von einem linearen Wirtschaftsmodell hin zu einem kreislauffähigen durchzuführen. Dabei werden sowohl EU-Recht als auch dessen Umsetzung im nationalen Recht im DACH-Raum<sup>1</sup> sowie wirtschaftliche Anreize zur Einführung einer Kreislaufwirtschaft betrachtet.

### 2.2.1. Europäische Union

Aufgrund der großen Hebelwirkung, die der Kreislaufwirtschaft auf dem Pfad zur Klimaneutralität zugeschrieben wird, steht diese auch im Fokus der Umweltpolitik [5]. Es wurden bereits auf unterschiedlichen politischen Ebenen gesetzliche Grundlagen für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft getroffen.

#### *EU-Abfallrahmenrichtlinie*

Die *EU-Abfallrahmenrichtlinie* (RL 2008/98/EG) ist seit Dezember 2008 gültig und legt rechtliche Rahmenbedingungen für den Umgang mit Abfällen fest. Erklärtes Ziel ist eine „Recycling Gesellschaft“ [27]. Folgende Bestimmungen sind in der Richtlinie [27] enthalten: Präzisierungen und Definitionen abfallrechtlicher Begriffe. Es erfolgt eine klare Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukt [12]. Zudem wird das Ende der Abfalleigenschaft festgelegt, wenn der Abfall „durch ein Verwertungsverfahren (...) wieder zum nachgefragten und zweckbestimmten Produkt wird“ [12]. Die bis dato gültige dreistufige Abfallhierarchie (Vermeiden, Verwerten, Beseitigen) wird durch eine neue, fünfstufige Abfallhierarchie ersetzt. Deren Reihenfolge lautet nun Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Entsorgung [12]. Mitgliedsstaaten werden verpflichtet, Abfallvermeidungsprogramme zu erstellen. Dafür werden auch Ziel-Recyclingquoten für das Jahr 2020 für Siedlungsabfälle (50 %) und für Bau- und Abbruchabfälle (70 %) festgelegt [12]. Mit der Einführung der Produktverantwortung werden Hersteller zur Abfallrücknahme beziehungsweise Kostenübernahme für die Beseitigung verpflichtet.

Mit einer Novelle aus dem Jahr 2018 verfolgt die *Abfallrahmenrichtlinie* die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft noch nachdrücklicher durch die Abfallvermeidung und die

<sup>1</sup> Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH)

Wiederverwendung beziehungsweise das Recycling. Zudem werden Bedingungen zur Deponierung bestimmter Materialien weiter verschärft [27].

### *EU-Deponierichtlinie*

Die 2018 überarbeitete EU-Deponie-Richtlinie (EU/2018/850) ist ein weiterer Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft. Die Mitgliedsstaaten sollen die Deponierung von ungefährlichen Abfällen schrittweise auf ein Minimum reduzieren [28]. Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass durch entsprechende gesetzliche Rahmenbedingungen die Abfallhierarchie befolgt wird und keine Verlagerung der Abfälle von den Deponien auf Verbrennungsanlagen stattfindet [28]. Die Wiederverwendung und das Recycling sollen gefördert werden [28].

### *EU-Bauprodukteverordnung*

Die *EU-Bauprodukteverordnung* (Verordnung Nr. 305/2011) ist seit 2013 anzuwenden und legt harmonisierte Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten fest [29]. Im Anhang 1 sind sieben Grundanforderungen an Gebäude aufgelistet, wobei Punkt 7 (Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen) folgende drei Punkte festlegt, die ein Gebäude bezüglich seiner Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit erfüllen muss: (1) „Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können“ [29], (2) „das Bauwerk muss dauerhaft sein“ [29] und (3) aus „umweltverträglichen Rohstoffen und Sekundärbaustoffen“ [29] errichtet sein.

### *EU-Green-Deal*

Der *EU-Green-Deal* ist ein 2020 beschlossenes Konzept, welches den Weg zum klimaneutralen Kontinent skizziert. Erklärtes Ziel ist die Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 und als Zwischenschritt im Jahr 2030 eine Treibhausgas-Reduktion von 55 % gegenüber 1990 [1]. Diese Ziele werden im *Europäischen Klimagesetz* „Fit for 55“ rechtsverbindlich für alle Mitgliedsstaaten festgeschrieben und sind seit 2021 in Kraft [30]. Im Rahmen des *EU-Green-Deal* und im Einklang mit dem *Europäischen Klimagesetz* soll der *Aktionsplan Kreislaufwirtschaft* den Weg zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft in der EU bis 2050 ebnen [31]. Dabei ist die Bauwirtschaft einer von sieben Schlüsselbereichen mit erheblicher Bedeutung für das Ziel der Kreislaufwirtschaft [31]. Im Bausektor sollen neben der Vermeidung von Abfällen insbesondere die Lebensdauer von Gebäuden verlängert und die in Baustoffen gebundene graue Energie gesenkt werden [31].

### *EU-Taxonomie-Verordnung*

Mit der *EU-Taxonomie-Verordnung* (EU 2020/852) will die Europäische Union Finanzströme in nachhaltige Projekte und Investitionen lenken [32]. Dies ist notwendig, um die Klimaziele aus dem *EU-Green-Deal* zu erreichen. Die *Taxonomie-Verordnung* legt sechs Kriterien fest, wann ein Investment als nachhaltig gilt. Dabei muss ein Investment mindestens ein Ziel aktiv verfolgen, während keines der weiteren Ziele verletzt wird [32]. Die Umweltziele lauten (1) Klimaschutz, (2) Klimawandelanpassung, (3) nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen, (4) Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, (5) Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung sowie (6) Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme [32]. Diese klare Definition des Begriffs Nachhaltigkeit soll Greenwashing in Zukunft verhindern [5]. Die *EU-Taxonomie* ist explizit keine Verpflichtung für Unternehmen, in nachhaltige Projekte zu investieren [5]. Bedeutende kapitalmarktorientierte Unternehmen, Finanzinstitute und Versicherungsgesellschaften in der Europäischen Union sind durch die *NFRD* dazu angehalten, Berichte über nicht finanzielle Belange zu erstellen und



zu veröffentlichen [33]. Ab dem Jahr 2023 wird diese durch die Corporate-Sustainability-Reporting-Directive (CSRD) abgelöst. Die CSRD gleicht die Berichterstattung an die Taxonomie-Anforderungen an, erweitert und harmonisiert die zu veröffentlichen Informationen, führt eine Prüfpflicht ein, verpflichtet das Management der Unternehmen zur Übernahme und Haftung für die Richtigkeit der veröffentlichten Informationen und weitet den Kreis der zum Bericht verpflichteten Unternehmen auf fast alle in der EU gelisteten Unternehmen (außer Kleinst- und nicht-kapitalmarktorientierten Unternehmen) aus [34]. Diese Berichterstattungsverpflichtungen ermöglichen es, Finanzströme transparent und ohne Greenwashing in nachhaltige Investitionen zu lenken. Seit 2021 müssen Unternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern ihre Taxonomie-Konformität nachweisen. Seit 2022 müssen Asset-Manager über den Anteil taxonomiekonformer Anlageprodukte informieren [5].

### 2.2.2. Nationales Recht im DACH-Raum

Im folgenden Abschnitt wird dargelegt, wie sich die Umsetzung der EU-Vorgaben zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft im nationalen Recht von Österreich widerspiegelt. Es erfolgt zudem ein kurzer Einblick in die Gesetzgebung im übrigen DACH-Raum.

#### Österreich

Das aktuelle Regierungsprogramm der Bundesregierung (2020 -2024) sieht die Forcierung der Kreislaufwirtschaft vor. Im Zuge der Standort- und Industriepolitik soll eine stärkere Ausrichtung nationaler Maßnahmen am EU-Green-Deal insbesondere durch einen strategischen Maßnahmenplan für die Kreislauf- und Recyclingwirtschaft erfolgen [35]. Im Sinne der Umweltpolitik sollen die Reparaturfähigkeit und Recycelbarkeit gesetzlich verankert werden [35].

Das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) bildet in Österreich die wichtigste gesetzliche Grundlage für Abfallwirtschaft [36]. Das AWG regelt Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung von Abfällen, Pflichten von in der Abfallwirtschaft tätigen Personen und Abfallbehandlungsanlagen [36]. Darüber hinaus werden bestimmte Aspekte von den Landesgesetzen in den einzelnen Bundesländern abgedeckt [36]. Zudem definiert das AWG die abfallrechtlichen Begriffe der Wiederverwendung und Verwertung. Während die Wiederverwendung sehr eng gefasst ist und nur Produkte oder deren Bestandteile darunter fallen, welche für den ursprünglichen Einsatzzweck wieder eingesetzt werden und kein Abfall sind, werden verschiedene Abfallbehandlungsverfahren unter dem Begriff Verwertung zusammengefasst [5].

Mit der Recycling-Baustoffverordnung (2016) gelten in Österreich Anforderungen zur Sicherstellung der Qualität der Abbruchmaterialien im Bauwesen (u. a. durch Schadstofferkundung, verwertungsorientierter Rückbau) [37]. Zusätzlich werden Anforderungen an Herstellung, Qualität und Verwendungsmöglichkeiten von Recyclingbaustoffen festgelegt [37]. Ein zentraler Baustein der Verordnung ist der Verlust der Abfallklassifikation von Recyclingbaustoffen unter bestimmten Voraussetzungen [37]. Somit werden Grundlagen geschaffen, in denen Wiederverwendung und Wiederverwertung von Baustoffen möglich sind. Das Ziel der Verordnung ist, die Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz zu fördern [5].

Die ÖNORM B 3151:2020 Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode liefert eine technische Standardisierung für den Gebäuderückbau zur Wiederverwendung und Wiederverwertung [38]. Sie ist für Gebäude mit über 750 t Abbruchabfällen und mehr als 3500 m<sup>3</sup> Bruttorauminhalt vollumfänglich anzuwenden [39]. Dabei geht dem Rückbau eine ausführliche Schad- und Störstoffuntersuchung mit vorherigem Ausbau schadstoffhaltiger

Materialien und Störstoffen voraus [38]. So soll sichergestellt werden, dass beim anschließenden selektiven und sortenreinen Rückbau keine Schad- und Störstoffe enthalten sind und die anfallenden Abbruchmassen dem Recycling zugeführt werden können [38]. Für den Rückbau, bestehend aus dem Ausbau der Schad- und Störstoffe sowie der Demontage der Konstruktion, ist ein Rückbaukonzept auf Basis einer Objektbeschreibung und der Schadstoffanalyse zu erstellen [39]. Die Norm stellt hauptsächlich sicher, dass der aktuell nicht kreislauffähige Gebäudebestand so zurückgebaut wird, dass ein maximales Materialrecycling möglich ist. Für die Wiederverwendung von Bauteilen, Bauelementen oder Komponenten sieht die Norm vor, dass die entsprechenden Elemente vom Bauherren vor dem Rückbau identifiziert werden und dann im Zuge des Rückbaus so demontiert werden, dass eine Wiederverwendung möglich ist [39]. Dabei wird auch ausdrücklich die Verwendung von Bauteilbörsen und Marktplätzen zur Erhöhung der Wiederverwendungsquote erwähnt [39]. Die in der EU-Bauprodukteverordnung (Verordnung Nr. 305/2011) festgelegten Grundanforderungen an Bauwerke werden in Österreich durch OIB-Richtlinien abgebildet [40]. Die OIB-Richtlinien dienen der Harmonisierung bautechnischer Vorschriften und wurden von den Bundesländern übernommen und in deren Bauordnungen als verbindlich festgelegt [40]. Der für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen relevante Punkt 7 (Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen) der EU-Bauprodukteverordnung ist bisher noch nicht in Form einer OIB-Richtlinie umgesetzt. Seit Mai 2023 liegt ein Grundlegendokument zur Ausarbeitung der OIB-Richtlinie 7 vor [41].

Die Novelle zur Deponieverordnung aus dem April 2021 soll stufenweise bis 2026 in Kraft treten und setzt die Änderungen der Deponie-Richtlinie (EU/2018/850) um [5]. Um eine Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ist in der Deponieverordnung festgelegt, dass zur Wiederverwendung, zum Recycling oder zur sonstigen Verwertung geeignete Abfälle nicht mehr deponiert werden dürfen [5]. Dieses Deponieverbot betrifft unter anderem wesentliche mineralische Baustoffe wie Beton, Ziegel und gipshaltige Mineralfaser-Produkte [5].

Auf Landesebene wurde 2019 in der Stadt Wien die aktualisierte Version der Smart-City-Rahmenstrategie 2019-2050 beschlossen. Darin werden Ziele bezüglich der Wiederverwendungs- und Verwertungsquoten im Bauwesen festgelegt. Bis 2050 sollen bei einem Abriss oder Großumbau 80 % der Bauteile und Materialien wiederverwendet oder verwertet werden [16]. Ab 2030 müssen Neubauten und Sanierungen laut der Rahmenstrategie unter dem Gesichtspunkt der maximalen Ressourcenschonung geplant und gebaut werden [16].

### *Deutschland*

Die EU-Abfallrahmenrichtlinie wird in Deutschland durch die Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes aus dem Jahr 2020 in nationales Recht umgesetzt [12] und bildet die wichtigste gesetzliche Grundlage für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft in der deutschen Abfallwirtschaft. Zahlreiche Verordnungen regeln auf Bundes- und Landesebene spezifische Aspekte der Abfallwirtschaft. Für das Bauwesen relevant sind unter anderem die Abfallverzeichnisverordnung, die Abfälle nach Herkunft und Gefährlichkeit einordnet und deren Entsorgung und Verwertung regelt [12]. In der Deponieverordnung werden insbesondere Anforderungen an den Deponiestandort sowie die Errichtung, Betrieb und Stilllegung von Deponien geregelt [42]. Die seit dem 1. August 2023 in Kraft getretene Ersatzbaustoffverordnung regelt bundesweit die Verwendung von Ersatzbaustoffen und schafft so Rechtssicherheiten für Hersteller und Anwender von Recyclingbaustoffen [43]. Die Gewerbeabfallverordnung wurde 2017 im Hinblick auf die EU-Abfallhierarchie erneuert.

Seitdem sind Bau- und Abbruchabfälle „vorrangig zur Wiederverwendung vorzubereiten oder dem Recycling zuzuführen“ [12].

### Schweiz

In der Schweiz wurde durch die Annahme der Revision des Energiegesetzes festgelegt, den Energieverbrauch in allen Sektoren deutlich zu senken [18]. Im Bauwesen gibt es daher neben Anreizen zur energetischen Sanierung anstelle des Ersatzneubaus [44] auch Bestrebungen, die graue Energie zu senken, welche bei Neubauten circa 25 % der Primärenergie des Lebenszyklus ausmacht [18]. Zeitgleich präsentierte der Bundesrat den Bericht „Maßnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz (Grüne Wirtschaft)“ [45], um eine ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftliche Nutzung der Rohstoffe zu implementieren.

#### 2.2.3. Zusammenfassung

In der Gesetzgebung auf nationaler Ebene ist zu erkennen, dass versucht wird, die, von der EU vorgegebene gesetzliche Implementierung einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen über Regelungen zur Abfallwirtschaft umzusetzen. Dies ist daran zu erkennen, dass die bisherigen Gesetze und Verordnungen größtenteils den Umgang mit dem Abbruch und den Abbruchabfällen regeln. Indem der Umgang mit dem Gebäude am Lebensende geregelt wird, können für Bauherren finanzielle Anreize bestehen, ein kreislauffähiges Gebäude zu errichten, da die zu erwartenden Rückbaukosten in Zukunft wahrscheinlich geringer ausfallen. Zudem greift der Gesetzgeber so nicht in die Entwicklung kreislauffähiger Bauweisen ein, die bisher erst am Anfang stehen und schwierig in gesetzliche Regelungen umzusetzen wären. Trotzdem existieren auch Normen, die die Umsetzung des kreislauffähigen Bauens skizzieren. Hier ist zum Beispiel die ISO 20887:2020 zu nennen, die auf den Prinzipien des „design for deconstruction and reuse“ (DfDR) und „design for adaptability“ (DfA) basiert [46]. Es zeigt sich, dass durch die Verschärfung des Umgangs mit Bauabfällen einerseits Regelungen und Verfahren entstehen, um den bisherigen, nicht kreislauffähigen Gebäudebestand recyclinggerecht rückzubauen, und andererseits als Reaktion darauf Konstruktionen entwickelt werden, die den Neubau kreislauffähig gestalten.

### 2.3. Wirtschaftliche Anreize des zirkulären Bauens

Die EU versucht die Umstellung zur Klimaneutralität nicht alleine durch Vorschriften, Verordnungen und Gesetzgebungen zu bewerkstelligen, parallel dazu sollen wirtschaftliche Anreize Investitionen in nachhaltige Projekte lenken.

#### 2.3.1. Lenken von Investitionsströmen

Wie bereits in 2.2.1 erläutert, ist die EU-Taxonomie-Verordnung der Versuch der Europäischen Union, Finanzströme in nachhaltige Produkte und Investments zu lenken [32]. Um Anlegern ein nachhaltiges Investment zu ermöglichen, werden in der Taxonomie-Verordnung klare Definitionen festgelegt, was als nachhaltig gilt. Zudem werden Unternehmen verpflichtet, sämtliche dafür relevanten Informationen offenzulegen [32]. Eines der festgelegten Nachhaltigkeitskriterien ist der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft. Um als nachhaltig zu gelten, muss eines der Ziele aktiv verfolgt werden. Zeitgleich darf keines der Ziele verletzt werden [32]. Somit dürfen Produkte, die sich nachhaltig bezeichnen wollen, dem Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft nicht entgegenwirken. Da der Holzbau als nachhaltig gilt, entsteht somit ein Investitionsvorteil. Um diesen Investitionsvorteil, der sich aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz ergibt, nicht zu verlieren, ist es notwendig, auch im Holzbau die notwendigen Schritte hin zu einer kreislauffähigen Bauweise zu unternehmen.

### 2.3.2. Gebäudezertifizierung

Eine Gebäudezertifizierung gilt mittlerweile als Grundvoraussetzung für institutionelle Investoren, um ein Gebäude zu kaufen. Im Zertifizierungsprozess wird bei diversen Anbietern inzwischen die Kreislauffähigkeit des Gebäudes bewertet. Die DGNB/ÖGNI hat ihr Zertifizierungssystem weiterentwickelt, um das zirkuläre Bauen zu fördern. Seit 2018 werden Circular Economy Boni angeboten, die verschiedene Gebäudetypen und Anwendungsbereiche abdecken und Kriterien für kreislauffähiges Bauen beinhalten. Diese Kriterien gehen über materielle und konstruktive Parameter hinaus und beinhalten auch Kriterien wie beispielsweise Umnutzungsfähigkeit [5]. Der Klimaaktiv-Kriterienkatalog wurde auch in Bezug auf zirkuläres Bauen angepasst und beinhaltet unter anderem die Entwicklung eines Rückbau- und Verwertungskonzepts bei der Planung des Gebäudes [5]. Ein solches Rückbaukonzept fordern auch andere Anbieter von Zertifizierungen [5].

### 2.3.3. Versorgungssicherheit

Die Rohstoffversorgung Europas ist besonders importabhängig [5]. Kreislauffähiges Bauen kann daher für eine Abnabelung von Rohstoffabhängigkeiten sorgen und eine gewisse Versorgungssicherheit darstellen. Selbst größtenteils aus Europa stammende, nachwachsende Rohstoffe wie beispielsweise Holz können von Versorgungsengpässen betroffen sein. Bei einer Befragung durch Schuster und Geier [24] von ausgewählten Baustoffherstellern und Baufirmen im Bereich Holzbau wurden die Beteiligten nach den Gründen ihres Interesses an einer kreislauffähigen Holzbauweise befragt. Sowohl die Baustoffhersteller als auch einige Baufirmen gaben dabei an, dass die Versorgungssicherheit mit dem Rohstoff Holz einen Treiber ihres Engagements im Bereich des kreislauffähigen Bauens mit Holz darstellt [24] sowie dass kürzlich erlebte Knappheiten von Rohstoffen das Interesse an der Wiederverwendung und dem Recycling des Werkstoffs verstärkt haben [24].

Um eine flächendeckende Versorgung mit wiederverwendeten Bauteilen, Bauteilelementen und Baustoffen zu erreichen, ist der Aufbau von Bauteilbörsen beziehungsweise Marktplätzen besonders wichtig. In der Schweiz existieren in mehreren Ballungsgebieten Bauteilbörsen, welche Baumaterialien aus abgerissenen Gebäuden anbieten [18]. Diese ausgewählten Bauteile sind häufig für den Innenausbau und noch in sehr beschränkter Auswahl vorhanden [18]. Die Plattform Madaster versucht in einer Online-Datenbank, in der alle Materialien der registrierten, gebauten Gebäude in Materialpässen dargestellt sind, eine möglichst genaue Darstellung der gebauten Umwelt zu liefern [18]. Das Ziel ist es, den Nutzern Informationen zu den Materialien in der anthropogenen Lagerstätte und deren Verfügbarkeit zu liefern [18]. So kann bei der Planung eines Projektes in Zukunft auf eine riesige Materialdatenbank zugegriffen werden und der Zugang zu in Frage kommenden Bauteilen und Bauteilelementen frühzeitig gesichert werden.

Die Stadt Wien hat 2020 die Ausschreibung für ein Konzept für einen europaweiten, wirtschaftlich selbsttragenden Marktplatz für wiederverwendbare Bauteile, Bauteilelemente und Baustoffe veröffentlicht [5]. Durch einen solchen Marktplatz würde die Verfügbarkeit wiederverwendbarer Bauteile enorm steigen. Neben Bauteilbörsen kommen auch Herstellerrücknahmen für wiederverwendbare Bauteile und Bauteilelemente sowie recyclebare Baustoffe in Frage [23].

### 3. Status Quo - technische und konstruktive Grundlagen des mehrgeschossigen Holzbaus

Das gesamte Feld des nachhaltigen Bauens ist ein Zusammenspiel unterschiedlicher Aspekte. Zunächst beschränkten sich die Nachhaltigkeitsbemühungen im Bauwesen darauf, die Nutzungsenergie der Gebäude zu senken und einen effizienten Betrieb zu ermöglichen [47]. Erst im Laufe der Zeit wurden Nachhaltigkeitsaspekte auch vermehrt bei der Wahl der Baustoffe betrachtet und mündeten in den 2000er Jahren in der Ökobilanzierung, welche neben der Verbrauchsenergie auch die in der Konstruktion gebundene graue Energie betrachtet [47]. Dabei haben sich als Schlüsselindikatoren der Ökobilanzierung der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial herausgebildet [47]. Da der Energiebedarf der Gebäude durch gesetzliche Anforderungen kontinuierlich reduziert werden konnte [9, 47] und Neubauten in der EU nun dem NZEB-Standard entsprechen müssen [8], nimmt der Anteil der in der Konstruktion gebundenen Energie im Vergleich zur Nutzungsenergie stetig zu. Heute reicht die im gesamten deutschen Gebäudebestand gespeicherte Energie für einen Betrieb desselben von 25 Jahren. Dieser Wert könnte bis zum Jahr 2050 auf etwa 50 Jahre steigen [47]. Um das Ziel des klimaneutralen Kontinents Europa bis 2050 zu erfüllen, müssen im Bauwesen nicht nur ein klimaneutraler Betrieb, sondern auch klimaneutrale Konstruktionen erreicht werden. Ein Ansatz, die graue Energie eines Gebäudes zu senken, ist die Materialwahl. Durch die Verwendung regional verfügbarer, nachwachsender Rohstoffe können der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial der Konstruktion gesenkt werden [47]. Hier bietet der Werkstoff Holz mit seiner Eigenschaft als Kohlenstoffsenke eine Option, die graue Energie im Hochbau zu verringern [10].

Der mehrgeschossige Holzbau ist eine vergleichsweise junge Bauweise, bei welcher ein Großteil der Entwicklungen innerhalb der letzten 15 bis 20 Jahre stattgefunden hat [48]. Der Holzbau ist nach den Erfahrungen mit Bränden im 2. Weltkrieg größtenteils aus den deutschen Städten verschwunden und hat in der Zeit des Wiederaufbaus hauptsächlich im ländlichen Raum in Form von Einfamilienhäusern und landwirtschaftlichen Hallen stattgefunden. Im städtischen Raum fand der Holzbau lediglich in Dachstühlen und im Ingenieurbau regelmäßig Anwendung [48]. Erst durch ein erstarktes Umweltbewusstsein mit einem Fokus auf die Umweltauswirkungen der Gebäudesubstanz und die dadurch initiierte Entwicklung mehrgeschossiger Holzgebäude seit Anfang der 2000er Jahre etablierte sich der moderne Holzbau im innerstädtischen Wohn- und Bürobau. Dies wurde unter anderem durch die Entwicklung neuer Produktionsmethoden und Holzwerkstoffe wie BSP ermöglicht [48]. Im Folgenden Unterkapitel werden die Grundprinzipien des modernen mehrgeschossigen Holzbaus erläutert.

#### 3.1. Rohstoffverfügbarkeit

Das Bauholz wird aus Bäumen gewonnen und in Sägewerken zu diversen Produkten weiterverarbeitet [49]. In Mitteleuropa sind entsprechend geeignete Wälder stets regional verfügbar [49]. Bei der Nutzung der Wälder ist jedoch auf eine nachhaltige Forstwirtschaft zu achten, da es sonst zu irreversiblen Schäden am Wald kommen kann [10, 49, 50]. Eine nachhaltige Forstwirtschaft bedeutet, dass die jährliche Entnahmemenge die jährlich nachwachsende Menge stets unterschreitet [10]. In Österreich und Deutschland schreiben das Forstgesetz (§1 Abs. 2 S. 3) beziehungsweise das Bundeswaldgesetz (§11 Abs. 1) eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder vor. In Ländern ohne entsprechende Forstgesetze

können Zertifizierungssysteme wie das Forest Stuarship Council (FSC) oder das Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC) die Nachhaltigkeit der Holzgewinnung nachweisen. Diese haben sich international weitestgehend durchgesetzt und werden auch in Ländern mit entsprechenden Forstgesetzen häufig zusätzlich angewendet [10]. Bauherren können über die Forderung bestimmter Umweltzertifikate in der Ausschreibung Einfluss auf die Umweltauswirkung der Rohstoffe nehmen [10]. Bisher kann in Mitteleuropa mit dem Prinzip der nachhaltigen Forstwirtschaft die Nachfrage nach Holz größtenteils deutlich gedeckt werden [10, 47], sodass sogar eine steigende Nachfrage nach Holzbau mit einer nachhaltigen, regionalen Forstwirtschaft möglich ist [47]. Durch klimawandelbedingte Anpassungen der Waldzusammensetzung steigt in Mitteleuropa der Anteil der Laubbäume, während der Anteil der für das Bauwesen relevanten Nadelhölzer sinkt [10]. Erhöhte Nachfragen und sinkende Nadelholzanteile können dazu führen, dass der Bedarf nicht mehr mit nachhaltiger Forstwirtschaft gedeckt werden kann [47]. Einerseits wird daher an der Verwendbarkeit von Laubhölzern im Bauwesen geforscht [10]. Andererseits muss die Wiederverwendbarkeit von Bauholz durch das Prinzip der Kreislaufwirtschaft im Holzbau verstärkt werden, um in Zukunft mit einer Kombination aus nachhaltiger Forstwirtschaft und Wiederverwendung und Recycling die Holznachfrage aus dem Bauwesen abzudecken. Dies erscheint umso wichtiger, da sich das Laubholz ökonomisch eher zum Schälen und Spanen eignet [10], und die daraus hergestellten Produkte wie Furnierschichthölzer, Sperrhölzer und Spanhölzer zwar deutlich bessere Festigkeitseigenschaften als Konstruktionsvollholz aufweisen [10], dafür aber durch den hohen Verarbeitungsgrad deutlich mehr nicht erneuerbare Primärenergie in der Herstellung benötigen [51].

### 3.2. Materialeigenschaften

Der Werkstoff Holz setzt sich aus den Bestandteilen Zellulose, Hemicellulose und Lignin zusammen. Die zelluläre Struktur bildet in Stammrichtung längliche Fasern mit Zellwänden aus Ligninschichten, die nur Druckkräfte aufnehmen, und von Fibrillen aus Zellulose und Hemicellulose umgeben sind, die Zugkräfte aufnehmen können [49]. Daraus folgt, dass Holz ein anisotropes Material ist [49, 50]. Im Vergleich zu seiner geringen Rohdichte ist Holz längs zur Faser sehr stark belastbar und kann hohe Druck- und Zugkräfte aufnehmen [49]. Im Vergleich dazu können Quer zur Faser deutlich geringere Druckkräfte und quasi keine Zugkräfte aufgenommen werden [49]. Die geringe Rohdichte sorgt einerseits für gute thermische Dämmeigenschaften, wodurch Wärmebrücken in der Konstruktion reduziert werden [49], andererseits treten durch das geringe Gewicht im Schallschutz und beim thermischen Komfort Probleme auf, die konstruktiv gelöst werden müssen [49]. Auch der Feuchteschutz kann heute fast immer konstruktiv gelöst werden, wodurch auf chemischen Holzschutz verzichtet werden kann [49]. Dies hat zur Folge, dass heute in Tragwerken größtenteils unbehandeltes Holz verbaut wird [49]. Die Schadstofffreiheit ist eine Grundvoraussetzung, Altholz wiederzuverwenden oder zu recyceln [52]. Trockenes Holz kann mehrere Hundert Jahre als Tragwerk dienen [53]. Dabei stellen temporäre, oberflächliche Feuchteinträge kein Problem dar, solange die Möglichkeit zur Rücktrocknung besteht [53]. Da es sich bei Holz um einen brennbaren Konstruktionsstoff handelt, welcher im Brandfall selbst zur Brandlast wird, muss besonders im mehrgeschossigen Bauen ein Augenmerk auf den Brandschutz gelegt werden [53]. Holz weist ein langsames Abbrandverhalten auf, da die entstehende Holzkohleschicht den unverbrannten Kern vor Hitze schützt [53]. Die Dauer der Tragfähigkeit eines Holzquerschnittes im Brandfall ist gut vorhersehbar und kann durch Brandschutzbekleidungen verlängert werden [53]. Mit einem entsprechenden Brandschutzkonzept können

mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise auf demselben Sicherheitsniveau wie mineralische Gebäude errichtet werden [53]. Der Werkstoff Holz weist eine hohe Behaglichkeit und angenehme Haptik auf [49]. Dadurch können Sichtoberflächen im Gebäude realisiert werden. So kann im Sinne der sortenreinen Trennbarkeit auf Anstriche oder Verputz verzichtet werden, was die Wiederverwendbarkeit oder Recyclebarkeit vereinfacht.

### 3.3. Konstruktionsmethoden

Im folgenden Abschnitt werden tragende und aussteifende Holzbaulemente sowie Konstruktionsmethoden im Holzbau vorgestellt.

#### 3.3.1. Definition Bauelement und Bauteil

Der mehrgeschossige Holzbau besteht größtenteils aus Bauelementen. Das sind vorgefertigte Bestandteile eines Bauteils, zum Beispiel Holztafelemente. Diese werden auf der Baustelle zusammengefügt und bilden nach der Fertigstellung durch den Innenausbau ein Bauteil, also einen statisch-konstruktiven, geometrisch abgeschlossenen Bauwerksteil [54, 55]. Im Fall der Holztafelemente bilden diese beispielsweise eine Außenwand.

#### 3.3.2. Linienförmige Bauelemente

Stützen und Träger beziehungsweise Balkenlagen können als stabförmige Bauelemente im Tragwerk verwendet werden. Die technische Bearbeitung und Materialwahl der stabförmigen Bauelemente bietet unterschiedliche Stellschrauben, um das Bauelement an die abzutragende Last anzupassen. Durch Keilzinken können linienförmige Bauelemente beliebiger Länge hergestellt und die Inhomogenitäten des Holzes verringert werden [56]. Durch das Schichten mehrerer Balken-, Brett- oder Furnierlagen mit paralleler Faserrichtung können mit Duo- und Triobalken, Brettschichtholz (BSH) oder Furnierschichtholz (LVL) große Querschnittshöhen und hoch belastbare, weit spannbare, stabförmige Bauelemente hergestellt werden [56]. Durch zusammengesetzte T-Träger mit Ober- und Untergurten aus Vollholz, BSH oder LVL und einem Steg aus Grobspanplatten (OSB) oder harten Faserplatten lassen sich besonders leichte und schlanke Bauelemente herstellen [56].

#### 3.3.3. Flächige Bauelemente

Aus den stabförmigen Bauelementen können im Holzbau flächige Bauelemente entwickelt werden. Dabei wird zwischen Massivbau- und Leichtbauelementen unterschieden. Dem Massivbau werden zum einen Brettstapelelemente zugeordnet. Diese bestehen aus aneinandergereihten, stabförmigen Bauelementen, diese werden meist durch Dübel oder Verklebungen verbunden [54]. Sofern sie mit einem flächig aufgetragenen Plattenwerkstoff kombiniert werden, können Brettstapelelemente als Scheibe oder Platte beansprucht werden [54]. Andernfalls wirken sie statisch wie aneinandergereihte Stäbe [54]. Zum anderen zählen BSP- und LVL-Platten zum Massivbau [54]. Durch schichtweise Verklebung der Brett- oder Furnierlagen mit zueinander senkrechter Faserrichtung entstehen Brett- und Furniersperrholz, welche aufgrund der kreuzweisen Verklebung auch weniger anisotrope Trageigenschaften aufweisen [54]. Leichtbauelemente bestehen im Holzbau aus einem lastabtragenden Stabwerk sowie einer flächig aufgetragenen Beplankung mit abschließenden Querhölzern oben (Rähm) und unten (Schwelle) [54]. Durch die Verbundwirkung zwischen Stabwerk und Beplankung entstehen Tafelbau- oder Kastenelemente, welche als Scheibe oder Platte beansprucht werden können [54].

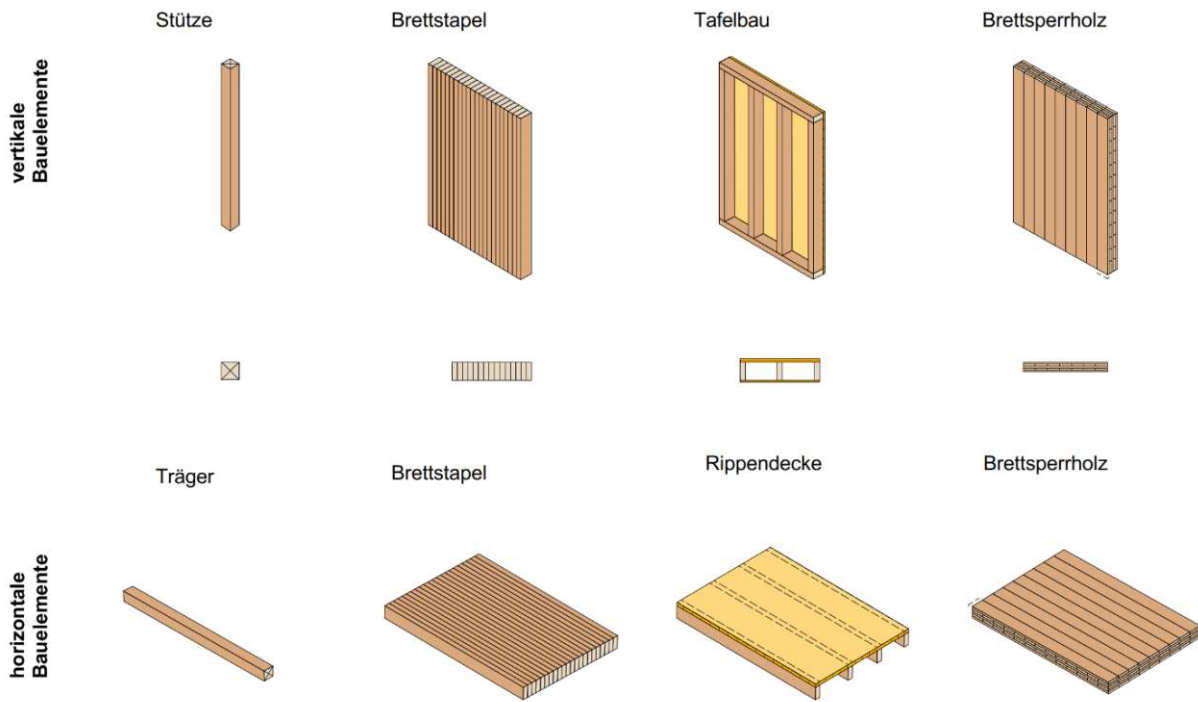


Abbildung 3-1: Vertikale und horizontale Bauelemente aus Holz (Eigene Darstellung nach [57])

#### 3.3.4. Skelettbau

Aus der Kombination stabförmigen Bauelemente ergibt sich der Skelettbau mit horizontalen Trägern und vertikalen Stützen [54]. Durch die Verwendung hochverarbeiteter Träger und Stützen aus BSH oder LVL lassen sich große Spannweiten erzielen [18]. Die Aussteifung erfolgt über Auskreuzungen oder Zug- und Druckstreben zwischen den Stützen [54]. Durch die Bauweise entstehen große zusammenhängende Innenflächen, die durch nicht tragende Innenwände flexibel gestaltet werden können [18]. Auch bei der Gestaltung der Fassade ergeben sich große Freiheiten und Anpassungsmöglichkeiten. Neben vorgehängte Holzfassaden können auch Glasfassaden realisiert werden [18]. Der Vorfertigungsgrad kann erheblich variieren. Bei der Deckenmontage kommen neben einzelnen Trägern auch Fertigteile in Form von Rippendecken zum Einsatz [18]. Die vom Tragwerk entkoppelten Innenwände und Fassaden werden entweder auf der Baustelle erstellt oder als nicht tragende Fertigteile geliefert [18, 54, 57]. Der Holzskelettbau ist eine besonders leichte Bauweise mit einem besonders geringen Materialeinsatz in der Tragstruktur.

#### 3.3.5. Holztafelbau

Der Holztafelbau besteht in der vertikalen Ebene aus Tafелеlementen. Während das Stabwerk und die Bepunktung die Lasten abtragen, können die Gefache zwischen den Ständern als Dämmebene genutzt werden [18]. Die Schwachstelle beim Bauen mit Holztafelbauelementen sind die Querhölzer der einzelnen Elemente, da diese Querdruck aufnehmen müssen [55]. Mit auf Querdruck belasteten Schwelle und Rähm lässt sich daher i.d.R. nicht über fünf Geschosse bauen [54]. Für höhere Lastanforderungen an Holztafelbauelemente können Schwelle und Rähm aus LVL mit Hirnholzanteil, aus Laubholz oder mit durchgesteckten Ständern ausgeführt werden [54]. Wandelemente in Tafelbauweise können mit einem sehr hohen Vorfertigungsgrad produziert werden [18]. Die Außenwände werden oft mit vorgefertigten Fassadenoberflächen sowie Fenstern und Türen geliefert, während bei Innenwänden in der Regel nur noch Verspachteln und Anstreichen erforderlich sind. Die Decke besteht dabei entweder aus Rippen- oder Hohlkastenelementen oder aus Vollholzelementen [18]. Der



Tafelbau ermöglicht aufgrund des hohen Vorfertigungsgrads kurze Bauzeiten. Zudem kann ein hoher Wärmeschutz bei vergleichsweise geringen Wandstärken und effizientem Materialeinsatz erreicht werden [55].

### 3.3.6. Massivholzbau

Im Massivholzbau wird das Tragsystem aus Massivholzbauteilen errichtet. Die Wände und Decken bestehen aus verdübelten Brettstapelelementen oder großformatigen Plattenwerkstoffen wie BSP. In Ausnahmefällen können Platten aus Furniersperrholz verwendet werden [54]. Massivbauelemente weisen eine besonders hohe Tragfähigkeit auf und mit Ausnahme gedübelter Brettstapelelemente haben sie auch eine hohe Steifigkeit [55]. Die Massivholzbauweise ist gegenüber der Leichtbauweise durch den deutlich höheren Materialeinsatz weniger ressourceneffizient. Gleichzeitig steigt durch den hohen Materialeinsatz jedoch die im Gebäude gespeicherte Menge an CO<sub>2</sub> [55]. Die Massivbauweise hat gegenüber der Leichtbauweise Vorteile im Brand- und Schallschutz [53]. Öffnungen für Türen und Fenster werden im Werk aus den Massivholzelementen ausgeschnitten [18]. Auch Massivholzelemente können mit einem hohen Vorfertigungsgrad hergestellt werden. Es können werkseitig bereits Kabelkanäle gefräst, Brandschutzbekleidungen und Dämmung aufgebracht sowie Fenster und Türen eingebaut werden. Außenwände in Massivbauweise erfordern eine dickere Wandstärke als Tafelbauwände, da die Dämmebene außerhalb der Tragwerksebene aufgebracht wird.

### 3.3.7. Holz-Hybrid-Bauweise

Mehrgeschossige Holzgebäude werden selten ausschließlich mit einer einzigen Konstruktionsmethoden errichtet, da die hoch komplexen Anforderungen kaum mehr in einer konsistenten Konstruktionsart ausführbar sind [54]. Die unterschiedlichen Bauelemente werden zu einer Mischkonstruktion kombiniert, in der jedes Bauelement möglichst entsprechend seiner Stärken eingesetzt wird [55]. Beispielsweise eignen sich Bauelemente in Tafelbauweise aufgrund des guten Wärmeschutzes besonders gut für Außenwände, während Massivholzelemente hohe Tragfähigkeiten und Scheibenwirkungen aufweisen [55]. Neben dem Mischen der Konstruktionsarten kommen in der Praxis im mehrgeschossigen Holzbau in den meisten Fällen Materialkombinationen zum Einsatz [54]. Die Materialkombinationen mit Stahl oder Beton können auf unterschiedlichen Ebenen stattfinden. Durch die Materialkombination innerhalb eines Bauelements entstehen Hybridbauteile wie beispielsweise die häufig verwendeten Holz-Beton-Verbunddecken [54]. Bei der Materialkombination auf Gebäudeebene spricht man von einem Hybridbauwerk [54]. Dabei werden Konstruktionen aus verschiedenen Materialien kombiniert [54]. Unabhängig vom Material der Bauweise der Obergeschosse werden die Kellergeschosse und die Bodenplatte nahezu immer aus Stahlbeton ausgeführt [57]. Im mehrgeschossigen Holzbau wird das Erdgeschoss aus Gründen des Feuchteschutzes häufig in Stahlbetonbauweise ausgeführt [54]. Diese Maßnahmen haben Vorteile im Brandschutz und bei der Gebäudeaussteifung [54]. Bei einem Stahlbetonskelettbau können die Fassadenelemente häufig in Holztafelbauelementen ausgeführt werden [54]. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird nicht mehr explizit zwischen Holzbau und Holzhybridbau unterschieden.

### 3.3.8. Aussteifung

Bei geringen Gebäudehöhen reicht die Scheibenwirkung von Holztafelbauelementen oder gedübelten Brettstapelelementen aus, um das Gebäude auszusteifen. Ab circa vier

oberirdischen Geschossen in Holzbauweise genügt die Scheibenwirkung dieser Bauelemente häufig nicht mehr [54]. Bei höheren Holzgebäuden können Wandelemente, die der Gebäudeaussteifung dienen, aus BSP konstruiert werden, da diese eine ausreichende Scheibenwirkung aufweisen [54]. Weiterhin lassen sich auch die Erschließungskerne des Gebäudes in Massivbauweise ausführen und können zur Aussteifung des Gebäudes herangezogen werden [54]. Ein Holzskelettbau lässt sich auch durch Auskreuzungen einzelner Felder aussteifen.

### 3.4. Gebäude- und Bauteilschichten im Holzbau

Moderne Gebäude sind keine monolithischen Bauwerke, sondern ein Zusammenspiel unterschiedlicher funktionaler Einheiten. Diese Einheiten können auch als Schichten verstanden werden, wobei jede dieser funktionalen Schichten eine Aufgabe im Gebäude übernimmt [18]. Diese funktionalen Schichten sind ein theoretisches Konzept. Neben den theoretischen, funktionalen Schichten auf der Gebäudeebene sind auf der Bauteilebene eines Holzgebäudes zumeist mehrere Bauteilschichten erkennbar [58]. In den folgenden Unterpunkten werden das Konzept der Scherschichten sowie dem Stand der Technik der Schichtaufbauten für die Gebäudehülle und Innenbauteile im Holzbau erläutert.

#### 3.4.1. Scherschichten

Das Konzept der Scherschichten beschreibt ein Gebäude als Aufbau aus verschiedenen funktionalen Schichten mit unterschiedlichen Lebensdauern [18]. Die funktionalen Gebäudeschichten sind:

- (1) Das Grundstück (Site) ist die geografische und städtische Lage des Grundstücks und existiert unabhängig vom Gebäude, es wird daher ohne Lebensdauer aufgeführt [18].
- (2) Das Tragwerk (Structure) ist die langlebigste Gebäudeschicht mit einer Lebensdauer zwischen 30 und 300 Jahren. Sie ist am aufwändigsten zu ändern und soll möglichst in ihrer Ursprungsform erhalten bleiben [18].
- (3) Die Gebäudehülle (Skin) muss nach circa 30 bis 50 Jahren getauscht werden. Sie beinhaltet unter anderem Regen- und Winddichtigkeit sowie Wärmeschutz [18].
- (4) Die Haustechnik (Services) umfasst die Gebäudetechnik und wird abhängig von der Komponente alle 7 bis 30 Jahren ausgetauscht [18, 59].
- (5) Der Innenausbau (Space Plan) beinhaltet nicht tragende Innenwände, Wand- und Bodenbeläge sowie Türen. Je nach Nutzung des Gebäudes hat der Raum sehr unterschiedliche Lebensdauern. Während sich Büroräume oft nach wenigen Jahren ändern, können zum Wohnen genutzte Räumlichkeiten auch bis über 30 Jahre genutzt werden [18].
- (6) Das Mobiliar (Stuff) ist die kurzlebigste Gebäudeschicht, ist aber meistens auch nicht fest im Gebäude verbaut und daher beweglich [18].

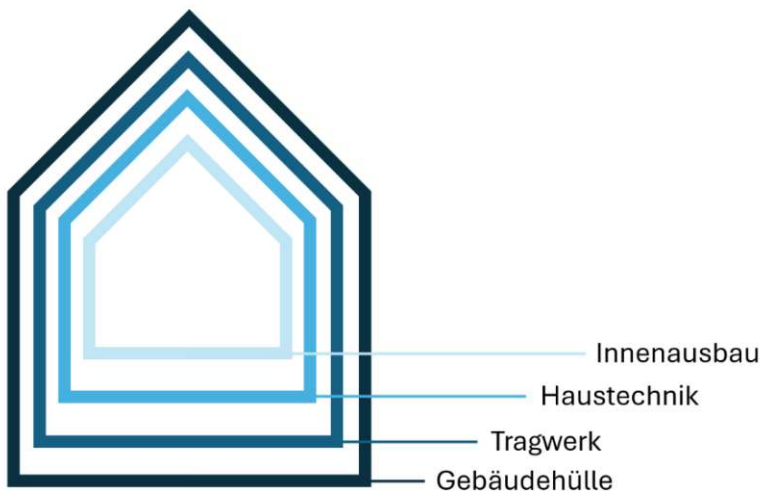


Abbildung 3-2: Scherschichten (Eigene Darstellung nach [5])

Die für die vorliegende Arbeit relevanten Scherschichten sind die Schichten (2) bis (5) und sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Das Konzept der Scherschichten ist auf Gebäudeebene für die Kreislaufwirtschaftlichkeit besonders wichtig, da die maximale Gebäudelebensdauer (Long-Use) nur erreicht werden kann, wenn die Scherschichten regelmäßig und entsprechend ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden können [5, 18]. Gebäude müssen dementsprechend mit trennbaren Schichten geplant werden. So können ein reibungsloser Austausch und ein schadensfreier Rückbau erfolgen [5]. Im Holzbau ist eine konkrete Trennung der Scherschichten häufig nicht möglich. Einerseits liegen Scherschichten teilweise räumlich in derselben Bauteilschicht, wie beispielsweise beim Tragwerk und der Dämmung im Holztafelbau der Fall [58]. Andererseits erfüllen manche Bauteilschichten innerhalb eines Bauteils gleichzeitig die Aufgaben mehrerer Scherschichten, wie eine OSB-Beplankung eines Holztafelbauelements. Diese dient dem Tragwerk als aussteifendes Element, während sie in der Gebäudehülle als Luftdichtung und Dampfbremse dient [58]. In den beiden folgenden Unterkapiteln werden die klassischen Schichtaufbauten von Bauteilen im mehrgeschossigen Holzbau erläutert.

#### 3.4.2. Schichtenaufbau der Gebäudehülle in Holzbauweise

Die Gebäudehülle besteht aus den Außenwänden und dem Dach des Gebäudes. Nach dem Konzept der Scherschichten muss die Gebäudehülle bestimmte Schutzfunktionen erfüllen. Diese umfassen den Witterungsschutz, Luftdichtheit, Wärme-, Tauwasser-, Brand- und Schallschutz [18, 58]. Zusätzlich zu den Schutzfunktionen der Gebäudehülle können weitere Funktionen aus anderen Scherschichten in die Gebäudehülle integriert werden. Die Außenhülle kann tragend ausgeführt werden und somit Teile des Tragwerks beinhalten. Teilweise werden Teile der Haustechnik in einer Installationsebene der Außenwand integriert. Darüber hinaus ist die Außenwand durch ihre innere Oberfläche auch immer Bestandteil des Innenausbaus [58].

#### *Funktionsschichten*

Die verschiedenen Schutzfunktionen werden jeweils von einer Funktionsschicht ausgeführt [58]. Im Bauteil können diese Funktionen immer einer Bauteilschicht oder einem Material zugeordnet werden [58]. Die Zuordnung erfolgt nicht immer linear, da eine Bauteilschicht

mehrere Funktionen übernehmen kann. Eine BSP-Schicht kann dabei als Tragschicht, Luftdichtheitsebene, Dampfbremse sowie innere Bekleidung dienen [58].

#### *Außenwandaufbauten in Tafelbauweise*

Grundsätzlich besteht sowohl für die Außenwand- als auch für die Dachkonstruktion die Möglichkeit, die statisch wirksame Schicht der Bauteile aus Bauelementen in Leicht- oder Massivbauweise auszuführen. Bei der Leichtbauweise wird ein Tafelbauelement für die Tragschicht des Bauteils verwendet [58]. Außenwände in Leichtbauweise lassen sich als Bestandteil der Tragstruktur des Gebäudes (tragend) oder als reine Fassadenelemente (nicht-tragend) ausführen [58].

Die tragende Schicht wird im Tafelbau beidseitig mit Brandschutzbekleidungen aus ein- oder zweilagigen Gipskartonfeuerschutz- oder Gipsfaserplatten geschützt. Diese sind notwendig, um die Anforderungen an den Feuerwiderstand in den Gebäudeklassen 4 und 5 zu erfüllen [58]. Darüber hinaus können die Brandschutzbekleidungen die Funktion der Aussteifung des Tafelelements übernehmen [55]. In den Zwischenräumen des Tafelelements wird für gewöhnlich die Wärmedämmung eingebracht, wodurch die Wandstärke im Vergleich zu anderen Bauweisen geringer ausfällt [58]. Im Holztafelbau wird im Regelfall ab einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten auf biogene Dämmstoffe verzichtet und auf Mineralwolle zurückgegriffen [60].

Innenseitig muss die Wandkonstruktion die Schutzfunktionen „Luftdichtheit“ und „Taufwasserschutz“ erfüllen. Dies kann einerseits durch die Kombination einer Dampfbremse mit darüber angebrachter luftdichter Brandschutzbekleidung oder durch die Kombination einer luftdichten und dampfbremsenden Holzwerkstoffplatte erfolgen [58]. Bei der Leitungsführung in der Außenwand ist zu beachten, dass die luftdichte Ebene nicht unterbrochen wird. Raumseitig der Luftdichtung kann eine Installationsebene zur Leitungsführung angebracht werden [57]. Durchbricht die Leitungsführung die luftdichte Ebene, werden Reparaturen oder Umbauten an den Leitungen komplex und teuer [61].

Nach außen muss das Bauteil den Witterungsschutz sowie die Winddichtheit und insbesondere Schlagregendichtheit erfüllen [58]. Dazu kann ein Putzsystem bestehend aus Wärmedämmverbund-System (WDV-System) und Außenputz auf die äußere Brandschutzbekleidung aufgebracht werden, dieses erfüllt alle der genannten Anforderungen [58]. Die Außenseite kann ebenfalls mit einer hinterlüfteten Fassade ausgeführt werden. Dabei erfüllt diese den Witterungsschutz. Während die Winddichtung und zweite wasserführende Schicht mit einer diffusionsoffenen Folie oder Holzwerkstoffplatte ausgeführt werden können [58].

#### *Außenwandaufbauten in Massivholzbauweise*

Außenwände in Massivholzbauweise sind in die Tragstruktur des Gebäudes integriert. Innerhalb des Bauteils erfüllt ein Brettstapel-, Blockbau- oder BSP-Element die Funktion der tragenden Schicht und Aussteifung [58]. Zusätzlich können die Bauelemente aus Massivholz bei entsprechender Verklebung die Funktion der dampfbremsenden Schicht übernehmen [58].

Innen- und außenseitig der tragenden Schicht werden Brandschutzbekleidungen analog zum Holztafelbau angebracht. Wenn auf der Innenseite explizit Sichtholzoberflächen gefordert werden, kann das BSP-Element auf Abbrand berechnet und ohne Brandschutzbekleidung ausgeführt werden [58]. Die Leitungsführung in Außenwänden in Massivholzbauweise kann raumseitig in einer Installationsebene oder in gefrästen Kanälen in der tragende Massivholzschiicht erfolgen [61].

Außenseitig der Tragschicht folgen die äußere Brandschutzbekleidung und die Wärmedämmung. Wärmedämmverbundsysteme können auf der Brandschutzbekleidung vollflächig aufgebracht werden [58]. Um weiche Wärmedämmung zu verwenden, wird auf dem Massivholzelement ein Holzständerwerk aufgebracht und die Zwischenräume mit Wärmedämmung ausgefacht [58]. Ein WDV-System übernimmt in Verbindung mit dem Außenputz die Funktionen des Witterungsschutzes, der Winddichtheit und der Wasserdichtheit [58]. Bei einer aufgetragenen Gefachdämmung in Kombination mit einer hinterlüfteten Fassade werden die Winddichtung sowie die zweite wasserführende Schicht entweder von einer diffusionsoffenen Folie oder einer Holzwerkstoffplatte hergestellt [58]. Die beschriebenen Aufbauten in Leicht- und Massivholzbauweise sind typische Aufbauten. Durch spezielle Anforderungen an jedes Objekt und unterschiedliche Projektbeteiligte entsteht in der Praxis eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauteilaufbauten.

### *Flachdachaufbauten*

Dachkonstruktionen werden zum einen nach der Lage der Dämmebene und zum anderen durch das Vorhandensein einer Hinterlüftung unterschieden. Dächer können außen gedämmt in Massivholz- und Leichtbauweise ausgeführt werden, während zwischengedämmte Konstruktionen nur in Leichtbauweise mit Rippen- oder Hohlkastendächern möglich sind [58]. Die Hinterlüftung bietet durch eine zweite wasserführende Ebene mehr Sicherheit gegen Wassereindringen von außen [58]. Wie bei der hinterlüfteten Fassade ist die zweite wasserführende Ebene meist diffusionsoffen. Dies ermöglicht eine Rücktrocknung der Dämmung nach außen [58]. Aufgrund der weniger aufwändigen Konstruktion werden im mehrgeschossigen Holzbau größtenteils nicht hinterlüftete Dachkonstruktionen verwendet [58]. Innenseitig befindet sich die Tragwerksebene. Auf dieser werden die Dampfbremse und Luftdichtung aufgebracht. Im Bauzustand dient diese auch als vorübergehender Witterungsschutz [58]. Darüber erfolgt die Montage der Wärme- und Gefälledämmung mit einer Abdichtungsebene vor Wassereintrag von außen [58].

#### 3.4.3. Schichtenaufbau der Innenbauteile in Holzbauweise

An die Innenbauteile werden deutlich weniger Schutzanforderungen gestellt als an die Gebäudehülle. Wohnungstrennwände müssen den Brandschutz, den Schallschutz und die Luftdichtheit gewährleisten, während innerhalb einer Wohneinheit die Anforderungen noch einmal geringer ausfallen [62]. Innenwände können tragend, aussteifend oder nicht tragend ausgeführt werden. Decken sind stets tragende Bauteile.

### *Innenwandaufbauten*

Innenwände bestehen aus einer Tragschicht in Massiv- oder Tafelbauweise und direkt und federnd befestigten sowie frei vorgestellten Bekleidungen, durch deren Aufbau sich alle Brand- und Schallschutzanforderungen erfüllen lassen [62]. Aufgrund erhöhter Schallschutzanforderungen werden Trennwände zwischen Nutzungseinheiten häufig zweischalig als vollständig entkoppelte Doppelwände ausgeführt [62]. Insbesondere massive Innenwände können sonst die Anforderungen an den Schallschutz nicht erfüllen [62]. Trennwände zwischen Gebäuden werden aus statischen, schallschutztechnischen und brandschutztechnischen Gründen grundsätzlich zweischalig ausgeführt [62].

Nichttragende Holztafelbau-Innenwände ohne Brandschutzanforderungen können den Hohlraum im Wandinneren zur Verlegung von Installationsleitungen nutzen [62]. Treten jedoch Brandschutzanforderungen auf, muss die tragende Bauteilschicht beidseitig mit Brandschutzbekleidung geschlossen werden. Die Leitungsführung innerhalb der

Brandschutzbekleidung ist möglich, aufgrund der notwendigen Durchbrechungen der Bekleidung jedoch komplexer als bei Wänden ohne Brandschutzanforderung [62]. Bei Wänden mit Brandschutzanforderungen sind zur Leitungsführung vorgesetzte Installationsebenen zu bevorzugen. Raumseitig der Brandschutzbekleidung kann für tragende Innenwände in Tafelbauweise eine zusätzliche Ebene zur Leitungsführung installiert werden [62]. Bei Massivholzwänden können die Leitungen entweder direkt in die tragende Massivholzschicht eingefräst, oder in einer Installationsebene vor der tragenden Schicht geführt werden [62].

### *Deckenaufbauten*

Aufgrund der Anforderungen an den Tritt- und Luftschall sind Deckenaufbauten in Holzbauweise deutlich komplexer als Innenwandaufbauten [62]. Die Tragstruktur hat große Auswirkungen auf den weiteren Deckenaufbau, der notwendig ist, um Schall- und Brandschutzanforderungen zu erfüllen [62]. Die Deckenbekleidung stellt auf der Unterseite die sichtbare Oberfläche dar und hat maßgeblichen Einfluss auf die Raumakustik [62]. In die Hohlräume geschlossener Holzbalkendecken und Hohlkastendecken können Schüttungen oder Dämmungen zur Verbesserung der Schalldämmung eingebracht werden [62]. Diese Ebene kann zusätzlich zur Leitungsführung verwendet werden [62].

Über der Tragstruktur liegt die Luftdichtung und verhindert das Ausbreiten von Rauchgas im Brandfall. Zusätzlich verhindert sie als Rieselschutz, dass sich Teile der Schüttung setzen oder in den Hohlraum gelangen [62]. Tragstrukturen mit BSP-Elementen, seitlich verklebten Brettstapelelementen und mit Holzwerkstoffplatten bekleidete Brettstapeldecken mit verklebten Plattenstößen benötigen keinen Rieselschutz, da die Tragkonstruktion selbst ausreichend luftdicht ist [62]. Darüber wird eine Ausgleichsschüttung aufgebracht, um die Bauteilmasse zu erhöhen. Die Schüttung sollte aus Schallschutzgründen aber auch im Sinne der Trennbarkeit ungebunden erfolgen [62]. Statt Schüttungen können auch Platten aus Beton oder Lehm zur Erhöhung der Bauteilmasse verwendet werden [62]. Über der Schütteebene wird die Trittschalldämmung mit dem Estrich verlegt. Der Estrich erfüllt sowohl als Nass- als auch als Trockenestrich alle geforderten Brandschutzanforderungen, allerdings hat der Nassestrich im Schallschutz aufgrund des Gewichts Vorteile [62]. Dagegen bestehen bei trocken verlegten Estrichelementen Vorteile beim Rückbau.

### 3.5. Verbindungsmittel im mehrgeschossigen Holzbau

Ist ein Gebäude errichtet, so sind die obersten Ziele der Kreislaufwirtschaft eine lange Lebensdauer (Long-Use) und im Falle des Rückbaus Wiederverwendung (Re-Use). Beide Ziele sind maßgeblich von der Wahl des Verbindungsmittels abhängig. Im folgenden Kapitel werden gängige Verbindungsmittel und Fügemethoden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Trennbarkeit und Rückbaubarkeit bewertet.

#### 3.5.1. Lösbarkeit gängiger Fügemethoden im Holzbau

Schwede und Störl [63] haben Fügemethoden nach DIN 8580 [64] hinsichtlich ihrer Lösbarkeit bewertet (siehe Tabelle 3-1). In Abbildung 3-3 ist eine Übersicht der gängigen Verbindungstechniken im Holzbau dargestellt. Der Großteil der zimmermannsmäßigen Verbindungstechniken wird über Zusammensetzen gefügt und lässt sich ohne Schädigung der Fügeelemente lösen [63]. Bei ingenieurmäßigen Verbindungen werden die Fügeelemente größtenteils durch An- und Einpressen verbunden, wobei die Lösbarkeit je nach Verbindungsmittel stark variieren kann. Während sich Schraubverbindungen im Allgemeinen wieder ohne Schädigung lösen lassen, können Nagel-, Klammer- oder Stiftverbindungen im Allgemeinen nur mit Schädigung der Fügeelemente gelöst werden (siehe Tabelle 3-1) [63]. Auch

geklebte Verbindungen oder Beschichtungen lassen sich zumeist nicht ohne Beschädigung oder Zerstörung der gefügten Teile lösen [63].

Tabelle 3-1: Bewertung der Lösbarkeit von ausgewählten Fügemethoden nach [63] (SK: Schwerkraft, FS: Formschluss, KS: Kraftschluss, FK: Federkraft, AD: Adhäsion), (1: ohne Schädigung lösbar, 2: im Allgemeinen ohne Schädigung oder Zerstörung lösbar, 3: im Allgemeinen mit, teils jedoch auch ohne Schädigung oder Zerstörung lösbar, 4: im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung lösbar, 5: nur durch Schädigung oder Zerstörung lösbar)

	Fügemethode	Fügeprinzip	Bewertung
<b>4.1</b>	<b>Zusammensetzen</b>		
4.1.1	Auflegen, Aufsetzen, Schichten	SK, FS	1
4.1.2	Einlegen, Einsetzen	SK	1
4.1.4	Einhängen	SK, FK	1
<b>4.3</b>	<b>An- und Einpressen</b>		
4.3.1	Schrauben	KS	2
4.3.4	Fügen durch Presspassung	KS	3
4.3.5	Nageln, Verstiften, Einschlagen	KS	4
<b>4.4</b>	<b>Fügen durch Urformen</b>		
4.4.1	Ausgießen	FS	4
<b>4.8</b>	<b>Kleben</b>		
4.8.2	Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen	AD	4
<b>5.1</b>	<b>Beschichten</b>		
5.1.2	Anstreichen, Lackieren	AD	5
5.1.4	Putzen, Verputzen	AD	5

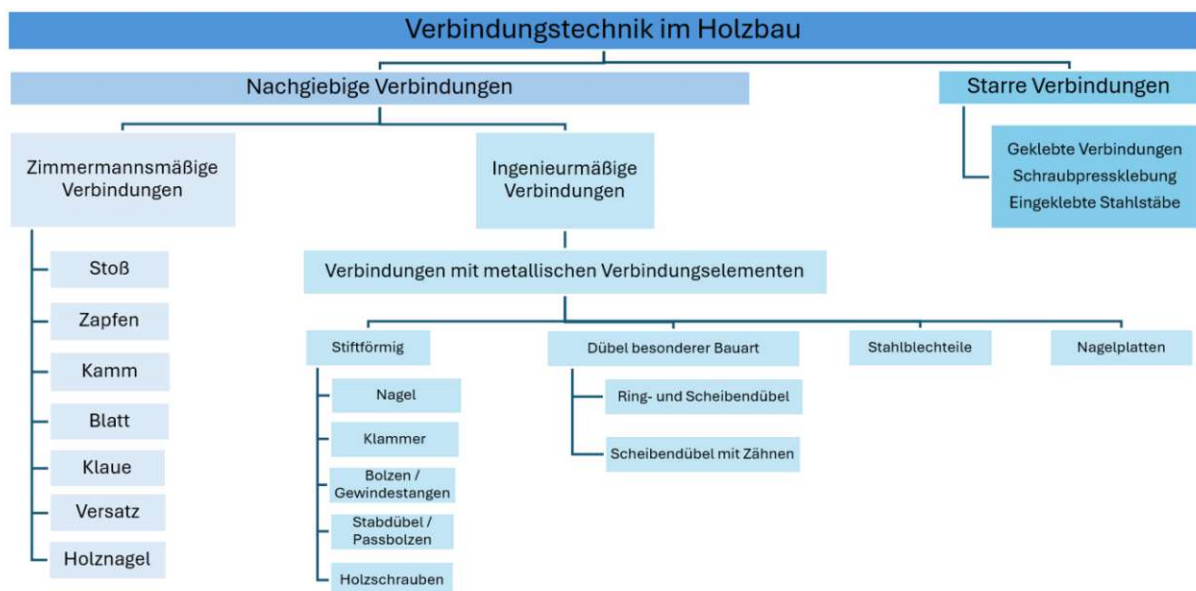


Abbildung 3-3: Verbindungstechniken im Holzbau (Eigene Darstellung nach [65])

### 3.5.2. Demontierbarkeit auf Gebäudeebene

Um nach dem Rückbau die Wiederverwendung von Bauteilen oder Bauteilkomponenten zu gewährleisten, muss das Gebäude schadensfrei rückbaubar sein. Die Rückbaubarkeit auf Gebäudeebene wird auch als Demontage bezeichnet. Ob der Rückbau des Gebäudes in wiederverwendbare Bauteilkomponenten möglich ist, liegt zum einen an den statischen Verbindungsmitteln zwischen den Bauteilen und zum anderen an der Fugenausbildung,

welche die Kontinuität der funktionalen Schichten in den Bauteilstößen gewährleisten muss. Im folgenden Kapitel werden Verbindungs- und Fügemethoden zwischen benachbarten Bauelementen und Bauteilen vorgestellt.

### *Stützenknoten*

Im Skelettbau kommen hauptsächlich Knotenpunkte vor. Zur Fügung der Knoten eignen sich neben zimmermannsmäßigen Verbindungen auch sämtliche ingenieurmäßigen Verbindungsmittel. Wobei häufig Stahlblechteile in Kombination mit Bolzen, Gewindestangen, Stabdübeln oder Passbolzen zum Einsatz kommen. Aufgrund des breiten Spektrums an möglichen Verbindungen können hierzu keine pauschalen Aussagen zur Lösbarkeit von Stützenknoten getätigt werden. Dennoch bieten Stützenknoten die Möglichkeit, mit gängigen Verbindungsmitteln lösbar ausgeführt zu werden.

### *Fügung im Wand-Wand- und Decken-Decken-Anschluss*

Benachbarte Wandelemente eines Bauteils oder Stöße zwischen Außen- und Innenwand werden in der Regel durch kreuzweise Verschraubung der tragenden Schicht im Wandstoß miteinander verbunden. Benachbarte Deckenelemente werden teilweise stumpf gestoßen und verschraubt. Durch Überblattung oder Verbindung über ein oberseitiges Holzwerkstoffbrett können Deckenscheiben hergestellt werden [55], wobei eine Momentenübertragung nur bedingt möglich ist. Der Elementstoß mit oberseitigem Brett kann mit Schrauben, Klammern oder Nägeln erzeugt werden.

Die Herstellung der Durchgängigkeit der außenseitigen Winddichtung sowie der innenseitigen Luftdichtung und Dampfbremse erfolgt bei Wandelementen durch Verkleben der Bekleidungs- oder Folienstöße mit geeignetem Klebeband oder durch ein Quellfugenband in der Fuge [58]. Die Luftdichtung von Deckenbauteilen wird entweder vollflächig auf der tragenden Schicht durch den Rieselschutz beziehungsweise OSB-Platten oder durch Verklebung der Stöße bereits luftdichter Deckenelemente hergestellt [62].

### *Fügung im Wandanschluss*

Bei der Holztafel- oder Massivholzbauweise mit tragenden Wänden werden im Wandanschluss vertikale Druck- und Zugkräfte sowie horizontale Scherkräfte übertragen (siehe Abbildung 3-4) [65]. Die vertikalen Druckkräfte werden dabei über Kontaktdruck von der oberen Wand in die Untere eingeleitet [65]. Je nach Auflagersituation der Decke kann die Kraftübertragung entweder durch die Decke hindurch oder direkt zwischen den Wänden erfolgen [58]. Bei der Druckübertragung durch die Decke muss diese hohe Querdrucksteifigkeiten aufweisen. Ist dies nicht möglich, muss die Decke im Auflagerbereich z. B. durch Druckstempel aus Beton verstärkt werden [54]. Die Querdrucksteifigkeit ist bei Wand-Wand-Stößen in Holztafelbauweise besonders zu beachten, da Schwelle und Rähm dabei auf Querdruck belastet werden [54].



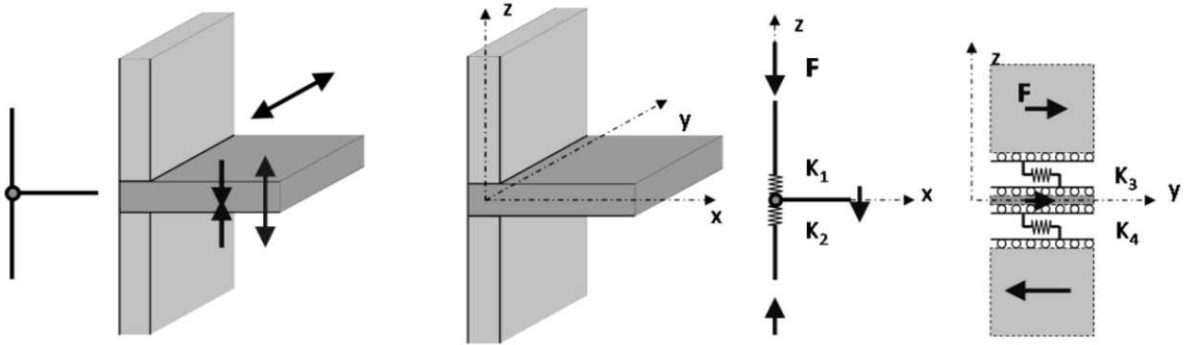


Abbildung 3-4: Anschluss Wand-Decke-Wand (aus [65])

Die Übertragung der Zug- und Scherkräfte aus Wind- oder Erdbebenlasten benötigt eine etagenübergreifende Verbindung (siehe Abbildung 3-4). Je nach Anforderung existieren hier unterschiedliche Verbindungsmethoden. Diese reichen von gekreuzten Verschraubungen (siehe Abbildung 3-5) über genagelte oder geschraubte Winkelverbindungen, geschossübergreifende, ausgenagelte Lochbleche bis hin zu eingeschlitzten Stahlblechen, die verschraubt und verdübelt werden [65]. Alle weisen eine sehr hohe Anzahl an Verbindungsmitteln auf. Diese Verbindungsmittel gelten zudem auch in der Regel als nicht lösbar. Hersteller entwickeln hier verschiedene Systemlösungen, beispielsweise durch Steckverbinder für den Wandsockel [66] oder Eckverbinder für Massivholzwände [67], um die Anzahl der Verbindungsmittel zu reduzieren und zu vereinfachen.

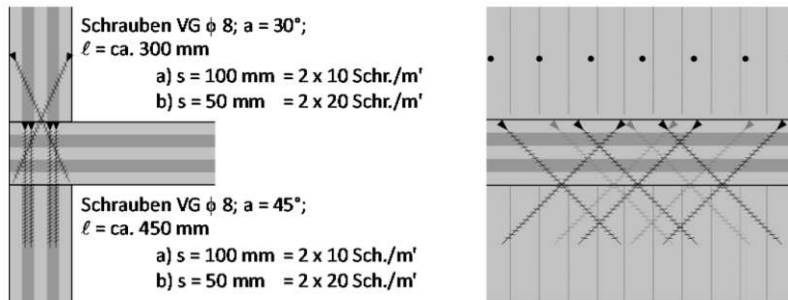


Abbildung 3-5: Zug- und Scherverbindung durch Verschraubung (aus [65])

Die Deckenelemente können mit Schraub- und Winkelverbindungen oder Schlitzblechen mit der darüber- und darunterliegenden Wand verbunden werden. Eine gängige Methode zur Verbindung mit der darunterliegenden Wand ist die Verschraubung und mit der darüberliegenden Wand die Winkelverbindungen. Im Bereich des Stoßes der Geschosdecke mit der Außenwand ist die Kontinuität der funktionalen Schichten stark von der Auflagersituation der Decke abhängig. Bei vollständig oder teilweise aufliegenden Deckenelementen ist die Dämmebene unterbrochen. Außerdem muss die Luftdichtung und Dampfbremse um die Stirnseite der Decke herumgeführt und verklebt werden [58].

### Demontierbarkeit von Wänden

Ausschlaggebend für die Demontage der Wandelemente sind die Zug- und Schubverbindungen im Wand-Decke-Wand-Knoten. Hier ist unabhängig von der Lösbarkeit der eingesetzten Verbindungsmittel nach Tabelle 3-1 zu hinterfragen, ob die große Anzahl und schlechte Zugänglichkeit der Verbindungsmittel (siehe Abbildung 3-5) ein mögliches Hindernis für die schadensfreie Demontage beziehungsweise die Wiederverwendbarkeit darstellt. Auch

bei der Verwendung der Steckverbinder zur Zug- und Schubkraftübertragung ist davon auszugehen, dass sich eingerastete Steckverbinder nicht einfach wieder lösen lassen [66].

#### *Demontierbarkeit von Decken*

Die Verbindungsmittel im Wand-Decke-Wand-Knoten wie auch im Decken-Decken-Stab sind zahlreich und in Abhängigkeit des Fußbodenaufbaus und Witterungsschutzes möglicherweise schlecht zugänglich. Besonders wenn für die Ausbildung einer Deckenscheibe im Decken-Decken-Stoß viele stiftförmige Verbindungsmittel verwendet werden, und diese für den Witterungsschutz während der Montage vollflächig mit Folien verklebt werden, scheint eine schadensfreie Demontage der Decken nur mit hohem Aufwand möglich.

#### 3.5.3. Trennbarkeit auf Bauteilebene

Für die Wiederverwendung ganzer Bauteile ist die Demontierbarkeit, also die konstruktiven Verbindungen zwischen den Bauteilen, maßgebend. Als Trennbarkeit wird dagegen die Rückbaubarkeit der Bauteile in ihre Bauelemente, Komponenten oder Baustoffe bezeichnet. Diese ist maßgebend, um die Austauschbarkeit und damit eine lange Lebensdauer sowie eine sortenreine Zerlegung zu gewährleisten. Entscheidend dafür ist die Wahl der Verbindungsmittel, mit denen die Bauelemente im Werk vorgefertigt werden und die Verkleidungen und Oberflächen auf der Baustelle am Bauelement angebracht werden. Im folgenden Unterkapitel werden gängige Verbindungsmittel zur Herstellung der Bauelemente vorgestellt und deren Trennbarkeit eingeordnet.

#### *Fügemethoden Tafelbauelement*

Im mehrgeschossigen Holzbau werden Bauelemente für gewöhnlich noch nicht durchgehend mit reversiblen Verbindungen geplant. In der Tragstruktur der Tafelbauweise können zimmermannsmäßige Verbindungsmittel eingesetzt werden, um das Stabwerk zu verbinden. Daneben kommen auch stumpf gestoßene und verschraubte Verbindungen innerhalb des Stabwerks vor [55]. Die Scheibenwirkung entsteht durch den Verbund zwischen Stabwerk und Beplankung. Aus fertigungs- und kostentechnischen Gründen werden dafür meist Nägel oder Klammern verwendet, es sind jedoch auch geschraubte Verbindungen möglich [55]. Das Prinzip der Tafelbauweise wird bei Decken in Form von Hohlkastenelementen angewandt. Hier erfolgt die Verbindung zwischen den Deckenrippen und der Bekleidung jedoch im Gegensatz zu Wandelementen häufig mittels Verklebung [55].

#### *Fügemethoden Massivholzelement*

In der Massivholzbauweise werden mit BSP monolithische Bauteilelemente als Tragwerk eingesetzt. Diese werden in ressourcenaufwändigen industriellen Herstellungsprozessen verklebt [55] und sollten im Sinne der Kreislaufwirtschaft als ganzes Bauelement wiederverwendet werden. Bei der Massivholzbauweise mit Brettstapelelementen werden die einzelnen Bretter vernagelt, gedübelt oder verklebt [55]. Neben der Verbindungsmethode der Bretter spielt bei der Trennbarkeit eines Brettstapelelements auch die Aussteifung eine Rolle. Um die Scheibenwirkung zu erhöhen, werden Beplankungen wie beim Tafelbau verklebt, vernagelt oder geklammert aufgebracht [55].

#### *Trennbarkeit von Wandaufbauten*

Vollflächig verklebte Folien oder Dämmungen sowie geklammerte oder genagelte Platten beeinflussen die schadensfreie Rückaufähigkeit auf Bauteilebene negativ [68]. Aus den Ausführungen zu den Wandaufbauten in Leicht- und Massivholzbauweise ist erkennbar, dass

im mehrgeschossigen Holzbau viele Kombinationsmöglichkeiten in den Aufbauten möglich sind. Verzichtet man auf die oben genannten, nicht lösbaren Fügemethoden, können die Wandaufbauten trennbar hergestellt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass nach dem aktuellen Stand der Technik im Großteil der Wandaufbauten keine trennbaren Verbindungen vorkommen. Insbesondere da die Bekleidungen aus fertigungstechnischen Gründen standardmäßig genagelt oder geklammert werden [69].

#### *Trennbarkeit von Deckenaufbauten*

Deckenaufbauten können im mehrgeschossigen Holzbau weitestgehend trennbar ausgeführt werden. Bei einer luftdichten, tragenden Schicht wie BSP kann auf eine Folie zur Luftdichtung verzichtet werden [62]. Der Fußbodenaufbau auf der Oberseite des Tragwerks bietet die Möglichkeit, die Schichten durch trockenes Auflegen reversibel zu fügen. Die zusätzliche Bauteilmasse liefern dabei zum Beispiel ungebundene Schüttungen wie Wabenschüttungen oder kleinformatige, schwere, mineralische Patten [62]. Darauf können Trockenestrichplatten mit aufgebracht Trittschalldämmung verlegt werden [62]. Auf der Unterseite des Tragwerks können die Brandschutzanforderungen durch mineralische Bekleidungen erfüllt werden, wobei diese direkt aufgebracht oder federnd abgehängt montiert werden können [62]. Bei zweiterer Methode sind lediglich die Direktabhängler mit der tragenden Schicht verschraubt und so nach Tabelle 3-1 im Allgemeinen wieder schadensfrei voneinander lösbar. Bei entsprechender Dimensionierung des tragenden Massivholzelements der Decke kann sogar auf eine unterseitige Brandschutzbekleidung verzichtet werden [60]. Aus bauphysikalischer und brandschutztechnischer Sicht lassen sich Zwischendecken also trennbar konstruieren, insbesondere so, dass sich die tragenden Holzelemente schadensfrei trennen und nach dem Rückbau wiederverwenden lassen. Häufig werden BSP-Tragschichten dennoch mit Luftdichtungs- und Witterungsschutzbahnen oberseitig verklebt, um einen Feuchteintritt im Bauzustand zu vermeiden. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Deckenunterseite unbedeckt bleibt. Die verklebten Folien lassen sich normalerweise nicht ohne Beschädigung von der tragenden Konstruktionsschicht ablösen (siehe Tabelle 3-1) und stellen somit einen limitierenden Faktor für die hochwertige Wiederverwendung tragender Bauelemente aus Deckenkonstruktionen dar. Sie erschweren zudem die sortenreine Trennung und damit eine Verwertung.

#### *Trennbarkeit der Dachaufbauten*

In der Dachkonstruktion wird in der Regel nicht auf Folien verzichtet [60], da hier weitaus höhere Anforderungen an die Abdichtung als bei Wandbauteilen bestehen. Flachdächer in Holzbauweise werden in der Regel mit Aufdachdämmung ausgeführt (siehe 3.4.2). Dabei wird auf den tragenden Holzbauanteilen bereits im Bauzustand eine Notabdichtung aufgebracht. Diese dient als Witterungsschutz während des Bauzustands und als Luftdichtung und Dampfbremse im Endzustand [58]. Es werden häufig Bitumenbahnen mit Metallbeschichtung verschweißt oder Folien verklebt [57, 58, 60]. Darüber wird eine druckfeste Gefälledämmung verlegt. Auf dieser werden die äußere Abdichtung sowie mögliche Schutzschichten vor mechanischer Beschädigung installiert [57, 58, 60]. Sowohl die äußere Abdichtung als auch die Dampfsperre werden häufig mit der darunterliegenden Schicht verklebt oder verschweißt [58]. Dadurch ist keine Wiederverwendung der Tragschicht des Flachdachs sowie der Gefälledämmung möglich. Verschweißte oder vollflächig verklebte Abdichtungen können sogar bedeuten, dass eine sortenreine Trennung nicht mehr möglich ist.

Demgegenüber sind geneigte Dächer mit folienarmen Aufbauten möglich [60]. Hier ist aufgrund der Dachneigung keine Abdichtung gegen stehendes Wasser erforderlich. Den Schutz

gegen Wasser kann demnach die Dachbekleidung aus Dachsteinen oder Blech übernehmen, während die Winddichtigkeit und Luftdichtigkeit sowohl von Folien als auch von Plattenwerkstoffen übernommen werden können (siehe Kapitel 3.4.2). Aufgrund einzuhaltender Gebäudehöhen spielen geneigte Dachkonstruktionen im mehrgeschossigen Holzbau nur eine untergeordnete Rolle.

### 3.6. Fazit zum Status Quo

Aus der Analyse der unterschiedlichen Konstruktionsmethoden (siehe Kapitel 3.3) kann festgehalten werden, dass Holz ein Werkstoff ist, mit welchem sich unterschiedlichste Bauteile und Tragwerksysteme herstellen lassen. Dabei ist auch ein großer Unterschied im Ressourceneinsatz erkennbar. In Kapitel 3.5 wird verdeutlicht, dass der Holzbau über Fügemethoden verfügt, die sich wieder trennen lassen. Im Bereich des mehrgeschossigen Holzbaus sind diese jedoch nicht Stand der Technik. Die verwendeten Verbindungsmittel zur Bauteilfügung im mehrgeschossigen Holzbau ermöglichen keinen schadensfreien Rückbau und verhindern damit eine Wiederverwendung. Die Verbindungsmittel sind eher auf einen schnellen Montageprozess ausgerichtet und bisher wird wenig Augenmerk auf den Rückbau gelegt.

Aus Kapitel 3.4 lässt sich ablesen, dass der Holzbau im Allgemeinen über vielschichtige Bauteilaufbauten verfügt. Die Anforderungen im Bereich des Brand- und Schallschutzes erhöhen die Schichtenanzahl im mehrgeschossigen Holzbau noch einmal. Die in Kapitel 3.5 erläuterten Fügemethoden zwischen den Bauteilschichten reichen von nicht lösbar bis schadensfrei lösbar. Hier sind viele Ausführungen möglich. Allerdings scheinen bei den Bauteilaufbauten auf der einen Seite bauphysikalische Optimierungen und auf der anderen Seite produktionstechnische Überlegungen aktuell ausschlaggebend zu sein. Ökologische Optimierungen spielen auch eine gewisse Rolle, während Überlegungen zur Kreislauffähigkeit wie die schadensfreie und sortenreine Zerlegbarkeit oder der Bauteilaufbau mit einfach austauschbaren Verschleißschichten im Status Quo eher eine untergeordnete Rolle spielen.

## 4. Beschreibung des wissenschaftlich-technischen Standes des kreislauffähigen Bauens in Bezug auf mehrgeschossigen Holzbau

Neben der Betrachtung der grauen Energie wurde das Thema Nachhaltigkeit mit der EU-Abfallrahmenrichtlinie sowie im Rahmen des EU-Green-Deals um die Komponente der Kreislaufwirtschaft erweitert [1]. Für den Werkstoff Holz ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft insofern besonders interessant, da er so lange als Kohlenstoffspeicher fungiert, wie er in einem Gebäude verbaut ist [52]. Aktuell wird der Werkstoff Holz am Ende eines Gebäudelebenszyklus meist thermisch verwertet und gibt den während des Wachstums des Baumes gespeicherten Kohlenstoff unter Energiegewinnung wieder ab [47, 52, 57]. Können also entweder der Gebäudelebenszyklus eines Holzgebäudes verlängert oder ganze Bauelemente beziehungsweise einzelne Komponenten aus dem Werkstoff Holz durch die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft wiederverwendet werden, wird auch die Kohlenstoffspeicherung verlängert [52]. Zudem erhöht das Prinzip der Kreislaufwirtschaft die zukünftig vorhandene Menge an Bauholz.

### 4.1. Methodik der Literaturanalyse

Da es sich bei der zirkulären Holzbauweise um eine bisher kaum in Anwendung befindliche Bauweise handelt (vgl. Kapitel 3), wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Forschung zur Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit in mehrgeschossigen Holzbauweisen betrachtet. Mit aktuellen Forschungsarbeiten und -projekten sollen die in Kapitel 2.1 behandelten Grundlagen der Kreislaufwirtschaft hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit im mehrgeschossigen Holzbau analysiert werden. Dabei wird Literatur, die sich mit der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen befasst (u. a. „Circular Housing Report“ [5], „Atlas Recycling“ [19], „Urban Mining Index“ [13, 21], „Sortenrein Bauen“ [50], „Nachhaltig konstruieren“ [47], „Besser Weniger Anders Bauen“ [70]) sowie Literatur, die sich mit der Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit im Holzbau befasst (u. a. „Atlas mehrgeschossiger Holzbau“ [57], „Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten“ [18], „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26], „Circular Wood“ [71]) verwendet. Die Erkenntnisse aus dieser Literaturrecherche werden dann um einzelne Artikel und Forschungsarbeiten ergänzt, die sich speziell mit einzelnen Themen aus dem Themenkomplex der Kreislaufwirtschaft im Holzbau befassen. In der Literaturanalyse werden die in den Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.7 behandelten Grundprinzipien der Kreislauffähigkeit und deren Umsetzbarkeit im mehrgeschossigen Holzbau analysiert. Das Ziel ist es, aus der Literatur explizite Ansätze für die Planung und Bewertung kreislauffähiger Holzgebäude herauszuarbeiten, aber auch bestehende Grenzen und Forschungslücken aufzuzeigen.

### 4.2. Suffizienz

Ein Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft ist es, den Ressourcenverbrauch von Vorneherein zu senken. Die Suffizienz bedeutet dabei, den Ressourcenverbrauch durch eine verringerte Nachfrage zu senken [5]. Im Kontext des Bauens bedeutet der Suffizienzgedanke, zu hinterfragen, welche Ressourcen wirklich benötigt werden und auf welche Ressourcen verzichtet werden kann [5, 17, 50].

#### 4.2.1. Verzicht auf Flächenverbrauch

Die Stellschrauben zur Ressourcenschonung durch Suffizienz stehen am Anfang der Planungshase, sie beinhalten gemäß dem „Circular Housing Report“ der Stadt Wien [5] die Flächeninanspruchnahme, die Gebäudegröße sowie die Bauform (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Hebel zur Ressourcenreduktion durch Suffizienz (aus [5])

Stellschraube	Wirkungsweisen	Umsetzung
Flächeninanspruchnahme	Minimierung der versiegelten Fläche, Unterkellerung und Gründung	Bodenschonende Gründung und geringe Grundflächen
Gebäudegröße	Minimierung der Fläche für Einzelpersonen Maximierung der Gemeinschaftsflächen Maximierung der Nutzungsintensität	Mehrfachnutzungen zum Vermeiden von Leerständen
Bauform	Optimiertes Oberflächen-Volumen-Verhältnis	Kompakte Bauweise

Die Flächeninanspruchnahme ist eine Stellschraube, welche weitreichende Konsequenzen auf den Ressourcenbedarf eines Gebäudes hat. So kann durch eine Verminderung der Grundfläche die versiegelte Bodenfläche reduziert werden. Außerdem sind die Unterkellerung und Gründung für einen erheblichen Anteil des Ressourcenverbrauchs und der grauen Energie eines Gebäudes verantwortlich [52]. Der Holzbau kann interessante Lösungsansätze zur Minimierung des Ressourcenverbrauchs durch die Gründung liefern. Ein geringes Eigengewicht und kurze Bauzeiten machen den Holzbau zur idealen Bauweise für Bestandserweiterungen durch Aufstockung [72]. Durch eine Aufstockung kann Wohnraum auf bereits versiegelten Flächen geschaffen werden und so im städtebaulichen Gesamtkontext die Versiegelung un bebauter Flächen verhindern.

Die Gebäudegröße und Bauform sind keine Stellschrauben, für welche der Holzbau Lösungen mit Alleinstellungsmerkmal bietet. Hier gilt es, die Fläche für einzelne Personen möglichst sinnvoll zu reduzieren und Mehrfachnutzungen zu maximieren sowie kompakte Baukörper zu schaffen [5]. Private Wohnflächen in den Obergeschossen können durch Cluster-Wohnungen [26] und Parkplatzflächen im Erdgeschoss oder Untergeschoss können durch Car-Sharing-Möglichkeiten reduziert werden [5]. Der Suffizienzgedanke bedeutet hier einen Verzicht auf private Flächen, um stattdessen gemeinschaftlich nutzbare Flächen zu erhöhen und so Leerstände im Tagesverlauf zu minimieren. Eine kompakte Bauform verringert die Fassadenfläche, sodass nicht nur der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung gesenkt, sondern auch die Effizienz des Gebäudebetriebs erhöht wird [5]. Hier wird im Sinne der Suffizienz auf eine besonders verschachtelte und damit oberflächenintensive Gebäudeform verzichtet.

#### 4.2.2. Suffizienz durch Innovation

Der Verzicht auf Ressourcen muss nicht zwangsläufig mit einem persönlich spürbaren Verzicht des Konsumenten einhergehen. Durch innovative technische Lösungen können Ressourcen vermieden werden, ohne die Funktionalität und den Komfort eines Produktes einzuschränken. Durch die Verwendung von Funkschaltern kann beispielsweise auf die Verkabelung zwischen der Lichtquelle und dem Schalter verzichtet werden [17] und die Länge der Leitungen in der Wand reduziert werden. Die Leitungsführung im Holzbau ist bei Wänden mit

Brandschutzanforderungen mit komplexen Durchführungen der Leitungen oder vorgesetzten Installationsebenen verbunden (siehe 3.4.3).

#### 4.2.3. Fazit zur Suffizienz

Besonders wenn es um den Verzicht auf versiegelte Flächen geht, bietet der mehrgeschossige Holzbau in den Gebäudeklassen 4 und 5 gute Lösungen an. Durch Aufstockungen kann dringend benötigter innerstädtischer Wohnraum geschaffen werden, ohne weitere Flächen zu versiegeln. Aufgrund der leichten Bauweise eignet sich hier der Holzbau besonders, da er durch das geringe Gewicht mehrstöckige Aufstockungen ermöglicht und so deutlich mehr potenzielle Wohnfläche als der reine Dachgeschossausbau für die innerstädtische Nachverdichtung liefern kann. Die zusätzlichen Maßnahmen wie kompakte Gebäudeformen, gesteigerte Nutzungsintensitäten durch gemeinschaftliche Räume usw. sind bei der Planung von nachhaltigen Holzgebäuden zu berücksichtigen und sollten in allen Bauweisen, nicht nur im Holzbau, umgesetzt werden.

### 4.3. Ressourceneffizienz

„Bei Effizienz handelt es sich um die Strategie, ein bekanntes System in dessen gegebenen Grenzen zu verbessern.“ [17] Im Kontext der Kreislaufwirtschaft soll durch Effizienz der Ressourcenverbrauch gesenkt werden. Die Möglichkeiten, wie der Holzbau zum Senken des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen beitragen kann, werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

#### 4.3.1. Grenzen und Verfügbarkeit der Ressource Holz

Verglichen mit mineralischen Baustoffen weist Holz im Hochbau einen geringen Marktanteil auf. Im Neubau betrug die Holzbauquote (Anteil der Gebäude in überwiegender Holzbauweise an der Gesamtanzahl der Gebäude) in Deutschland im Jahr 2017 für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude circa 17 %, während sie für Mehrfamilienhäuser bei knapp 3 % lag [73]. Es gibt eine Vielzahl an Studien, die nahelegen, dass die Substitution eines Stahlbetontragwerks durch ein Holztragwerk eine Einsparung der Treibhausgasemissionen mit sich bringt [47, 73-75]. Aus diesem Grund wird zur Reduktion der grauen Energie beim Bauen eine Erhöhung der Holzbauquote angestrebt. Untersuchungen und Modellierungen für die Holzproduktion und den Holzbedarf zeigen, dass mit der zu erwartenden Rohholzproduktion in Deutschland die im Bauwesen eingesetzte Holzmenge bis 2030 um bis zu 40 % gesteigert werden kann, ohne auf Holzimporte angewiesen zu sein [73]. Um die gesamte Treibhausgasbilanz des Bausektors maßgeblich zu beeinflussen, ist diese Steigerung nicht ausreichend. Deshalb sollten daraus folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Einerseits müssen mit der vorhandenen Holzmenge mehr Gebäude als bisher errichtet werden. Dazu können ein ressourceneffizienter Einsatz des Holzes im Tragwerk und die Wiederverwendung und Kaskadennutzung von Holzprodukten beitragen. Andererseits muss auch die Menge an mineralischen Baustoffen, insbesondere Beton, aufgrund der damit verbundenen Emissionen gesenkt werden. Es existieren in der Forschung Ansätze, die in Zukunft eine CO<sub>2</sub>-neutrale Betonherstellung ermöglichen. Dazu muss Portlandzement als Bindemittel, welches bei der Herstellung prozessbedingt CO<sub>2</sub> emittiert, ersetzt werden, zum Beispiel durch Magnesiumsilicate [76]. Diese Verfahren sind jedoch noch mit viel Forschungsbedarf verbunden und auf absehbare Zeit nicht marktreif [76]. Es werden auch Forschung und Entwicklung betrieben, um den Zementanteil im Beton und die damit verbundenen Emissionen durch die Zugabe alternativer Zusatzstoffe zu senken. Auch hier besteht weiterhin Forschungsbedarf [76]. Da der Weg zum CO<sub>2</sub>-neutralen Beton noch lang ist,

sollte bereits heute die Menge des eingesetzten Betons reduziert werden, zum Beispiel durch ressourceneffiziente Querschnitte oder den Verzicht auf besonders ressourcenintensive Gebäudeteile wie Untergeschosse und Tiefgaragen. Letztendlich muss im Umbau zu einem kreislauffähigen und CO<sub>2</sub>-neutralen Bauwesen eine ganzheitliche Betrachtung eingeführt werden, um festzustellen, wie sich die einzelnen Werkstoffe optimal einsetzen lassen. Es scheint also sinnvoll, Holztragwerke im Hochbau stets so ressourceneffizient wie möglich auszuführen, um mehr Massivbaugebäude durch einen gleichwertigen Holzbau zu substituieren. Um das Potenzial der Holzbauquote weiter zu erhöhen, scheinen kreislauffähige und auf Wiederverwendung optimierte Holzbauweisen sowie eine Verbesserung der stofflichen Nutzungskaskaden [73] geeignet, da diese langfristig die vorhandene Holzmenge im Bauwesen erhöhen. Aufgrund der großen Menge können mineralische Baustoffe nicht vollständig durch biogene Baustoffe ersetzt werden. Daher ist Forschung an der Kreislauffähigkeit und CO<sub>2</sub>-Neutralität von mineralischen Baustoffen erforderlich. Bis diese ermöglicht sind, muss der Einsatz mineralischer Baustoffe reduziert werden.

#### 4.3.2. Reduktion der Rohstoffentnahme

Durch effektive und geschlossene Materialkreisläufe sollen in einer Kreislaufwirtschaft keine Abfälle zur Deponierung entstehen und keine endlichen Rohstoffe ihrer natürlichen Lagerstätten entnommen werden. Der Rohstoff Holz ist ein biogener Stoff und bietet mit der Wiederverwendung (technischer Kreislauf) und der Kompostierung (biogener Kreislauf) zwei mögliche Szenarien für geschlossene Materialkreise.

Die in Deutschland und Österreich gesetzlich verankerte nachhaltige Waldbewirtschaftung (siehe 3.1) ermöglicht bereits heute die Bereitstellung des Konstruktionsmaterials Holz, ohne die Menge des Rohstoffs in den natürlichen Waldbeständen zu dezimieren. Die jährlich in Mitteleuropa nachwachsenden Holzmengen reichen zum heutigen Zeitpunkt aus, die Bauwirtschaft ausreichend mit Holz zu versorgen [10, 47]. Bei steigender Nachfrage ist es unumgänglich, den Bedarf neben nachhaltiger Forstwirtschaft auch durch Wiederverwendung und Kaskadennutzung zu decken [10, 47]. Die Rohstoffentnahme des Hochbaus kann durch Tragwerke und Bekleidungen aus Holz sowie Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen deutlich reduziert werden, sofern eine nachhaltige Bewirtschaftung der nachwachsenden Ressource zugrunde liegt. Der Holzbau ermöglicht eine ressourcenschonende Bauweise, bei der die natürlichen Rohstofflagerstätten nicht dezimiert werden, ohne dass die Wiederverwendung und Kaskadennutzung (technischer Kreislauf) zum heutigen Zeitpunkt technisch ausgereift sind. Im Gegensatz dazu sind mineralische Baustoffe wie Beton bei der Herstellung zum jetzigen Zeitpunkt noch auf die Entnahme natürlicher, nicht nachwachsender Ressourcen wie Sand oder Kies aus der Umwelt angewiesen [77]. Wenn mineralische Komponenten in einem Neubau durch Komponenten aus nachwachsenden Rohstoffen ersetzt werden können, lässt sich die Ressourcenentnahme für das Gebäude senken. Die Wahl der Tragkonstruktion hat einen großen Einfluss darauf, welche Menge an nachwachsenden Rohstoffen zur Erstellung eines Gebäudes benötigt wird. Bei der Skelett- und Tafelbauweise wird der Werkstoff Holz in einem Stabwerk punktuell und damit ressourceneffizient im Tragwerk eingesetzt, während Massivholzelemente vollflächig ausgebildet sind und weitaus mehr Holz benötigen (siehe 3.3).

#### 4.3.3. Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Treibhausgasgehalt in der Atmosphäre gilt als wesentlicher Treiber des Klimawandels. Der Anteil der Treibhausgase in der Atmosphäre lässt sich durch Einsparungen bei den Emissionen und durch den Entzug der Treibhausgase aus der Atmosphäre senken [52]. Da der Werkstoff



Holz beide Eigenschaften aufweisen kann, eignet er sich besonders für eine CO<sub>2</sub>-arme Bauweise [10, 52, 57, 78]. Während des Wachstums des Baumes entzieht dieser durch Photosynthese CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und speichert dieses in Form von Kohlenstoff im Holz. So wirkt der Werkstoff Holz als Kohlenstoffs Senke [10, 52, 57]. Dies trifft jedoch nur für Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft zu [10]. Daneben wird für die Herstellung eines Holzgebäudes vergleichsweise weniger nicht erneuerbare Primärenergie benötigt als in mineralischer Bauweise [47, 49, 50].

Wird nun ein gleichwertiger Holzbau anstelle eines mineralischen Gebäudes errichtet können Treibhausgasemissionen eingespart werden. Zahlreiche Studien sind zu dem Ergebnis gekommen, dass durch die stoffliche Substitution von mineralischen Baustoffen durch Holz Treibhausgas-Einsparung erzielt werden kann [47, 74, 75]. Hafner et al. [74] haben dieses Einsparpotenzial auf 9 bis 48 % beziffert. Dabei wurden die Ökobilanzen unterschiedlicher Mehrfamilienhäuser jeweils in Holz- und mineralischer Bauweise nach DIN EN ISO 14040:2006/14044:2006 und DIN EN 15978:2012 berechnet und gegenübergestellt. Das Einsparpotenzial beim Treibhauspotenzial von 9 bis 48 % bezieht sich auf die Betrachtung der Konstruktion (ohne Ausstattung) und der Module A1 bis A3 sowie C3 beziehungsweise C4 (siehe Abbildung 4-1) [74]. Die Höhe des Einsparpotenzials hängt dabei stark von der Geschossanzahl ab [74]. Da mit steigender Gebäudehöhe die Brandschutzanforderungen im Holzbau steigen und dadurch wiederum eine höhere Menge an nicht brennbaren, zumeist mineralischen Baustoffen eingesetzt wird [74]. Auch, ob die Erschließungskerne aus Holz oder aus Stahlbeton hergestellt werden, hat einen Einfluss auf das Einsparpotenzial eines Holzhauses gegenüber einem mineralisch hergestellten Gebäude [74]. Das im Holz gespeicherte CO<sub>2</sub> geht in der Phase A1 als negatives Treibhauspotenzial in die Ökobilanzierung ein, wird jedoch im Modul C am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes wieder ausgebucht, da das CO<sub>2</sub> nun nicht mehr im Gebäude gebunden ist [74]. Die Ausbuchung erfolgt dabei zwingend und ist unabhängig vom weiteren Verfahren am Ende des Lebenszyklus [79]. Die Gutschriften und Lasten für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling werden im Modul D aufgeführt (siehe Abbildung 4-1). Für Altholz ergeben sich dabei zwei Szenarien. Derzeit wird das Altholz größtenteils thermisch verwertet. In diesem Szenario wird das, im Modul C ausgebuchte CO<sub>2</sub> durch Verbrennung freigesetzt. Es kommt dennoch zu einer Gutschrift im Modul D, da davon ausgegangen wird, dass das Altholz als Ersatzbrennstoff anstelle eines fossilen Energieträgers eingesetzt wird [79]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Gutschriften, die durch die Substitution fossiler Brennstoffe durch Altholz entstehen, in Zukunft mit dem Umbau des Energiesektors hin zu erneuerbaren Energieträgern an Wirkung verlieren [47]. Mit dem derzeit gültigen Stand der Ökobilanzierung nach ÖNORM 15804 fallen die Gutschriften für eine thermische Verwertung am Ende des Lebenszyklus deutlich höher aus als für ein Recycling des Altholzes [79]. Es werden lediglich Gutschriften für die eingesparten Emissionen durch die Nutzung von Altholz anstelle Primärholz berücksichtigt [79]. Dabei werden die positiven Klimaeffekte einer langfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung, welche durch Wiederverwendung im Holzbau möglich gemacht wird, nicht in der Ökobilanzierung beachtet [79]. Dadurch erzielt ein rückbau- und kreislauffähig geplantes Bauteil aus Konstruktionsvollholz ein schlechteres Ergebnis im Treibhauspotenzial als ein nicht für eine Wiederverwendung geplantes Bauteil, bei welchem der Holzanteil am Ende des Lebenszyklus thermisch verwertet wird [79]. Neben dem besseren Abschneiden in der Ökobilanzierung wird die energetische Nutzung von Altholz auch durch entsprechende Förderungen stärker unterstützt als eine Wiederverwendung oder stoffliche Weiterverwertung in einer Nutzungskaskade [73].

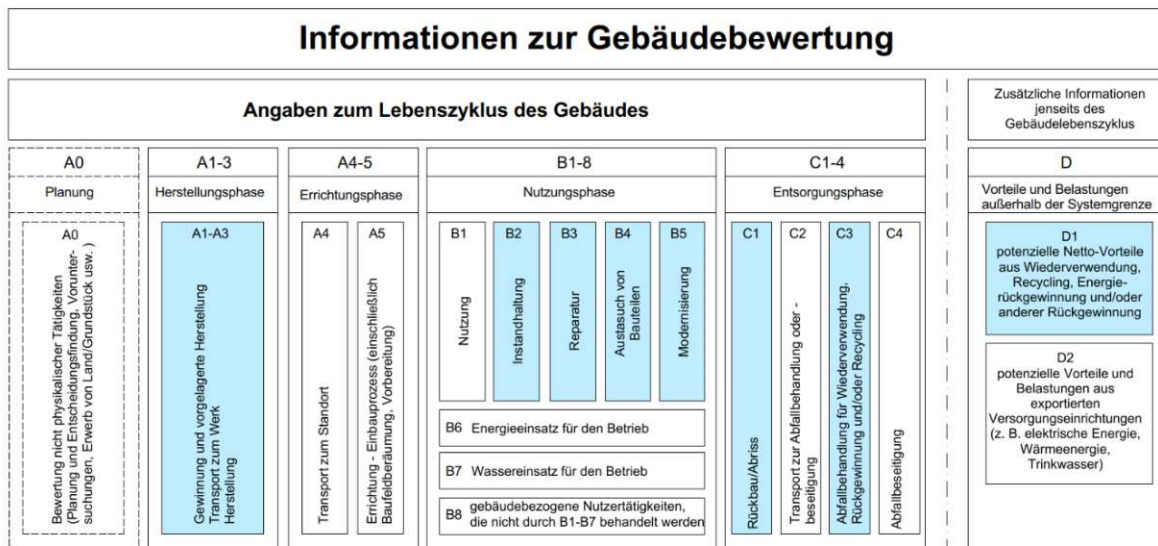


Abbildung 4-1: Lebenszyklusinformations-Module nach ÖNORM EN 15978-1, Hervorhebung von Modulen mit besonderer Relevanz für die Kreislaufwirtschaft (Eigene Darstellung, nach [80])

Im Gegensatz zum Treibhauspotenzial zeigen sich beim Primärenergieaufwand für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung keine materialabhängigen Unterschiede [47]. Unterschiede zwischen Holzbauweise und mineralischen Bauweisen treten erst bei der Betrachtung der Zusammensetzung des Primärenergieaufwands auf. Gebäude mit einer Tragstruktur aus Holz haben einen signifikant höheren Anteil an erneuerbarer Primärenergie und damit auch einen reduzierten Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie (graue Energie) [47, 52, 57]. Im „Atlas mehrgeschossiger Holzbau“ [52] und in „Nachhaltig konstruieren“ [47] werden die Unterschiede der Zusammensetzung des Primärenergiegehalts zwischen mineralischer und Holzbauweise durch Vergleichsberechnungen aufgezeigt. Hoppe et al. [78] können bei der Auswertung eines Wohnquartiers hingegen kaum Unterschiede beim nicht erneuerbaren Primärenergiegehalt feststellen. Beim Primärenergiegehalt eines Gebäudes können im mehrgeschossigen Holzbau große Unterschiede auftreten. Obwohl die gesamte Tragstruktur eines mehrgeschossigen Gebäudes in Holz ausgeführt wird, macht der Anteil nachwachsender Rohstoffe an der gesamten Gebäudemasse nur bis zu 18 % aus [52]. Durch steigende Brandschutzanforderungen mit der Geschosshöhe, unterirdische Geschosse und die Ausbildung des Fundaments machen mineralische Baustoffe im mehrgeschossigen Holzbau einen Großteil des Gebäudegewichts aus [52] und können den Primärenergiebedarf maßgeblich beeinflussen [47, 57]. Daneben hat auch der Bearbeitungsgrad der im Tragwerk eingesetzten Holzprodukte einen großen Einfluss auf den Anteil der grauen Energie des Gebäudes [47]. Ein höherer Bearbeitungsgrad geht mit einem höheren nicht erneuerbaren Primärenergieanteil einher [51]. Der Großteil der nicht erneuerbaren Primärenergie der Holzprodukte entsteht in deren Herstellungsprozess in den Phasen A1 bis A3. Die Logistik vom Werk zur Baustelle und die Baustellenprozesse fallen dagegen bei der Ökobilanzierung kaum ins Gewicht [74]. In der Kreislaufwirtschaft kann die für die Herstellung der Holzprodukte aufgewendete Primärenergie erhalten werden [18]. Besonders Bauteile und Baumaterialien mit einem hohen, nicht erneuerbaren Primärenergiegehalt sollten daher im Kreislauf geführt werden, sodass die Primärenergie aus dem Herstellungsaufwand bei der Nutzung des Sekundärstoffs erhalten bleibt [18]. Dabei sollte immer die Wiederverwendung angestrebt werden, da die Wiederverwendungsprozesse weitaus weniger energieintensiv als die Recyclingprozesse sind (siehe Abbildung 4-2) [18]. In Abbildung 4-2 sind die Prozessschritte für Wiederverwendung

und Recycling gegenübergestellt. Dabei sind jene Prozesse hervorgehoben, bei denen Abweichungen im Energieaufwand bestehen. Bei der Wiederverwendung ist das Produkt grundsätzlich in einem Zustand, dass es voll funktionsfähig ist, dennoch kann unter Umständen eine Aufbereitung oder ein Umbau notwendig sein. Hierfür wird mit einem relativ geringen Energieaufwand gerechnet. Der Primärenergiegehalt der einzelnen Bauelemente und Komponenten bleibt dabei vollständig erhalten. Beim Recycling wird durch die Zerkleinerung der Primärenergiegehalt der Komponente zum Teil oder größtenteils vernichtet und muss bei der Herstellung des neuen Produktes erneut aufgewandt werden.

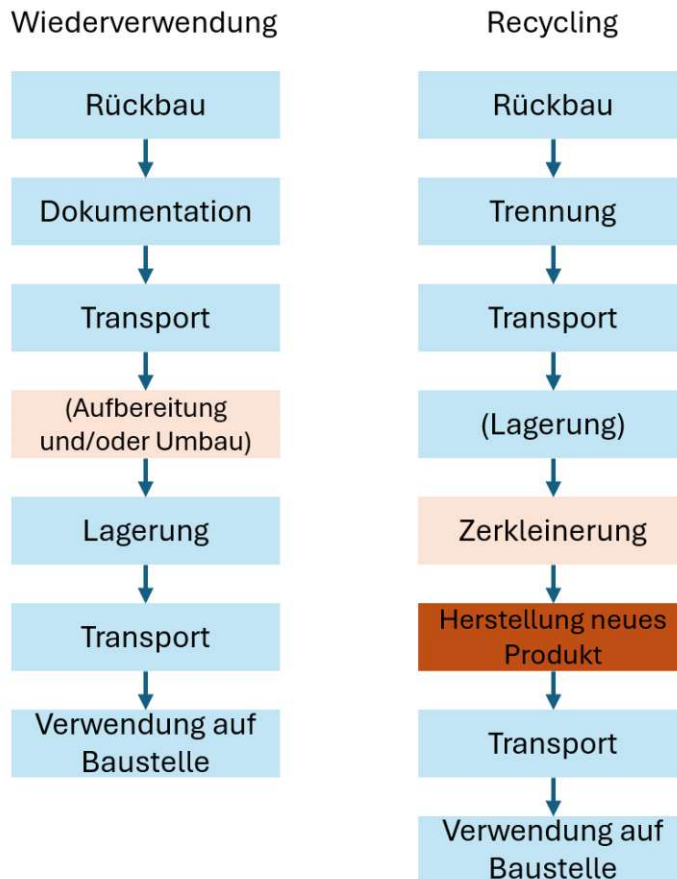


Abbildung 4-2: Wiederverwendungs- und Recyclingprozess (Eigene Darstellung, nach [18])

Die Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz in der Tragstruktur hat zusammengefasst folgende positiven Auswirkungen auf die Ökobilanz eines Gebäudes:

- (1) Holz in der Tragstruktur wirkt als CO<sub>2</sub>-Speicher. Somit können Emissionen in die Zukunft verlagert werden. Die verzögerte Emission von CO<sub>2</sub> hat positive Auswirkungen auf den Klimawandel. Wird die Tragstruktur mit der Möglichkeit zur Wiederverwendung geplant, können diese Emissionen noch über die Lebensdauer des Gebäudes hinaus gespeichert werden.
- (2) Durch die Substitution mineralischer Baustoffe durch nachwachsende Rohstoffe lassen sich Treibhausgasemissionen verringern. Das stoffliche Substitutionspotenzial von Holz ermöglicht im mehrgeschossigen Wohnungsbau Emissionseinsparungen bis zu knapp 50 %.
- (3) Die Herstellung von Holzprodukten für das Tragwerk benötigt im Vergleich zu mineralischen Pendanten weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Durch die

Substitution mineralischer Werkstoffe im Tragwerk durch Holz lässt sich die nicht erneuerbare Primärenergie eines Gebäudes verringern.

- (4) Der Großteil der grauen Energie bei Holzprodukten entsteht in der Herstellungsphase. Bei der Wiederverwendung und dem Einsatz als Sekundärbauteil von bearbeiteten Holzprodukten wie BSP oder getrocknetem, keilgezinktem Konstruktionsvollholz kann die nicht erneuerbare Primärenergie aus dem Herstellungsprozess erhalten werden. Da der Wiederverwendungsprozess besonders energiearm ist, weisen diese Sekundärbaustoffe ein hohes Substitutionspotenzial gegenüber gleichartigen, neuwertigen Produkten auf.

#### 4.3.4. Ressourceneffiziente Holzbauweise versus CO<sub>2</sub>-Speicher

Trotz der CO<sub>2</sub>-Speicherung im Baustoff Holz sollte mit der Ressource verantwortungsvoll umgegangen werden. Es ist nicht sinnvoll, in jedem Bauteil so viel Holz wie möglich zu verbauen [52]. Die positive Wirkung der CO<sub>2</sub>-Speicherung ist nur in Verbindung mit einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder als positiv zu betrachten [10]. Durch ineffiziente Verwendung von Holz als Baustoff kann der Bedarf möglicherweise nicht mehr von nachhaltiger, regionaler Waldbewirtschaftung bedient werden und die positiven Effekte von Holz als CO<sub>2</sub>-Senke verpuffen. Zum heutigen Stand lässt sich mit der nachhaltigen Forstwirtschaft in Mitteleuropa deutlich mehr Holz als Baustoff verwenden [10, 49, 50]. Der positive Effekt eines erhöhten Einsatzes von Holz im Bauwesen fällt bei einer Steigerung der Anzahl an Holzgebäuden mit ressourceneffizienter Bauweise deutlich höher aus als bei gleichbleibender Gebäudeanzahl in Holzbauweise mit einer gesteigerten Menge an Holz je Gebäude.

#### 4.3.5. Verringerter Ressourcenverbrauch durch Leichtbauweise

Das besonders geringe Eigengewicht des Holzbaus ermöglicht es, die Fundamentstärken für den Holzbau schlanker auszuführen als für ein Gebäude in mineralischer Bauweise [74]. In der Literatur wird das Gewicht (ohne Fundament) eines mehrgeschossigen Holzbaus mit 30 bis 70 % [74] respektive 50 bis 65 % [57] eines baugleichen mineralischen Gebäudes angegeben. Der Einsatz des Baustoffs Holz in der Tragkonstruktion der oberirdischen Geschosse führt so zu Ressourceneinsparungen im Fundament. Ein vollständiger Verzicht auf mineralische Baustoffe scheint jedoch im mehrgeschossigen Holzbau nicht zielführend zu sein. Die benötigten Gebäudemasse für den sommerlichen Wärmeschutz und den Schallschutz können im Holzbau nur schwer ohne den Einsatz mineralischer Baustoffe erreicht werden. Selbst bei fast ausschließlicher Verwendung nachwachsender Rohstoffe machen diese nur bis zu 18 % der gesamten Gebäudemasse aus [52]. Auch auf Fundamente aus Stahlbeton kann aus Gründen des Feuchteschutzes kaum verzichtet werden. Zudem existieren in den Gebäudeklassen 4 und 5 höhere Brandschutzanforderungen, welche sich am einfachsten durch die Verwendung mineralischer Bekleidung und Dämmung erreichen lassen [52].

#### 4.3.6. Ressourceneffiziente Verbundkonstruktionen

Um die Ressourceneffizienz und die Tragfähigkeiten der Konstruktionen im mehrgeschossigen Holzbau zu verbessern, wurden in den vergangenen Jahren viele Verbundkonstruktionen mit dem Werkstoff Holz entwickelt. Diese zeichnen sich durch einen möglichst ressourceneffizienten Materialeinsatz durch Kombination von Holz oder Holzwerkstoffen miteinander oder mit anderen Materialien wie Beton oder Glas aus.

### *Holz-Holzwerkstoff-Verbund*

Die technische Entwicklung in der Holzindustrie hat einen großen Einfluss auf die Entwicklung ressourcenschonender Bauteile im Holzbau. Durch Verklebung von Gurten und Stegen aus Holz und Holzwerkstoffen werden besonders schlanke und materialsparende Steg- und Leiterträger hergestellt [55]. Im Holztafelbau entstehen durch statisch wirksame Verklebung des Ständerwerks mit der Beplankung besonders tragfähige und materialsparende Hohlkastenelemente [55]. Bei beiden Beispielen werden häufig Vollholzprodukte mit Holzwerkstoffen kombiniert, um eine optimale statische Wirkung bei möglichst geringen Bauteilabmessungen zu erreichen.

### *Ressourcenoptimierte Brettsperrelemente*

Auch bei plattenförmigen Bauelementen wie BSP können viele Ansätze zur Optimierung des Materialeinsatzes oder Erhöhung der Tragfähigkeit in diversen wissenschaftlichen Artikeln und Forschungsberichten gefunden werden. Durch Aufbringen von Rippen auf BSP-Elemente entstehen HCLTP-Elemente (Hybrid-Cross-Laminated-Timber-Plates, Holzrippenplatten). Diese ermöglichen bei Decken bis zu 40 % und bei Dächern bis zu 50 % Materialeinsparung gegenüber gewöhnlichen BSP-Konstruktionen [81]. Durch Weglassen von 50 % der Bretter in den nicht beanspruchten Brettlagen des BSP-Elementes können bei gleicher Tragfähigkeit bis zu 18 % Material bei der Herstellung eingespart werden [82].

### *Holz-Beton-Verbund-Elemente*

Die Forschung zur Herstellung von Holz-Verbund-Konstruktionen in Kombinationen mit anderen Werkstoffen wird intensiv betrieben. Die Kombination aus Holz und Beton wird besonders zur Herstellung von Deckenelementen herangezogen. Dabei werden durch den Beton große Spannweiten, thermische Bauteilaktivierung und gute Schalldämmung erreicht [55]. Der Einsatz von Holz kann die Menge an benötigtem Beton und somit das Treibhauspotenzial gegenüber einer konventionellen Betondecke senken [55]. Um eine Verbundwirkung zwischen Beton und Holz zu erzeugen, ist ein schubsteifer Verbund notwendig. Dieser wird für gewöhnlich durch Kerfen in Verbindung mit Schrauben oder eingeklebte Bleche in die Holzschicht hergestellt [55]. Die Ressourceneffizienz der Holz-Beton-Verbund-Decke kann weiter optimiert werden. Forschungsprojekte befassen sich mit der Reduktion der Betonmenge durch den Einsatz von Holzleichtbeton [83] oder durch Optimierung der Geometrie des Betonquerschnitts (siehe Abbildung 4-3) [84]. Die Verwendung von Holzleichtbeton ist sowohl in Wand- als auch Deckenaufbauten möglich und dient der Aussteifung, Dämmung und Schalldämmung [83].

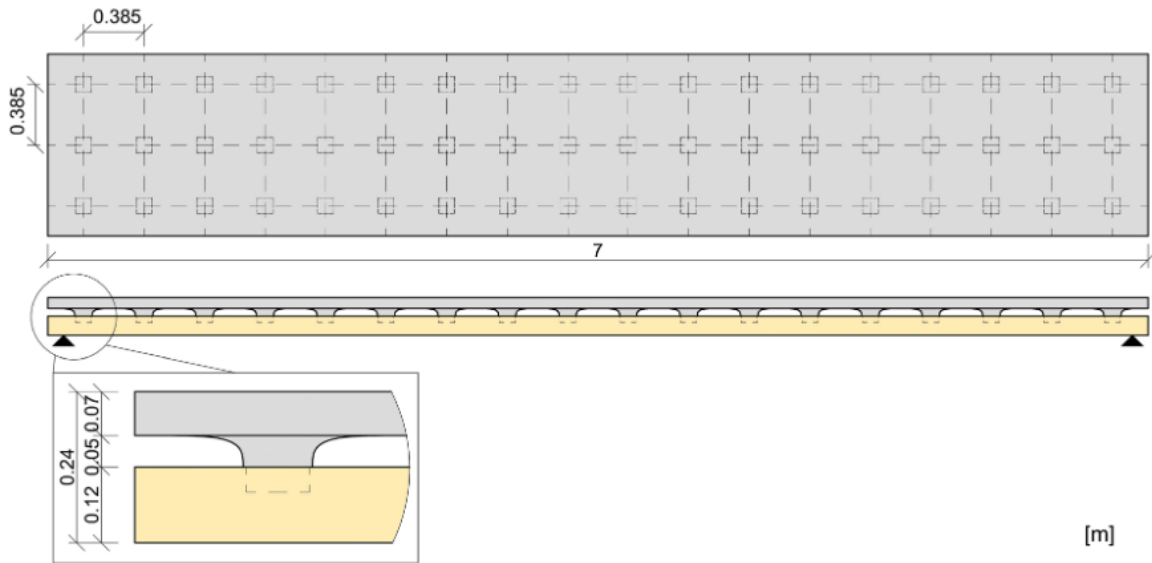


Abbildung 4-3: Geometrisch optimierte Holz-Beton-Verbund-Decke (aus [84])

### Holz-Lehm-Verbund-Elemente

Im Bereich der Verbunddecken gibt es auch Ansätze, ressourcenschonende und trennbare Verbundsysteme herzustellen. Ein Ansatz, der verfolgt wird, ist der Verbund mit Lehm. Die Verbunddecken bestehen aus einer Rippendecke aus Vollholzträgern und einer oberseitig verschraubten Dreischichtplatte. Auf der Unterseite wird eine Lehmausfachung zwischen die Träger eingebracht [85]. Die Elemente werden vorgefertigt. Dieser Prozess kann auch in einer Feldfabrik direkt in Baustellennähe geschehen, sodass lehmhaltiger Aushub direkt auf der Baustelle verarbeitet werden kann [86]. Aus ökologischer Sicht ist der Aufwand für die Beschaffung der Rohstoffe für diese Verbunddecke sehr gering. Dazu kann durch den Einsatz von Vollholzträgern der Energieverbrauch im Herstellungsprozess gesenkt werden [85]. Die Lehmausfachung bringt neben den ökologischen auch bauphysikalische Vorteile im Bereich des Brandschutzes, des Schallschutzes, der Feuchteregulierung und als Speichermasse mit sich [85]. Darüber hinaus ist eine vollständige schadensfreie und sortenreine Zerlegbarkeit des Bauteils in seine Bestandteile möglich [85].

### Holz-Glas-Verbund-Elemente

Auch für Wandkonstruktionen werden neue, ressourcenschonende Verbundkonstruktionen erforscht. Insbesondere bei der Aussteifung bietet sich die Kombination aus Holz mit weiteren Materialien an, um die Nachteile des Werkstoffs Holz mit seiner geringen Steifigkeit auszugleichen [87]. Beispielhaft sind hier Holz-Glas-Verbund-Elemente (HGV) zu nennen [88]. Durch Verklebung einer Glasscheibe mit einem Rahmen aus Holz oder Holzwerkstoffen entstehen aussteifende und lastabtragende HGV-Elemente, die als Platte der Scheibe eingesetzt werden können [87]. Das Potenzial der Aussteifung mehrgeschossiger Gebäude in Holzskelettbauweise mit HGV-Elementen wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit der TU Wien untersucht. Dabei wurde die Aussteifung von bis zu drei Geschossen nur mit HGV-Elementen nachgewiesen, wobei bei einer Verbesserung der Einzelkomponenten auch die Aussteifung höherer Gebäude durch HGV-Elemente nicht ausgeschlossen wurde [87]. Daneben weisen die HGV-Elemente niedrigeren, nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf und ein niedrigeres Treibhauspotenzial als vergleichbare Aluminium-Glas-Fassaden auf. Die Herstellung der HGV-Elemente (ohne Verglasung) weist sogar ein negatives Treibhauspotenzial auf [88]. Die HGV-Elemente wurden mit den Ergebnissen der Forschung zu Holzleichtbetonplatten kombiniert. So entstehen Fassadenelemente mit HCLTP-Elementen als

Tragstruktur mit außenseitig aufgebrachten HGV-Elementen zur Aussteifung [88]. In die Zwischenräume werden Holzleichtbetonplatten eingebracht. Sie dienen sowohl der bauphysikalischen Verbesserung (u. a. Wärmedämmung und Brandschutz) als auch der Erhöhung der Tragfähigkeit [88]. Zudem wurde das Verbundbauteil so designt, dass die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauelementen und Komponenten trennbar sind und somit eine Wiederverwendung zulassen [89].

#### 4.3.7. Ressourceneinsparung durch Vorfertigung

Durch die Möglichkeit der hohen Vorfertigung ergeben sich für den Holzbau Einsparpotenziale beim Ressourcenverbrauch. Die Bearbeitung und Herstellung der Fertigteile erfolgt für gewöhnlich in einer Produktionshalle mit einem hohen Automatisierungsgrad. Durch computergesteuerte Zuschnitte kann der Verschnitt minimiert werden. Durch maschinell eingebrachte Verbindungsmittel wird nur die exakt geplante Menge an Verbindungsmitteln für jedes Fertigteil verwendet und durch Einblasvorrichtungen für die Dämmung kann der Abfall beim Dämmen auf ein Minimum reduziert werden [69]. So können in den Produktionshallen höhere Qualitäten mit weniger Abfall hergestellt werden als auf der Baustelle [69]. Die reproduzierbare und kontrollierbare hohe Qualität ermöglicht zudem schlankere Konstruktionen [47]. Das geringe Gewicht der Fertigteile ermöglicht es, eine hohe Anzahl an Fertigteilen je Transport zu befördern, und reduziert die Anlieferungen zur Baustelle. Der hohe Vorfertigungsgrad wiederum reduziert die Anzahl der Lieferungen während der Ausbauphase. Die Vorfertigung ermöglicht zudem eine sehr kurze Montagezeit [69, 72]. Die Reduktion der Baustellentransporte bietet bei der Ökobilanzierung eines Holzgebäudes gegenüber anderen Bauweisen zwar keine großen Einsparungen [47], die Reduzierung der Transporte sorgt jedoch in Verbindung mit der kurzen Bauzeit zu einer erhöhten Akzeptanz innerstädtischer Baustellen. Dadurch wird der mehrgeschossige Holzbau zur idealen Bauweise für innerstädtische Nachverdichtungen, wie Aufstockungen oder Schließen von Baulücken [72].

#### 4.3.8. Materialdokumentation

In der OIB-Richtlinie 7 soll ab 2027 der Punkt 7 (Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen) der EU-Bauprodukteverordnung umgesetzt werden. Seit Mai 2023 liegt ein Grundlagendokument zur Ausarbeitung der OIB-Richtlinie 7 vor [41]. In dem Grundlagendokument wird insbesondere auf die Notwendigkeit einer exakten Materialdokumentation der verbauten Materialien hingewiesen. Dadurch sollen die im Gebäude gebundene graue Energie und die im Gebäude eingesetzte Materialart und -menge besser über den gesamten Lebenszyklus erfasst werden können [90]. So sollen bereits in der Planungsphase Abschätzungen über das Treibhauspotenzial und den Ressourcenverbrauch des Gebäudes ermöglicht werden, um diese optimieren zu können [90]. Eine genaue Materialdokumentation bietet auch eine Grundlage für gesetzliche Grenzwerte zum Ressourcenverbrauch und Treibhauspotenzial für Gebäude in Zukunft. Als Grundlage für die Materialdokumentation werden in Zukunft BIM-Modelle ein wichtiges Mittel werden [18]. Im Bericht „Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten“ [18] für das Schweizer Bundesamt für Umwelt und im „Atlas mehrgeschossiger Holzbau“ [69] wird thematisiert, dass durch die hohe Vorfertigung im Holzbau die Verwendung von CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Manufacturing) in der Branche weit verbreitet sind und bereits heute viele Daten zu den Bauteilen und Gebäuden im Herstellungsprozess der Fertigteile in digitaler Form vorhanden sind. Durch diesen Erfahrungsschatz sehen die Autoren ein großes Potenzial im Holzbau bei der Einführung BIM-basierter Materialdokumentationen [18]. Neben dem Digitalisierungsaspekt der Planung ist auch eine integrale Planung mit früher Einbindung des

ausführenden Unternehmens mit Kompetenzen in Herstellung und Montage entscheidend, um das Gebäude hinsichtlich seines Ressourcenverbrauchs optimieren zu können [71]. Dadurch lassen sich beispielsweise generische Werte für Materialverbrauch und Treibhauspotenzial durch herstellerepezifische Werte ersetzen, welche die Realität besser abbilden.

#### 4.3.9. Bestandsmodernisierung

Im Zusammenhang mit der Ressourceneffizienz muss auch die Bestandsnutzung behandelt werden. Nach den Grundlagen des kreislauffähigen Handelns ist eine Maximierung der Nutzungsdauer erstrebenswert und sollte einem Abriss mit Neubau vorgezogen werden. Eine große Herausforderung auf dem Weg zur Klimaneutralität stellt für den Gebäudesektor der Umgang mit dem Bestand dar. Einerseits ist der Gebäudebestand im Betrieb energieintensiv [72] und andererseits reicht der Gebäudebestand in Ballungsräumen häufig nicht mehr aus, um den steigenden Bevölkerungszug zu decken [2]. Gegen einen Abriss des Bestands und einen anschließenden Ersatzneubau sprechen fehlende Ausweichmöglichkeiten [57] sowie der Gedanke der Kreislaufwirtschaft, eine bestehende Bausubstanz möglichst lange weiter zu nutzen. Der Holzbau kann hier aufgrund des geringen Gewichts, der Vorfertigung, verbunden mit der hohen Montagegeschwindigkeit und der präzisen Maßgenauigkeit der Fertigteile, genutzt werden, um bestehende Strukturen zu modernisieren [72]. Durch Aufstockung um ein oder mehrere Geschosse lässt sich die Nutzfläche bei laufendem Betrieb erhöhen [72]. Außerdem besteht auch die Möglichkeit, mit Holztafelbauelementen die bestehende Fassade zu ersetzen oder eine neue Fassade vor die Bestandsfassade zu addieren, um eine energetische Sanierung des Bestands zu erreichen [57]. Dies kann eine Alternative zu WDV-Systemen darstellen und bietet große Gestaltungsspielräume bei der Ausführung der Fassadensanierung [72]. Sowohl die Aufstockung als auch die thermische Sanierung werden dadurch ermöglicht, dass es sich bei Holz um einen sehr leichten Baustoff handelt, sodass der Großteil des Gebäudebestands die notwendigen Lastreserven für eine Aufstockung in Holzbauweise aufweist [72]. In den beiden genannten Anwendungsfällen kann durch Holzbauweise im Bestand fast die gesamte Struktur erhalten bleiben und gleichzeitig an zukünftige Herausforderungen angepasst werden, sodass die Nutzungsdauer erheblich verlängert werden kann. Daneben sind auch Anwendungsfälle denkbar, bei denen ein Erhalt der Struktur nicht vollständig möglich ist. Möglicherweise kann ein Teilerhalt, zum Beispiel der Fundamente, des Untergeschosses oder sogar des Erdgeschosses, erreicht werden. In diesem Fall ist der Holzbau durch seine leichte Bauweise wieder geeignet, diese bestehenden Strukturen zu nutzen und darauf errichtet zu werden.

#### 4.3.10. Fazit zur Ressourceneffizienz

Der Holzbau hat aufgrund seiner Eigenschaften als CO<sub>2</sub>-Senke von Natur aus ein großes Potenzial, den Treibhausgasausstoß zu verringern, und einen Vorteil gegenüber allen nicht biogenen Rohstoffen. Im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Forstwirtschaft, wie sie in Mitteleuropa bereits heute betrieben wird, bietet der Holzbau auch die Möglichkeit, bereits heute die Entnahme endlicher Rohstoffe zu senken, indem die Tragstruktur aus Holz anstelle mineralischer oder metallischer Werkstoffe hergestellt wird. Das geringe Eigengewicht des Holzbaus ermöglicht auch schlankere Fundamente und damit Einsparungen gegenüber schwereren Bauweisen. Auch durch den hohen Vorfertigungsgrad hat der Holzbau Vorteile beim Ressourcenverbrauch gegenüber in situ Bauweisen. Es entstehen in der Regel geringere Abfallmengen und weniger Transporte als Bauweisen, die größtenteils vor Ort auf der Baustelle stattfinden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Holzbau viel Potenzial



für Ressourceneffizienz hat. Daneben wird auch im Holzbau weiter daran geforscht, die Ressourceneffizienz einzelner Komponenten, Bauelemente und ganzer Bauteile zu verbessern. Dafür werden häufig die Vorteile des Werkstoffs Holz genutzt, während versucht wird, die Schwächen durch den Verbund mit weiteren Werkstoffen auszugleichen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „circularWOOD“ [71] wurde in einer Stakeholder-Analyse von Experten festgestellt, dass die Entwicklungen von ressourceneffizienten Verbundbauteilen in den letzten Jahren häufig dem Prinzip kreislauffähiger Bauteile widersprechen, da die Verbundwirkung durch Verklebung (siehe Hohlkastenelemente, Stegträger, etc.) oder Formschluss (siehe Holz-Beton-Verbund-Decke) nicht reversibel ist und damit eine Wiederverwendung zumeist ausgeschlossen ist. Hier besteht noch Forschungsbedarf, um die ressourceneffizienten Verbundbauteile mit entsprechenden Verbindungsmitteln trennbar und damit kreislauffähig zu entwickeln.

#### 4.4. Maximierung der Lebensdauer im Holzbau

Die Gewährleistung einer langen Gebäudelebensdauer nimmt im zirkulären Bauen eine zentrale Rolle ein. Dies gilt insbesondere für Gebäude mit sehr dauerhafter Nutzung (dies sind beispielsweise Wohn- und Bürogebäude in hochwertigen oder zentralen urbanen Lagen) [47]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Wohngebäuden in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4 und 5, für diese ist bei der Errichtung in der Regel eine sehr dauerhafte Nutzung anzunehmen, und die Maximierung der Lebensdauer sollte zentraler Bestandteil der Planung sein. Laut Ottenhaus et al. [91] ist die lange Lebensdauer nicht nur von der Dauerhaftigkeit und Robustheit des Gebäudes abhängig, sondern zudem eng mit dem „Design for Adaptability“ (DfA) verknüpft. Anpassbare Gebäude weisen laut Ottenhaus et al. [91] sechs zentrale Eigenschaften auf. Sie sind veränderlich, vielseitig, nachrüstbar, umwandelbar, skalierbar und beweglich. Diese stellen sicher, dass ein Gebäude möglichst lange genutzt werden kann und damit der Abriss und ein Ersatzneubau vermieden werden. Eine lange Nutzung (Long-Use) wird durch die Dauerhaftigkeit der Baustoffe und Konstruktion, die Reparaturfähigkeit und Austauschfähigkeit der Scherschichten und Bauteilschichten und die vielfältige Anpassungsfähigkeit und Umnutzungsmöglichkeit garantiert. In den folgenden Unterkapiteln wird der Stand der Wissenschaft bezüglich der Maximierung der Lebensdauer mehrgeschossiger Holzgebäude analysiert und die Potenziale und Schwierigkeiten herausgearbeitet.

##### 4.4.1. Dauerhaftigkeit von Holztragwerken

Die untersuchte Fachliteratur stimmt überein, dass die maximale Lebensdauer eines Gebäudes nach dem Konzept der Scherschichten (siehe Kapitel 3.4.1) mit der Lebensdauer des Tragwerks korreliert [5, 18, 26, 71]. Da die Tragstruktur in der Regel am aufwendigsten und kostenintensivsten herzustellen und zu verändern ist, sollte sie möglichst unverändert über die gesamte Lebensdauer erhalten bleiben [18, 26, 71]. Bei Gebäuden mit sehr dauerhafter Nutzung kann dies eine Gebäudelebensdauer von mehr als 100 Jahren bedeuten. Dafür muss das Tragwerk im Wesentlichen zwei Eigenschaften erfüllen. Einerseits muss es eine hohe Robustheit und Dauerhaftigkeit aufweisen [5], um die angestrebte lange Lebensdauer zu erfüllen. Andererseits muss das Tragwerk so gestaltet sein, dass es eine gewisse Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Gebäudes zulässt, um eine dauerhafte Nutzung des Gebäudes auch bei geänderten Rahmenbedingungen zu garantieren [26].

### Robustheit von Holztragwerken

Die Robustheit der Tragstruktur spielt bei der Langlebigkeit eine entscheidende Rolle. In der Literatur wird in „Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten“ [18] und „Sortenrein Bauen“ [50] die Lebensdauer des Tragwerks mit 30 bis 300 Jahren angegeben. Je höher die Robustheit eines Tragwerks, desto länger ist dessen Lebensdauer und damit die Gebäudelebensdauer. In dem Werk „nachhaltig konstruieren“ [47] werden die erwarteten Lebensdauern unterschiedlicher Bauteile aufgelistet. Hier erreichen tragende Bauteile aus Holz Werte zwischen 40 und 150 Jahren [47] (siehe Tabelle 4-2: Lebensdauern von Holzbauteilen (nach [47])). Aufgrund von „geringeren Lebensdauer eingebauter Materialien, reparaturanfälligeren Konstruktionen, hohem Verschleiß durch intensivere Nutzung sowie (...) aggressiveren Umwelteinflüssen“ [47] ist die Lebensdauer von Bauteilen in den letzten Jahren tendenziell gesunken. Angaben zu Lebensdauern sind jedoch sehr schwierig verallgemeinernd zu treffen und hängen von der Planung, der konkreten Einbausituation und der Nutzung und Instandhaltung ab [47].

Tabelle 4-2: Lebensdauern von Holzbauteilen (nach [47])

Bauelement	Lebensdauer von - bis
Leimbinder	40 – 80 Jahre
Weichholz bewittert	40 – 50 Jahre
Hartholz bewittert	60 – 80 Jahre
Außenbauteil Weichholz bekleidet	60 – 80 Jahre
Außenbauteil Hartholz bekleidet	80 – 120 Jahre
Innenbauteile Weichholz	50 – 80 Jahre
Innenbauteile Hartholz	80 – 150 Jahre
Dachstühle	80 – 150 Jahre

Die Tragfähigkeit von Holz wird auch über eine Dauer von 100 Jahren kaum verringert [92]. Maßgeblich für die Lebensdauer einer Bauteilkomponente aus Holz ist dessen Schutz vor Feuchte. „Solange Holz trocken bleibt – entsprechend DIN 68 800 ist dies auch bei einer Holzfeuchte von ständig  $\leq 20\%$  der Fall – findet kein biologischer Abbau durch holzerstörende Pilze statt. In trockenem Zustand kann Holz als Konstruktionswerkstoff mehrere Hundert Jahre alt werden, wie eine Vielzahl historischer Bauten eindrucksvoll belegt.“ [53] Beispielsweise existieren in Mitteleuropa mehrgeschossige Fachwerkgebäude mit einem Alter von mehreren hundert Jahren [48], welche teilweise trotz eines offen bewitterten Holztragwerks noch immer stehen [92].

In den letzten Jahrzehnten wurde auch viel Forschung über die Veränderung der Tragfähigkeit von Holzwerkstoffen durch Alterung betrieben [93]. Mit Hilfe von Temperatur- und Feuchteveränderung wird eine künstliche Alterung hervorgerufen und die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Tragfähigkeit von verklebten Holzwerkstoffen wie BSP oder BSH analysiert [93]. Damit können Aussagen über die Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung unter Einfluss von Temperaturschwankungen und Feuchtigkeit getätigt werden. Eine Aussage über eine zu erwartende Lebensdauer im tatsächlichen Einbauzustand ist jedoch äußerst schwierig zu treffen, da Faktoren wie die klimatischen Bedingungen am Standort sowie die tatsächlich gewählte Konstruktion einen großen Einfluss haben und bestimmen, in welchem Umfang das Bauelement den alternden Einflüssen ausgesetzt ist [93]. Zusammengefasst kann zur Robustheit gesagt werden, dass sie maßgeblich vom Schutz der tragenden Holzbauteile vor

alternden Einflüssen abhängt. Ein robustes Holztragwerk muss daher vor allem dauerhaft vor Feuchte geschützt werden.

#### *Trennung der funktionalen Gebäudeschichten*

Das Werk „Sortenrein Bauen“ [94] schlägt ausgehend vom Modell der Scherschichten vor, Gebäude in baukonstruktiven Schichten zu betrachten, welche jeweils eine baukonstruktive Funktion übernehmen (siehe Abbildung 4-4). Dabei werden abweichend von dem Modell der Scherschichten (siehe Abbildung 3-2) nur noch die Grundfunktionen eines thermisch abgeschlossenen Gebäudes betrachtet, also das Tragwerk sowie raumgebende Bauteile, sofern diese dem Tragwerk zuzuordnen sind, und die einzelnen Funktionen der Gebäudehülle. Diese Grundfunktionen werden dann jeweils in einer baukonstruktiven Schicht dargestellt. „Ein nutzungsoffener Grundriss und Trennung von Baukonstruktion und Haustechnik sowie eine adaptierbare Grundstruktur des architektonischen Entwurfs werden als Prämisse vorausgesetzt“ [94]. Die Schnittstellen zwischen den baukonstruktiven Schichten sollen dabei stets schadensfrei und sortenrein lösbar ausgeführt werden [94]. So kann ein Gebäude in der Theorie durch stetigen Austausch eine unendliche Lebensdauer erreichen. Zumindest ermöglicht dieser Schichtaufbau jedoch einen Austausch der weniger langlebigen Schichten eines Gebäudes, bis die Lebensdauer des Tragwerks erreicht ist.

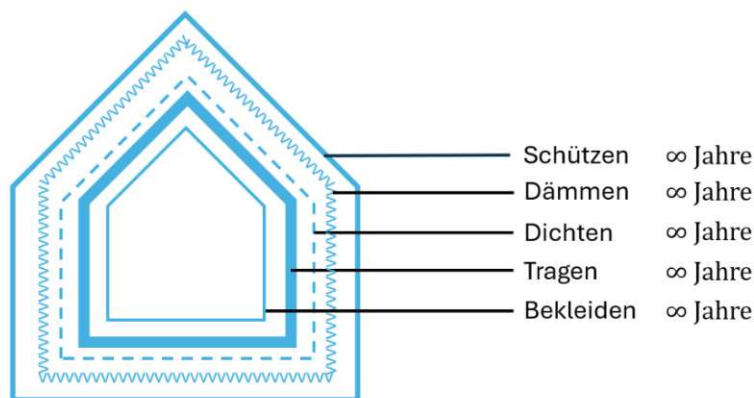


Abbildung 4-4: Baukonstruktive Schichten (Eigene Darstellung nach [94])

Schuster und Geier [24] haben in einer Stakeholderanalyse im Rahmen des Forschungsprojekts „CircularWOOD“ herausgearbeitet, dass kreislauffähige Bauteile aus einem strukturellen, dauerhaften Element in Kombination mit einfach austauschbaren Verschleißschichten bestehen. Durch einen kontinuierlichen Austausch der reversibel befestigten Verschleißschichten kann das Bauteil für die Lebensdauer des tragenden Elements funktionsfähig bleiben [24]. Auch Kanters et al. [22] heben in einer Literaturanalyse zum kreislauffähigen Bauen hervor, dass der Aufbau der Bauteilschichten anhand ihrer antizipierten Lebensdauer erfolgen sollte, um eine maximale Gebäudelebensdauer zu erreichen. Dies stellt für die Holzbaubranche aktuell noch eine große Herausforderung dar und erfordert Veränderungen im Planungsprozess und die Entwicklung statisch funktionaler und reversibler Fügmethoden [24].

#### *Nutzungsneutrale Skelettbauten*

In der Literaturanalyse wurde festgestellt, dass viele Autoren in der Holzskelettbauweise einen Schlüssel zur Trennung der funktionalen Gebäudeschichten sehen. Zusätzlich heben sie hervor, dass dadurch auch nutzungsneutrale Gebäudestrukturen entstehen, welche weiter zur

Maximierung der Lebensdauer des Gebäudes beitragen. Im Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] setzten die Autoren bei der Entwicklung eines kreislauffähigen, mehrgeschossigen Holzgebäudes auf eine Skelettkonstruktion, um das Tragwerk von der Gebäudehülle mit den Funktionen Schützen, Dämmen und Dichten und den raumgebenden Innenwänden (Bekleidung) zu trennen. Das dadurch entstehende Tragwerk ist nutzungsneutral und kann bei einer veränderten Nachfrage aufgrund der Flexibilität umgenutzt werden [95]. Auch das Forschungsvorhaben „CircularWOOD“ nennt den Skelettbau als Konstruktionsmethode, welche aufgrund der Trennbarkeit von anderen Schichten und der Flexibilität positive Grundvoraussetzungen für eine lange Nutzungsdauer liefert [71]. Für Neubauten liefert die Holzskelettbauweise umnutzungsfähige Tragwerke, welche „grundsätzlich aus wenigen statisch erforderlichen Bauteilen bestehen“ [26]. In Abbildung 4-5 [26] ist zu erkennen, aus welchen Bauteilen ein solcher Skelettbau besteht. Es ist zudem sehr gut zu erkennen, dass große zusammenhängende Grundflächen entstehen, die flexibel unterteilt werden können. Die wenigen Stützen stellen für mögliche Grundrisse kein Hindernis dar. Kanter et al [22] stellen in einer State of the Art-Analyse des kreislauffähigen Bauens ebenfalls fest, dass offene und flexible Bauweisen die zukünftige Umnutzung erleichtern und so die Lebensdauer maximieren können. Auch im „Circular Housing Report“ [5] werden nutzungsneutrale Tragwerke als zentraler Bestandteil langlebiger Gebäudestrukturen genannt. Zusätzlich werden im Rahmen des „Circular Housing Reports“ [5] folgende Parameter genannt, welche für eine zukünftige Umnutzung bereits in der Planung miteinzubeziehen sind: „(1) Sicherheit: Zutritt außerhalb der Geschäftszeiten, Zugangskontrolle, Abtrennung „öffentliche Bereiche“ zur Untervermietung, (2) Zugang zu sanitären Einrichtungen, (3) Möglichkeit zur individuellen Raumkonditionierung für Teile des Gebäudes, (3) flexible Grundausstattung, (4) Schallschutz, (5) Fluchtwege, (6) Brandschutz und (7) Standortqualitäten: z. B. zentrale Lage, Mobilität, Synergien am Standort.“ [5] Das Tragwerk kann laut „Circular Housing Report“ zu einer freien Raumdefinition beitragen, indem es weitestgehend auf Stützen und Träger reduziert wird [5].

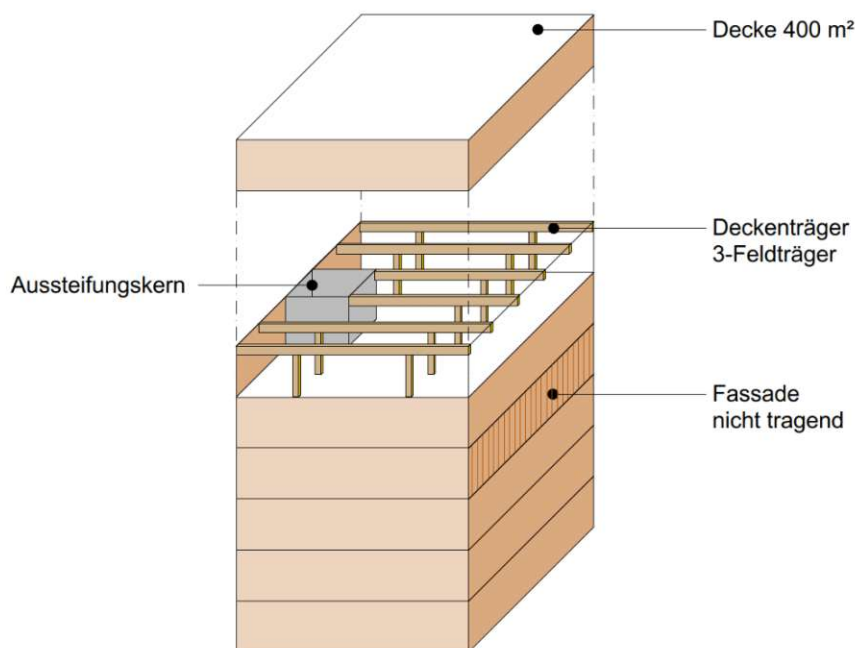


Abbildung 4-5: Statisch erforderliche Bauteile eines nutzungsneutralen Holzskelettbaus (Eigene Darstellung, nach [26])

### *Flexibilität vs. Robustheit*

Um mit den Widersprüchen des kreislauffähigen Bauens wie „Nutzungsflexibilität vs. Flächeneffizienz oder Tragwerksreserven vs. Ressourceneffizienz“ [5] umzugehen, bedarf es laut „Circular Housing Report“ einer ausführlichen Analyse des Entwurfs hinsichtlich des Standorts und der vorhergesehenen Nutzung [5]. Die Tragstruktur ist am aufwendigsten herzustellen und Änderungen sind zumeist mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden [18]. Daher ist es erstrebenswert, an der Tragstruktur über die Lebensdauer des Gebäudes möglichst wenig Reparaturen und Änderungen vornehmen zu müssen. Insbesondere bei langlebigen Gebäuden schlägt das Forschungsprojekt „Circular Housing“ [5] vor, die Robustheit der Tragstruktur zu erhöhen. Für den innerstädtischen Wohnungsbau, mit welchem sich diese Arbeit befasst, ist eine lange Nutzungsdauer anzunehmen. Laut „Circular Housing Report“ soll die Robustheit des Tragwerks vor anderen Aspekten des zirkulären Bauens wie der leichten Rückbaubarkeit bevorzugt verfolgt werden [5]. Das Werk „Sortenrein Bauen“ stellt diesen Widerspruch zwischen der maximalen Robustheit für eine möglichst lange Lebensdauer und der maximalen Wiederverwendbarkeit und Recyclebarkeit ebenfalls fest [50]. Bei konsequenter Unterteilung eines Gebäudes in baukonstruktive Schichten kann ein Gebäude jedoch so konstruiert werden, dass es andere Anforderungen je nach Schicht erfüllt. So kann ein maximal robustes Tragwerk eine lange Lebensdauer garantieren und mit einer einfach rückbaubaren und kreislauffähigen Hülle kombiniert werden, um Flexibilität und Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten [94]. Die Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] und „CircularWOOD“ [71] beschreiben nutzungsneutrale Tragwerke mit vielfältiger Umnutzungsmöglichkeit als Lösung für langlebige Gebäude. Dies beinhaltet, wie auch bei der Unterteilung des Gebäudes in baukonstruktive Schichten, eine strikte Trennung des Tragwerks von der Hülle und sämtlichen raumgebenden Innenbauteilen.

### *Fazit zur Maximierung der Lebensdauer des Tragwerks*

Grundsätzlich wird in der untersuchten Literatur die Meinung vertreten, dass eine lange Gebäudelebensdauer hauptsächlich von der Lebensdauer des Tragwerks abhängt. Um dieses möglichst langlebig zu gestalten, werden einerseits eine erhöhte Robustheit [5] und andererseits eine Trennung des Tragwerks von den übrigen baukonstruktiven Schichten des Gebäudes vorgeschlagen. Durch die Trennung werden zum einen Reparaturarbeiten an anderen Schichten vereinfacht sodass die maximale Lebensdauer des Tragwerks ausgenutzt werden kann [50], zum anderen kann durch die Trennung des Tragwerks und der raumgebenden Innenwände eine einfache Umnutzung durch Umbau der Grundrisse erfolgen. Auch dies führt zur Ausnutzung der maximalen Lebensdauer des Tragwerks [26, 71]. Sowohl bei dem Ansatz die Robustheit zu erhöhen, als auch bei dem Ansatz, die zukünftige Umnutzungsfähigkeit des Gebäudes in die Tragwerksplanung miteinfließen zu lassen, scheint es sinnvoll, gewisse Tragwerksreserven einzuplanen [5]. Diese erhöhen einerseits die Robustheit und ermöglichen andererseits bei der Umnutzung geringere Einschränkungen bei der Belastung und vereinfachen Aufstockungen. Die ideale Bauweise zur Trennung des Tragwerks von anderen baukonstruktiven Schichten scheint der Skelettbau zu sein. Dem Prinzip der Trennung der baukonstruktiven Schichten folgend scheint auch eine Scheiben- oder Tafelbauweise mit tragenden und aussteifenden Innenwänden und einer nicht tragenden Fassade möglich. Zudem ist es unerlässlich, eine genaue Standort- und Stakeholder-Analyse vor Planungsbeginn durchzuführen, um in der Planungsphase Maßnahmen für eine maximale Kreislauffähigkeit ergreifen zu können. So bietet es sich im Sinne der Kreislauffähigkeit an, bei einem Wohngebäude in einer sehr guten Lage eine Maximierung der Lebensdauer

anzustreben, während bei kurzlebigen Gebäuden wie vorläufigen Unterkünften die Demontage und Wiederverwendbarkeit an einem anderen Ort in der Planung verfolgt werden könnte.

#### 4.4.2. Reparaturfähigkeit mehrgeschossiger Holzgebäude

In der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass ein Großteil der gesichteten Werke davon ausgeht, dass die maximale Lebensdauer des Gebäudes von der Lebensdauer des Tragwerks abhängig ist [5, 18, 26, 71]. Gegenüber dem Tragwerk weisen andere Teile des Gebäudes eine deutlich verringerte Lebensdauer auf. Im Abschnitt 3.4.1 werden die Lebensdauern der einzelnen Scherschichten erläutert. Die Reparaturfähigkeit der Scherschichten oder baukonstruktiven Schichten ist daher unerlässlich, um die Lebensdauer des Tragwerks ausnutzen zu können. Die Trennbarkeit zwischen den Scherschichten gilt in der Literatur als Grundvoraussetzung für kreislauffähiges Bauen. In „Circular Housing“ [5], „Sortenrein bauen“ [50, 94], „Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten“ [18] und „CircularWOOD“ [71] wird die Trennbarkeit zwischen den Scherschichten als Grundvoraussetzung für die Reparaturfähigkeit aufgeführt. Im folgenden Abschnitt werden Konzepte aus der Literaturrecherche erörtert, welche die Reparaturfähigkeit im Sinne der Kreislaufwirtschaft erhöhen. Es werden die Felder technische Gebäudeausstattung, Gebäudehülle und Oberflächen beziehungsweise raumgebende Komponenten behandelt. Vorab ist festzuhalten, dass im Zuge der Literaturrecherche festgestellt wurde, dass die Reparaturfähigkeit in allen Werken zumindest angeschnitten und erwähnt wird, jedoch häufig nur theoretisch behandelt wird und häufig keine konkreten Maßnahmen zur Steigerung der Reparaturfähigkeit genannt werden.

#### *Reparatur und Austausch der technischen Gebäudeausstattung*

Nach dem Konzept der Scherschichten ist die Haustechnik (Services) mit 7 bis 15 Jahren am häufigsten auszutauschen [18, 50, 94]. Es muss jedoch erwähnt werden, dass nicht alle Haustechnik-Komponenten bereits nach 15 Jahren ausgetauscht werden müssen. So können insbesondere Sanitärleitungen (30 – 50 Jahre), Trinkwasserleitungen (30 Jahre) und Elektroleitungen (30 Jahre) deutlich länger genutzt werden [59]. Neben dem Austausch nach im Schnitt 7 – 30 Jahren sind jedoch bei vielen Haustechnikkomponenten regelmäßige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten notwendig. Um die Haustechnik reparaturfähig zu gestalten, wurden in der Literatur verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen. Grundsätzlich folgt aus dem Konzept der Scherschichten eine Trennung zwischen Haustechnik und anderen Scherschichten. Wobei die technischen Geräte wie Heizung, Lüftung etc. für gewöhnlich gut zugänglich für Wartungsarbeiten in eigens vorgesehenen Räumlichkeiten untergebracht sind. Folgende Maßnahmen lassen sich der Literatur zur Reparaturfähigkeit der technischen Gebäudeausrüstung entnehmen:

- (1) Zugänglichkeit: Zunächst ist es wichtig, die Leitungsführung so von anderen Scherschichten zu trennen, dass Wartung, Reparatur und Austausch möglich sind, ohne andere Scherschichten, insbesondere die langlebigen wie Tragwerk und Hülle, zu beschädigen [5, 18]. Dafür eignen sich vom Tragwerk und der Hülle entkoppelte Schächte (siehe Abbildung 4-6) [26]. Die Platzierung der Schächte sollte mit dem Hintergedanken der Nutzungsflexibilität erfolgen und an Stellen erfolgen, die auch bei einer späteren Nutzungsänderung einerseits zugänglich sind und andererseits nicht frei im Raum stehen [26]. In Abbildung 4-6 [26] ist die Platzierung der vertikalen Leitungsführung dargestellt. Der Hauptschacht verläuft in einem der Außenwand

raumseitig vorgesetzten Schacht, sodass er stets von Innen zugänglich ist, mit keinen Bauteilen des Tragwerks oder der Hülle fest verbunden ist und bei einer Nutzungsänderung nicht im Weg ist. Die Einzelstränge sind in den nicht tragenden Innenwänden in Stütznähe untergebracht, sodass auch bei einer Änderung hin zu einem offenen Grundriss ohne Innenwände ein Wandstummel an der Stütze zur Leitungsführung angebracht werden kann, ohne den Grundriss zu beeinträchtigen. Die von den Schächten abzweigenden horizontalen Leitungen sollten für eine Steigerung der Nutzungsflexibilität so kurz wie möglich gehalten werden [26]. Um die Zugänglichkeit der horizontalen Leitungen zu gewährleisten, sollten diese im Wandbereich in Vorsatzschalen und im Deckenbereich in unterseitig abgehängten Decken geführt werden [26, 57]. Leitungen im Bereich des Fußbodenaufbaus sind aufgrund der schlechten Zugänglichkeit zu vermeiden [26], weshalb für eine gesteigerte Reparatur- und Umbaufähigkeit Deckenheizungen bevorzugt anstelle Fußbodenheizungen eingebaut werden sollen [26]. Grundsätzlich soll die horizontale Leitungslänge möglichst gering gehalten werden. Dementsprechend sind die Leitungsschächte zu platzieren [26].

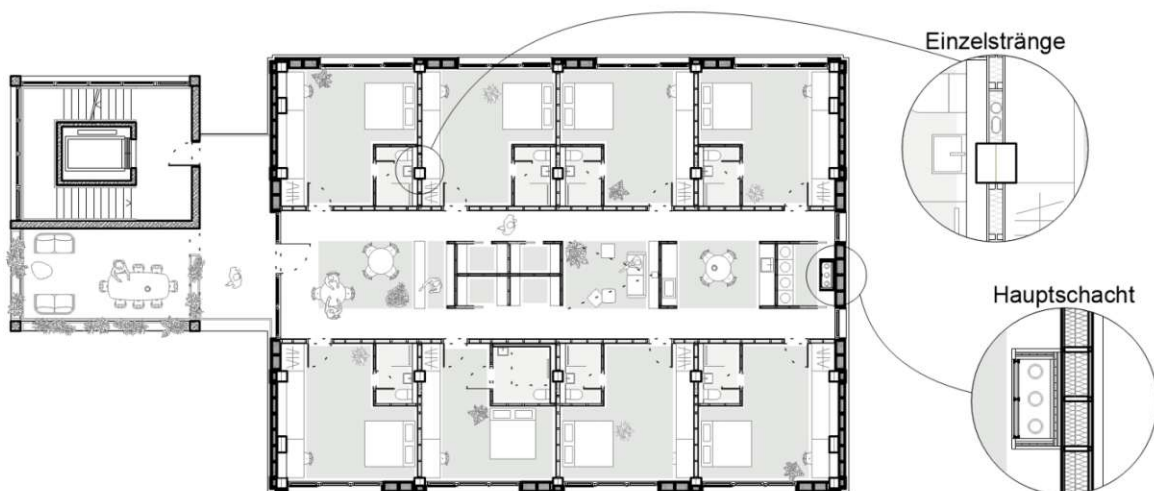


Abbildung 4-6: Vertikale Leitungsführung in Schächten (aus [26])

- (2) Technikreduktion: Bei der technischen Gebäudeausrüstung kann das Prinzip der Suffizienz sinnvoll zur Technikreduktion angewandt werden. Eine natürliche Belüftung kann in einem Großteil des Gebäudes einer mechanischen Lüftung vorgezogen werden. Die mechanische Lüftung ist im Wohnungsbau nur in Bädern, Küchen und fensterlosen Räumen notwendig [26]. Durch Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz wie Nachtlüftung, ausreichende Speichermassen, Sonnenschutz und entsprechende Dämmung der Gebäudehülle kann häufig auf eine aktive Kühlung verzichtet werden [26]. Dies erfordert eine Betrachtung und Analyse durch eine thermische Gebäudesimulation, wobei besonders im Hinblick auf die Langlebigkeit stets klimatische Veränderungen durch den Klimawandel mit einbezogen werden sollten [26].
- (3) Vereinfachung: Eine Vereinfachung und Reduktion der Leitungen kann zur besseren Wartungs- und Austauschfähigkeit beitragen. Durch eine dezentrale Warmwassererzeugung kann auf Trinkwarmwasserleitungen in den Schächten verzichtet werden [26]. Dabei müssen geringe Effizienzeinbußen in der

Warmwassererzeugung gegenüber einem zentralen System in Kauf genommen werden [26].

- (4) Flexibilität: Die Versorgungsschächte, Durchbrüche und Technikräume sollten in der Planung bereits so dimensioniert sein, dass sie auch bei einer zukünftigen Nutzungsänderung noch eine ausreichende Versorgung sicherstellen [26]. Auch die Wärmeerzeugung sollte flexibel auf eine zukünftige Nutzungsänderung reagieren können. Luft-Wasser-Wärmepumpen können beispielsweise bei einem erhöhten Heizwärmebedarf mit geringem Aufwand umgebaut werden, während Erdwärmesonden in diesem Fall aufwendige Nachbohrungen erfordern [26].

### *Reparaturfähigkeit und Austauschbarkeit der Gebäudehülle*

Die Gebäudehülle vereint die baukonstruktiven Funktionen Schutz vor Wind und Wasser, Dämmen und Dichten (siehe Abbildung 4-4) [94]. Die Literatur stimmt überein, dass die Gebäudehülle eine deutlich geringere Lebensdauer aufweist als das Tragwerk [5, 18, 50, 71, 94]. Die geringere Lebensdauer wird durch Verschleiß (mit der Zeit nachlassende Schutzfunktionen), veränderte regulatorische Anforderungen (z. B. erhöhte Energiestandards) oder fortschreitende technische Möglichkeiten (z. B. erhöhte Luftdichtheit) verursacht [71]. Um auf diese Szenarien reagieren zu können, ist es wichtig, die Gebäudehülle reparaturfähig und austauschbar zu gestalten. Die in der Literatur behandelten Maßnahmen werden im Folgenden vorgestellt.

- (1) Trennung der Tragstruktur und Hülle: In der untersuchten Literatur zum kreislauffähigen Bauen wird für eine reparatur- und austauschfähige Hülle grundsätzlich, wie auch bereits beim Tragwerk und der Haustechnik, die Trennung zwischen den Scherschichten vorausgesetzt [5, 18, 50, 71, 94]. Dabei ist insbesondere die Verbindung zwischen Hülle und Tragwerk im Fokus. Zum einen sollten Hülle und Tragwerk konstruktiv voneinander getrennt sein, zum anderen sollte die Verbindung trennbar ausgeführt werden [5, 18, 50, 71, 94]. Dieser Argumentation folgend bietet ein Skelettbau die besten Voraussetzungen dafür, da Tragwerk und Hülle einfach voneinander zu trennen sind [71]. Im Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] wird als Tragwerk ein Holzskelettbau mit getrennter Hülle ausgewählt, für die Hülle wurden drei Varianten untersucht: eine vorgestellte Vorhangfassade sowie zwei eingestellte Lochfassaden, die jeweils außen beziehungsweise innen bündig mit den Stützen abschließen. Die Wahl fällt hierbei auf eine außen bündig eingestellte Fassade. Sie lässt sich gut montieren und demontieren, bietet günstige Lasteinleitung in das Skelett mit einer geringen Anzahl an Verbindungsmitteln sowie eine fast durchgängig außenliegende Gebäudehülle, Dichtheits- und Dämmebene [26]. Die 5,0 m breiten Felder zwischen den Randstützen können mit verschiedenen Fassadenmodulen konfiguriert werden. Die Bereiche vor dem Randunterzug und den Randstützen werden später mit einem Fertigteil ergänzt [26]. Durch die Tragwerks- und Fassadenwahl sind diese konstruktiv voneinander getrennt. Da die Fassade nicht tragend ist und auf dem Randträger steht, kann diese mit wenigen wieder lösbaren Verbindungsmitteln zur Lagesicherung befestigt werden, wodurch die einzelnen Fassadenelemente schadensfrei und mit geringem Aufwand demontierbar und damit austauschbar sind [26]. Durch den Austausch einzelner Fassadenbauteile kann die Fassade auf dem neuesten Stand der Technik bleiben, bei Verwitterung erneuert werden oder bei einer Umnutzung angepasst werden.



- (2) Trennung der bauphysikalischen Schichten: Im ursprünglichen Konzept der Scherschichten (siehe Abbildung 3-2) wird die Hülle als eine gesamte Schicht definiert. Im Buch „Sortenrein bauen“ [94] wird auf die Unschärfen diesbezüglich hingewiesen und stattdessen eine baukonstruktive Unterteilung der Scherschichten nach den zu erfüllenden Funktionen vorgeschlagen (siehe Abbildung 4-4). Hier wird nicht mehr die Hülle als eigene Schicht betrachtet, sondern einzelne Komponenten der Gebäudehülle mit den Funktionen Wind-, Wasser- und Luftdichtheit sowie Dämmen als untereinander trennbare, sogenannte baukonstruktive Schichten definiert [94]. Dies ist aus Sicht der Autoren notwendig, um zu präzisieren, dass auch innerhalb der definierten Scherschichten gut geplante und trennbare Schnittstellen entstehen müssen, wenn man kreislauffähig bauen möchte [94]. Ähnliches wird in den Arbeiten „CircularWOOD“ [71] und „Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten“ [18] festgestellt. Es wird aufbauend auf dem Prinzip der Scherschichten festgestellt, dass die einzelnen Komponenten des Bauteils Gebäudehülle rückbaubar und austauschbar ausgeführt werden müssen [18, 71]. Dabei sind vor allem die Trennbarkeit innerhalb des Bauteils sowie die Zugänglichkeit ausschlaggebend, da so die weniger langlebige, schadhafte oder nicht mehr dem Stand der Technik entsprechende Komponente ohne Beschädigung der benachbarten Komponenten ausgetauscht werden kann [18, 71]. Auch im Forschungsprojekt „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] wurde das oben beschriebene Fassadenbauteil als additives System, bestehend aus lösbaren Bauteilelementen und Komponenten geplant [26]. Dafür wird ein Holztafelbauelement mit einem schichtweisen Aufbau gewählt. Hier geben die Autoren keine weiteren Details an, welche Verbindungsmittel zum Fügen der Komponenten genutzt wurden. Da es sich jedoch um ein nicht tragendes Bauteil handelt, sind die Anzahl der Verbindungsmittel und die Anforderungen an diese geringer als bei einer tragenden Außenwand. Die Autoren des Forschungsvorhabens geben jedoch im Rahmen der Untersuchung nicht tragender Innenwände mögliche schadensfrei lösbare Befestigungen für sichtbare Oberflächen an (siehe Abbildung 4-7). Diese können für die raumseitige Sichtoberfläche des Fassadenbauteils genutzt werden. Die Schichten können mit den bekannten, schadensfrei lösbaren Fügemethoden (siehe Kapitel 3.5.1) verbunden werden. Durch den Bauteilaufbau aus trennbaren Komponenten können auch ohne den Ausbau des Fassadenbauteils einzelne baukonstruktive Schichten, beispielsweise die Dämmebene, ausgetauscht werden. In diesem Fall werden die davorliegenden Schichten gelöst, abgenommen und nach dem Austausch der Dämmung wieder befestigt. Da die Fassade zwischen den Randstützen liegt und auf dem darunterliegenden Randträger aufsteht und der darüberliegende Randträger bündig mit dem Element abschließt, sind alle Komponenten der Fassade stets erreichbar. Allerdings bleibt anzumerken, dass Bauteilkomponenten auf der Innenseite der Holztafelbaukonstruktion nur erreichbar sind, wenn der Fußbodenaufbau und gegeben Falls die Deckenuntersicht entfernt werden, da der Aufbau des Fassadenelements die Sekundärstruktur des Gebäudes durchstößt.

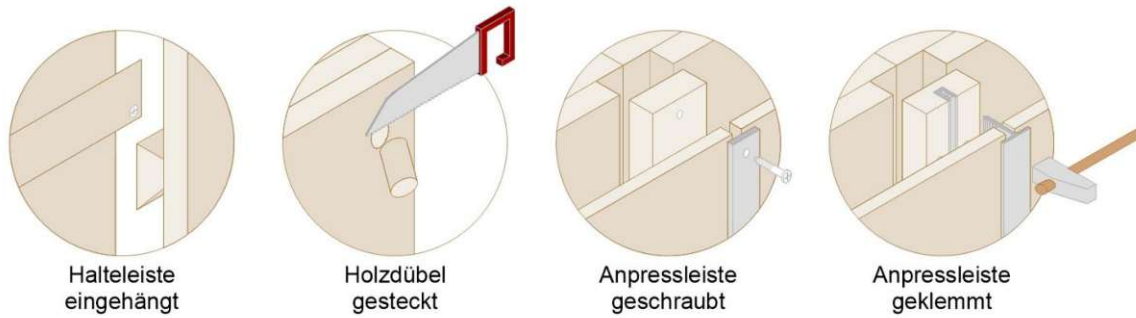


Abbildung 4-7: Lösbare Verbindungen für sichtbare Oberflächen (aus [26])

- (3) Dachkonstruktion: Neben der Fassade ist das Dach ebenfalls Bestandteil der Hülle. Hier ist eine Trennung zwischen Gebäudehülle und Tragwerk nicht möglich. Im mehrgeschossigen Holzbau ist das Flachdach die übliche Wahl für die Dachkonstruktion. Da eine Trennung von Tragkonstruktion und Gebäudehülle für ein Flachdach nicht funktioniert, muss das Dach mit schadensfrei trennbaren Schichten, welche nach ihrer Lebensdauer angeordnet sind, konstruiert werden. Das heißt, dass insbesondere auf verklebte oder verschweißte Abdichtungen und verklebte Aufdachdämmung verzichtet werden sollte. Im Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] haben die Autoren sich für einen Kaltdachaufbau über dem tragenden Deckenbauteil entschieden, da sie für das Warmdach keinen zufriedenstellenden, rückbaufähigen Bauteilaufbau erarbeiten konnten. Die Autoren gehen hier nicht näher auf die Gründe ein. Um das Tauwasserproblem zu beheben, welches mit dem Kaltdachaufbau entsteht, schlagen sie vor, die Dämmstärke zu erhöhen [26]. Im Werk „Sortenrein Bauen“ [49] werden Konzepte für rückbaubare Flachdachaufbauten in Holzbauweise vorgestellt. Die sortenreine Trennbarkeit der Baustoffe und Komponenten steht dabei im Fokus und wird durch trockenes Verlegen oder Klemmen der einzelnen Schichten erreicht. Zudem wird bei der Dämmung auf Schaumglasplatten gesetzt, welche aus dem Downcycling von Glasresten entstehen [96]. Aufgrund der hohen Dauerhaftigkeit kann die Dämmung nach dem Rückbau wiederverwendet werden [96]. Auch im Buch „Urban Mining Index“ [21] wird darauf hingewiesen, dass insbesondere verklebte oder verschweißte Abdichtungen in der Dachkonstruktion besonders hinderlich für einen sortenreinen Rückbau sind. Die im Rahmen des Buchs entwickelten Aufbauten wurden für einen einfachen Rückbau optimiert, indem die Komponenten lose verlegt werden. Eine Auflast in Form von Kies verhindert ein Aufschwemmen und ein Abheben durch Windsog [21]. Der so entstandene Dachaufbau kann mit geringem mechanischen Aufwand rückgebaut werden [21].

Die untersuchte Literatur liefert mit der Trennbarkeit der Scherschichten ein grundlegendes Konzept, wie eine kreislauffähige und reparaturfähige Gebäudehülle entstehen kann. Aus diesem Konzept lässt sich schließen, dass sich eine reparaturfähige und austauschbare Gebäudehülle leichter umsetzen lässt, wenn diese vom Tragwerk getrennt ausgeführt wird. Eine nicht tragende, eingestellte Fassade lässt sich sowohl reparieren, indem die Komponenten additiv und lösbar zu dem Fassadenbauteil gefügt werden, als auch austauschen, indem ein ganzes Fassadenelement vergleichsweise einfach und schadensfrei vom Tragwerk gelöst und herausgenommen werden kann. Dadurch eignen sich die Fassadenelemente sowohl für die Wiederverwendung als Bauteil als auch für die Wiederverwendung oder Verwertung einzelner Komponenten und Baustoffe. Zur

Reparaturfähigkeit bleibt anzumerken, dass die innenliegenden Bauteilschichten von den Fußboden- und Deckenaufbauten im ausgebauten Zustand verdeckt sind und somit das Entfernen der inneren Schicht nur mit erhöhtem Aufwand möglich ist. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass die nicht tragende Fassade einen hohen Vorfertigungsgrad, eine einfache und schnelle Montage, eine gute Reparaturfähigkeit, eine gute Demontierbarkeit und aufgrund des modularen Aufbaus eine gute Wiederverwendbarkeit bieten kann. Die Trennung von Gebäudehülle und Tragwerk kann bei der Dachkonstruktion nicht vorgenommen werden. Hier haben verschiedene Autoren Bauteilaufbauten entwickelt, die sich sortenrein trennen lassen. Dafür wird insbesondere auf das Verkleben oder Verschweißen der Abdichtung verzichtet.

### *Reparaturfähigkeit und Austauschbarkeit der Innenwände und Bodenaufbauten*

Auf die Anforderung an kreislauffähige Gebäude, möglichst flexible Grundrisse zu bieten, um auf veränderte Nutzungsszenarien zu reagieren, wurde bereits bei der Analyse der Langlebigkeit von flexiblen Tragwerken eingegangen. Auch wurde bereits erläutert, dass die Tragwerkswahl eines kreislauffähigen Gebäudes möglichst freie Grundrisse zulassen sollte. Der „Circular Housing Report“ [5] hält tragende und raumgebende Innenwände für ein kreislauffähiges Gebäude für eine angemessene Wahl, wenn bei der Anforderungsanalyse eine sehr lange Nutzungsdauer mit denselben Raumgrößen anzunehmen ist. Als Beispiel werden hier Gebäude in Innenstadtlagen genannt, welche für Wohnzwecke errichtet werden [5]. In diesem Fall ist für die Kreislauffähigkeit entscheidend, dass der Verschleiß der raumseitigen Oberflächen der tragenden Bauteile mit möglichst geringem Aufwand zu beheben ist [71]. Neben der Option, tragende raumgebende Bauteile zu verwenden, weist der „Circular Housing Report“ [5] auf die Option des Skelettbau hin, um große nutzungs offene Grundrisse zu erhalten und diese mit nicht tragenden Innenwänden flexibel an die nachgefragte Nutzung anpassen zu können [5]. Auch der Forschungsbericht „CircularWOOD“ [71] erwähnt die Vorteile der Holzskelettbauweise zur flexiblen Raumgestaltung und im Forschungsprojekt „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] wird ein Holzskelettbau mit nicht tragenden Innenwänden exemplarisch als zirkulärer Holzbau geplant. Dabei wurde festgestellt, dass ein Rückbau oder das Umsetzen von Innenwänden nur zusammen mit schadensfreien und punktuell rückbaubaren Fußbodenaufbauten möglich ist [26]. Folgende Punkte lassen sich für die Reparaturfähigkeit und Austauschbarkeit von Innenwänden und Fußbodenaufbauten festhalten:

- (1) Möglichkeit zum Ausbau: Um die Grundrisse des Gebäudes in Zukunft verändern und anpassen zu können, ist es von Vorteil, wenn die raumgebenden Innenwände nicht tragend sind [5, 26, 71]. Sie können dadurch im Fall einer Nutzungsänderung oder veränderter Anforderungen an die Grundrisse relativ einfach rückgebaut werden, da keine Lasten über diese Wände abgetragen werden. Der einfache Rückbau ermöglicht sehr flexible Grundrisse für verschiedenste Anforderungen (siehe Abbildung 4-8) [26]. Dafür eignen sich insbesondere Skelettbauten [5, 26, 71]. Auch Mischformen zwischen Skelett- und Schottenbauweise sind möglich. Die Anzahl der tragenden Innenwände sollte möglichst auf jene Wände reduziert werden, die auch bei einer zukünftigen Umgestaltung der Grundrisse voraussichtlich erhalten bleiben. Aus diesem Grund sollte bereits in der Planungsphase auf ein möglichst flexibles Gebäude hingearbeitet werden [5]. Ausbaufähige Innenwände sorgen für die notwendige Flexibilität des Grundrisses.



Abbildung 4-8: Flexible Grundrissgestaltung durch nicht tragende Innenwände (aus [26])

- (2) Schadensfreier und sortenreiner Rückbau: Um im Falle eines Rückbaus der Innenwände die verwendeten Bauteilkomponenten oder Baustoffe wiederverwenden zu können muss die Innenwand schadensfrei und sortenrein in die einzelnen Komponenten rückbaubar sein [26]. Daneben ist es wichtig, dass ein Rückbau möglich ist, ohne angrenzende und tragende Bauteile zu beschädigen. Im Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] wird von den Autoren festgestellt, dass sich schadensfrei rückbaubare Wohnungstrennwände mit den aktuellen Brand- und Schallschutzanforderungen in den Gebäudeklassen 4 und 5 kaum umsetzen lassen. Besonders erschwerend ist laut Autoren, dass der Fuß- und Kopfpunkt der Wohnungstrennwand an den Rohbau anschließen muss und somit den Fußbodenaufbau beziehungsweise die abgehängte Decke durchdringt [26]. Die Autoren sehen hier regulatorischen Handlungsbedarf, aber auch die Notwendigkeit, neue Konstruktionen für Innenwände mit einfach lösbaren Verbindungen und wiederverwendbaren Komponenten zu entwickeln [26]. Im Zuge der Forschungsarbeit wurden schadensfreie, lösbare Verbindungen für die äußere Bekleidung der Innenwände entwickelt (siehe Abbildung 4-7). Schadensfrei rückbaubare Innenwände ermöglichen die Wiederverwendung der Komponenten im Falle eines Ausbaus der Innenwand.
- (3) Einfache Instandhaltung: In einem kreislauffähigen Gebäude sollen auch die Innenwände einfach und mit geringem Aufwand instand zu halten, zu warten und zu reparieren sein. Die Bestandteile der Innenwand, die die Luftdichtheit, den Brand- und Schallschutz herstellen, sind im Gegensatz zu den Komponenten der Gebäudehülle deutlich weniger Temperaturschwankungen, UV-Strahlungen und Feuchte ausgesetzt. Ein regelmäßiger Austausch der Komponenten ist hier nicht zu erwarten. Die Reparaturfähigkeit würde sich jedoch bei schadensfrei aus- und rückbaufähigen Innenwänden ebenfalls ergeben. Bei der Reparaturfähigkeit der Innenwände steht insbesondere die Erneuerung der Oberflächen im Vordergrund [71].
- (4) Schadensfreie und punktuell rückbaubare Fußbodenaufbauten: In Kapitel 3.5.2 wird bereits auf die Trennbarkeit auf Bauteilebene im aktuellen Stand der Technik eingegangen. Wobei festgestellt wird, dass Deckenaufbauten aufgrund des Aufbaus, der sich durch einfaches Übereinanderschichten fügen lässt, gute Grundvoraussetzungen für eine trennbare Ausführung mitbringen. Dabei ist auf eine ungebundene Schüttung oder Beschwerung durch Platten sowie trocken verlegbare Trittschalldämmung und Estrichelemente zu achten. Je kleinflächiger die dafür verwendeten Elemente sind, desto einfacher wird ein punktueller Rückbau. Dieser erleichtert das Versetzen einer Wand oder den Austausch einer Wandbekleidung [26]. Die Umsetzung eines trennbaren Bauteilaufbaus in den Geschossdecken wird im mehrgeschossigen Wohnungsbau durch die Schallschutzanforderungen erschwert [26]. Ein Beispiel für einen kleinteilig rückbaubaren Bodenaufbau wird im

Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ entwickelt und kommt ohne Estrich aus. Er besteht aus Holzdielen (35 mm), Holzfaserdämmplatten mit Verlegeleisten und Nut- und Federverbindung (45 mm), Trittschalldämmung aus Mineralwolle (30 mm) und Lehmvollsteinen (52 mm) über dem Deckenbauteil [26]. Mit Lignotherm existiert ein Estrichelement mit einlegbarer Fußbodenheizung aus Buchenholz. Diese Elemente werden zwischen Fichtenleisten eingeschoben, sodass ein kleinteiliger und schadensfrei rückbaubarer Unterlagsboden entsteht [97].

#### 4.5. Re-Use und Recycling im mehrgeschossigen Holzbau

Ein zentraler Aspekt der Kreislaufwirtschaft ist die Wiederverwendung von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus. *„Von Wiederverwendung wird gesprochen, wenn ein Produkt erneut unter Beibehaltung seiner Produktgestalt entsprechend seinem ursprünglichen Zweck eingesetzt wird (engl.: Re-Use). Die Qualität bleibt dabei weitgehend erhalten oder wird durch einfache Aufbereitung (z. B. Reparatur, Reinigung oder Oberflächenbehandlung) wiederhergestellt.“* [21] Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten zur Wiederverwendung im mehrgeschossigen Holzbau erörtert. Dabei liegt der Fokus dieses Kapitels, wie ein Neubau in Holzbauweise im Sinne der Kreislaufwirtschaft geplant und konstruiert werden sollte, um eine zukünftige Wiederverwendung zu ermöglichen. Die Verwendung von bereits eingesetzten Bauteilen, Bauelementen oder Bauteilkomponenten im Neubau wird nicht vordergründlich behandelt.

##### 4.5.1. Ebenen der Wiederverwendung

Aus der untersuchten Literatur lässt sich erkennen, dass die Wiederverwendung auf verschiedenen Ebenen stattfinden kann. Eine von Graf et al. in „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] entwickelte Einteilung in fünf Hierarchieebenen kreislauffähiger Neubauten (siehe Abbildung 2-5) wurde von Schuster und Geier [71] um Begriffsdefinitionen aus dem „Atlas mehrgeschossiger Holzbau“ [57] ergänzt. Demnach können kreislauffähige Neubauten in folgende Hierarchieebenen eingeteilt werden:

- (1) Gebäudeebene: auf dieser Ebene werden Maßnahmen getroffen, um die Lebensdauer des Gebäudes zu verlängern [26, 71]. Auf dieser Ebene werden Maßnahmen zur Nutzungsneutralität und Umnutzungsfähigkeit umgesetzt [26]. Diese wurden in den vorhergehenden Kapiteln eingehend behandelt.
- (2) Bauteilebene: „Ein Bauteil beschreibt einen statisch-konstruktiv und geometrisch abgeschlossenen Teil eines Bauwerks, z. B. einer Außenwand, einer Geschossdecke o. ä.“ [71]. Eine zerstörungsfreie Demontage des gesamten Bauteils ermöglicht eine Wiederverwendung in einem anderen Bauwerk [26]. Als Grundvoraussetzung haben Schuster und Geier [71] einen möglichst geringen Anpassungsaufwand für die zweite Nutzung identifiziert.
- (3) Bauelementebene: „Ein Bauelement beschreibt den vorgefertigten Bestandteil eines Bauteils: So ist etwa ein vorgefertigtes Holztafelbauelement (konstruktiver) Teil des Bauteils Außenwand oder ein vorgefertigtes Brettstapeldeckenelement (konstruktiver) Teil des Bauteils Geschossdecke“ [71]. Die Grundlage für die Wiederverwendung von Bauelementen bildet die schadensfreie Trennbarkeit des Bauteils in seine Elemente. Ein systematischer, additiver und standardisierter Aufbau der Bauelemente ermöglicht eine flexible Wiederverwendung [26].
- (4) Komponentenebene: „Komponenten beschreiben Einzelteile (Holzwerkstoffplatte, Lattung, Dampfsperre, etc.) deren Verbindung Bauelemente und Bauteile bilden“ [71]. Die Komponenten sind laut Graf et al. [26] mit reversiblen Verbindungen zu

Bauelementen gefügt und lassen sich schadensfrei und sortenrein trennen. Aufgrund der geringen Komplexität der rückgebauten Komponenten eignen sich diese neben der Wiederverwendung auch für eine Weiterverwendung [26]. So kann eine Schwelle, die aus einem Holztafelbauelement einer ehemaligen Wand ausgebaut wurde, wieder als Schwelle eines neuen Holztafelbauelements genutzt werden (Wiederverwendung). Alternativ kann die Schwelle in einem beliebigen anderen konstruktiven Bauteil eingesetzt werden, beispielsweise in einem Deckenelement (Weiterverwendung).

- (5) **Materialebene:** Auf der Materialebene werden die Rohstoffe und deren Wiederverwertungspotenzial (Recycling) im biogenen und technischen Kreislauf betrachtet. Dabei ist die Sortenreinheit die Grundlage für einen geschlossenen Stoffkreislauf [26, 71].

Auch andere Autoren entwickeln ähnliche Hierarchieebenen, auf denen die Wiederverwendung stattfinden kann. Hradil et al. [98] schlagen fünf Hierarchieebenen vor, auf denen eine Wiederverwendung stattfinden kann (siehe Abbildung 4-9). Diese unterscheiden sich in Komplexität und Größe der wiederverwendbaren Teile. Dabei wird auch eine Wiederverwendung ganzer Gebäude betrachtet. Cristescu et al. [99] haben diese Hierarchieebene auf den Ingenieurholzbau angewandt, und folgende beispielhafte Einteilung erarbeitet: A: Moduluhäuser, Sporthallen, Brücken, Türme B: BSH-Rahmen, Dachstühle C: Sandwichpaneele, gebogene BSH-Träger, Deckenbalken D: Gerade Massiv- oder BSH-Träger, Holzwerkstoffplatten E: Platten [99]. Laut Hradil et al. [98] und Cristescu et al. [99] verringert sich mit der Ebene auch der Wert des Produktes. Dennoch kann es sinnvoll sein, Elemente einer höheren Hierarchieebene durch Demontage oder Rückbau in mehrere, weniger komplexe Elemente einer niedrigeren Ebene zu zerlegen [98]. Der damit einhergehende Wertverlust wird durch einen Gewinn an Flexibilität und Einsatzmöglichkeiten ausgeglichen [98]. Je komplexer und größer das Produkt ist, welches wiederverwendet werden soll, desto schwieriger und zeitintensiver ist es, ein geeignetes Projekt zu finden, bei welchem das Produkt wiederverwendet werden kann.

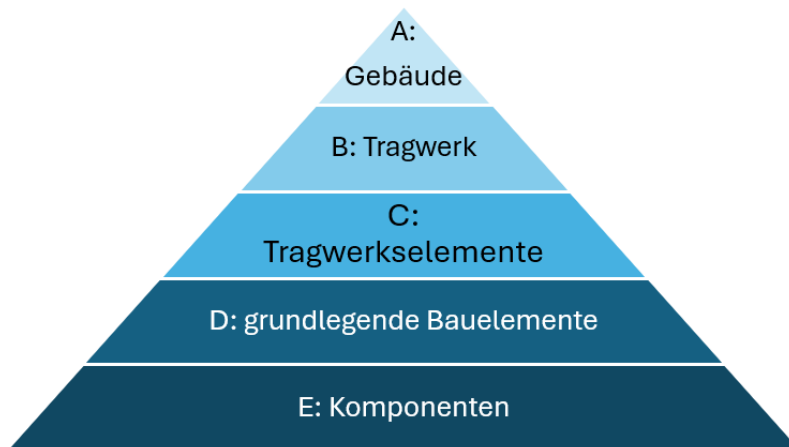


Abbildung 4-9: Re-Use-Hierarchie (Eigene Darstellung nach [99])

Die Ausführungen von Graf et al. [26], Schuster und Geier [71], Hradil et al. [98] und Cristescu et al. [99] zu den Hierarchieebenen werden im vorliegenden Kapitel verwendet, um das Kreislaufpotenzial mehrgeschossiger Holzgebäude zu untersuchen. In Abbildung 4-10 werden die zu untersuchenden Hierarchieebenen dargestellt, wobei auf eine Trennung zwischen Bauelementen und Komponenten im Zuge der Analyse verzichtet wird. Auf Gebäudeebene

findet ein Standortwechsel des Gebäudes statt. Auf Bauteilebene oder Gebäudestrukturebene werden wesentliche statisch-konstruktiv und geometrisch abgeschlossene Teile des ursprünglichen Gebäudes in einem neuen Gebäude wiederverwendet. Dazu können kleinere Reparatur- und Anpassungsarbeiten notwendig sein. Ein Bauteil besteht aus mehreren Komponenten. Auf der Komponentenebene werden die Einzelteile und Basisbausteine, die ein Bauteil ausmachen, wiederverwendet. Auf der Materialebene findet in den meisten Fällen keine Wiederverwendung mehr statt. Auf dieser Ebene wird deshalb die Recyclingfähigkeit des Materials oder Materialgemisches betrachtet. Man spricht dabei von der Wiederverwertung.

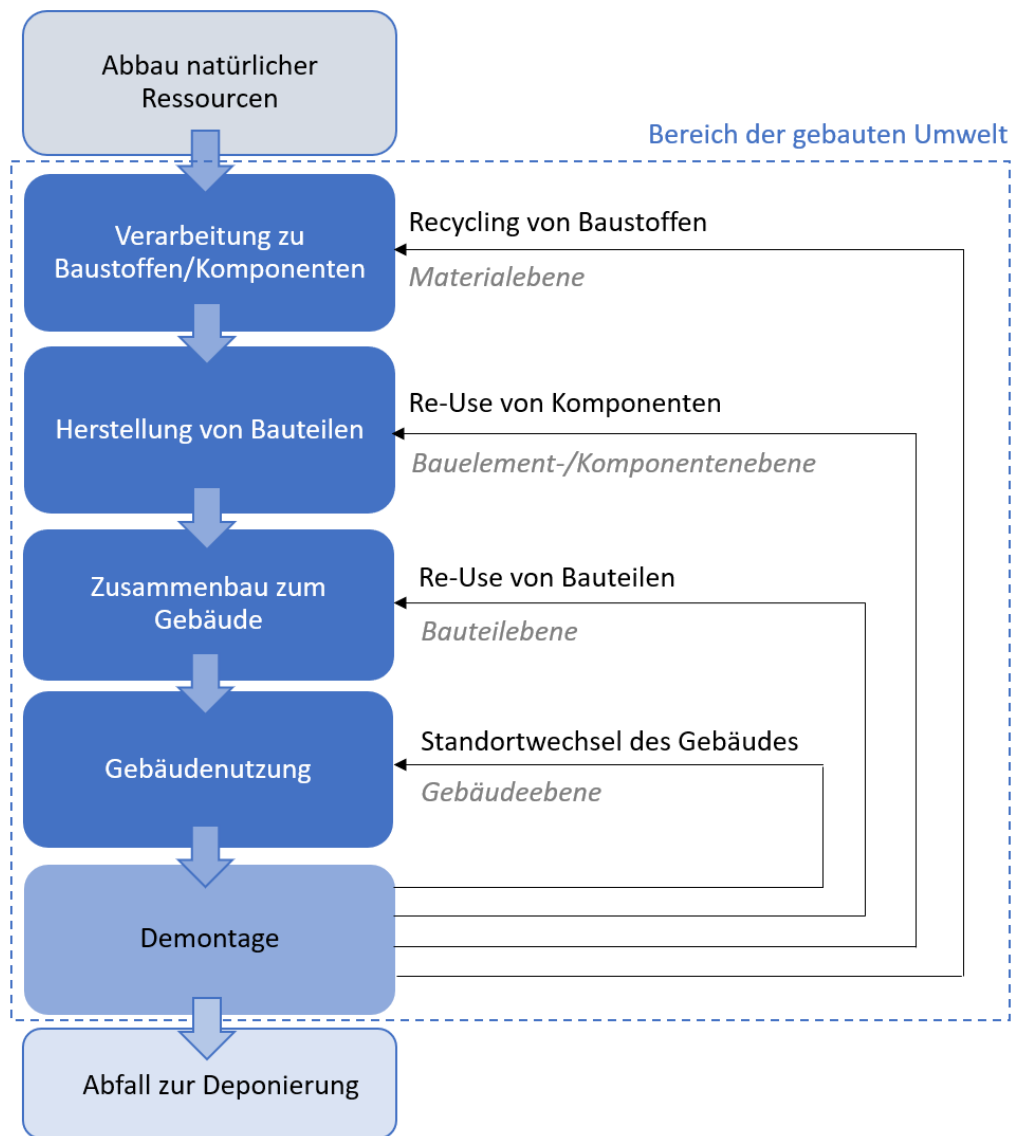


Abbildung 4-10: Re-Use-Kreisläufe (Eigene Darstellung)

#### 4.5.2. Wiederverwendungspotenzial auf Gebäudeebene – Standortwechsel von Gebäuden

Ottenhaus et al. [91] stellen fest, dass die Anpassbarkeit von Gebäuden einen zentralen Aspekt des kreislauffähigen Bauens darstellt. In diesem Zuge wird auch die Beweglichkeit als Eigenschaft kreislauffähiger Gebäude genannt. In der Hierarchie der möglichen Wiederverwendungsszenarien steht die Gebäudeebene, welche einen Standortwechsel des Gebäudes beschreibt, an höchster Stelle (siehe Abbildung 4-9). Mit der Hierarchieebene steigen die Komplexität und der Fertigungsgrad des Produktes. In den meisten Fällen gilt, dass

ein Produkt auf einer höheren Ebene einen größeren Wert besitzt als die Summe seiner Einzelteile [98]. Die Wiederverwendung auf Gebäudeebene führt demnach zum höchsten Werterhalt, der in einem zirkulären System im Falle eines Rückbaus erzielt werden kann.

#### *Fallbeispiele zur Wiederverwendung auf Gebäudeebene*

In der ausgesuchten Fachliteratur wird die Wiederverwendung auf Gebäudeebene nur von wenigen Autoren bearbeitet. Hradil et al. [98], Cristescu et al. [99], Sandin et al. [46, 100] beschäftigen sich explizit mit der Wiederverwendung auf Gebäudeebene. In Fallstudien zur Wiederverwendung auf Gebäudeebene werden in der Literatur unter anderem Bauwerke behandelt, die von vornherein einen temporären Zweck haben, wie eine temporäre Markthalle in Stockholm [46, 99]. Die temporäre Markthalle wurde so konzipiert, dass eine schadensfreie Demontage und eine Wiederverwendung möglich sind [99]. Das Wiederverwendungskonzept in Verbindung mit dem temporären Charakter des Gebäudes ermöglichte es dem Bauherren, früh nach Möglichkeiten für eine Wiederverwendung zu suchen, sodass nach vier Jahren Nutzung (2016-2020) der Rückbau (2021) und schließlich der Wiederaufbau als Sporthalle (2022) erfolgen konnten [99]. Im Zuge des Wiederaufbaus mussten kleinere Veränderungen und Anpassungen des Gebäudes vorgenommen werden, um den Anforderungen der neuen Nutzung und des neuen Standorts zu entsprechen [99]. In einer weiteren Fallstudie [100] wurde die Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit von Einfamilienhäusern nach 50 Jahren untersucht, wobei der Wiederaufbau in der geografischen Nähe zum ursprünglichen Bauplatz liegt. Es fällt auf, dass die Autoren mehrgeschossige Wohngebäude in den Fallstudien nicht behandeln.

#### *Hindernisse der Wiederverwendung auf Gebäudeebene im Kontext der betrachteten Gebäudeklasse*

Die untersuchten Fallbeispiele lassen darauf schließen, dass ein Standortwechsel des Gebäudes im Wohnbau der Gebäudeklasse 4 und 5 eine Nebenrolle spielt. Obwohl Ottenhaus et al. [91] die Beweglichkeit als Eigenschaft kreislauffähiger Gebäude nennen, zeigt die Analyse von Autoren, die sich mit der Wiederverwendung auf Gebäudeebene beschäftigen, dass in Verbindung mit lang genutzten, mehrgeschossigen Wohnbauten limitierende Faktoren für die Wiederverwendung auf Gebäudeebene auftreten. Diese limitierenden Faktoren sind im Folgenden aufgelistet:

- (1) Mit zunehmender Komplexität des Produkts wird es schwieriger, ein geeignetes Projekt für die Wiederverwendung zu identifizieren [98]. Besonders bei den im Zuge dieser Arbeit betrachteten Wohngebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 scheint dies ein bedeutendes Hindernis zu sein. Der betrachtete Gebäudetyp befindet sich vor allem in urbanen, bereits eng bebauten Gebieten mit geringem Platzangebot. Das bedeutet, dass die Gebäude zumeist exakt auf die Form des Grundstücks und die örtlichen Gegebenheiten angepasst sind und daher nicht beliebig an einem anderen Standort neu errichtet werden können. Daraus resultiert ein erheblicher und nicht vorhersehbarer Zeitaufwand für die Suche nach einem geeigneten Projekt [98, 99]. Dadurch können wiederum lange Dauern und hohe Kosten für die Lagerung der Bauteile zwischen Rückbau und Wiederaufbau entstehen.
- (2) Die räumliche Distanz des neuen Standortes zum Ursprungsprojekt stellt einen Widerspruch dar. Einerseits sollte sich der neue Standort des Gebäudes in geografischer Nähe zum Ursprungsort befinden, da dort ähnliche Wind-, Erdbeben- und Schneelasten vorliegen [100]. So kann die Tragstruktur möglichst erhalten bleiben und ohne großen Anpassungsaufwand wiederverwendet werden [100]. Zudem



verursachen weite Transportwege zum neuen Gebäudestandort hohe Kosten und die Umweltbilanz der Wiederverwendung wird nachteilig beeinflusst. Andererseits stellt diese räumliche Begrenzung eine große Einschränkung für potenzielle Projekte für die Wiederverwendung dar.

- (3) Auch Änderungen der Vorschriften können ein Hindernis darstellen [100]. Die Veränderungen können zum Einen durch eine geänderte geografische Lage (siehe (2)) verursacht werden. Zum anderen ist die Zeitspanne zwischen Neubau und Wiederverwendung dabei entscheidend, da sich in dieser die Vorschriften verändern können [100]. Je größer die Zeitspanne zwischen der ersten und zweiten Errichtung des Gebäudes, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit von veränderten Vorschriften. Diese können insbesondere den Brand-, Schall- und Wärmeschutz betreffen [100]. Die in dieser Arbeit betrachteten Wohngebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 befinden sich in der Regel in urbanen Lagen, in welchen für Wohngebäude eine Lebensdauer über 50 Jahre üblich ist.
- (4) Auch die unzureichende Möglichkeit zur Beurteilung der Tragfähigkeit und Integrität von Holzbauteilen wird als Hindernis identifiziert [100]. Es existieren noch keine einheitlichen Verfahren und Standards zur Beurteilung von wiedergewonnenem Holz [100]. Bei der Wiederverwendung auf Gebäudeebene kommt erschwerend hinzu, dass flächige Bauteile wiederverwendet werden und bei diesen keine Inspektion der Komponenten und Bauteilelemente möglich ist. So ist bei Holztafelbauwänden nicht nur die Tragstruktur nicht sichtbar, auch Dampfsperre und Dämmung können beispielsweise nicht visuell auf Schäden überprüft werden [100].

#### *Potenzial der Wiederverwendung auf Gebäudeebene*

Grundsätzlich ist die Wiederverwendung auf Gebäudeebene sehr komplex und findet bisher wenig Anwendung. Die Umsiedlung von Einfamilienhäusern, welche von Sandin et al. [100] analysiert wurde, findet nicht im urbanen Raum statt. Sie kann allerdings ein Lösungsansatz sein, um zukünftig auf Verschiebungen von Wohnraumnachfragen im ländlichen Raum zu reagieren und Leerstände zu vermeiden. Im urbanen Raum gestaltet sich die Umsiedlung von Gebäuden deutlich komplexer. Realisierte Projekte lassen sich fast ausschließlich für temporäre Gebäude finden. Beispielsweise die Umsiedlung einer temporären Markthalle aus dem Zentrum Stockholms nach Malmö [99]. Ein weiteres Beispiel dafür ist ein in den Niederlanden errichteter Ausstellungspavillon in Holzbauweise. Dieser wurde vollständig rückbaubar entworfen, um nach dem Ende der Ausstellung einen Standortwechsel zu ermöglichen [101]. Eine Umsiedlung von mehrgeschossigen Holzwohngebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 weist aufgrund der voraussichtlich langen Nutzungsdauer noch einmal eine erhöhte Komplexität gegenüber temporären Bauten auf. Als Lösungsansatz können die Gebäude nicht nur rückbaubar, sondern auch flexibel wieder aufbaubar gestaltet werden, sodass am neuen Standort beispielsweise mit einem veränderten Grundriss auf Anforderungen aus dem Grundstück reagiert werden kann. Die Bauweise mit Holzraummodulen bietet eine gute Möglichkeit zum Standortwechsel von Gebäuden. Durch den Transport sind die Abmessungen der einzelnen Raumzellen eingeschränkt und daher im Modulbau zumeist sehr ähnlich. Da das Modulgebäude aus zusammengesetzten Raumzellen besteht, sind annähernd ähnliche Achsmaße bei verschiedenen Modulgebäuden zu erwarten. Dies vereinfacht den möglichen Standortwechsel eines Modulgebäudes vom Ursprünglichen auf ein neues Grundstück.

#### 4.5.3. Wiederverwendungspotenzial auf Bauteilebene – Re-Use von Bauteilen

Autoren wie Graf et al. [26], Bertin et al. [102] und Akinade et al. [103] betrachten die Wiederverwendung auf Bauteilebene. Bei der Wiederverwendung auf Bauteilebene ist nicht der Standortwechsel des Ursprungsgebäudes das Ziel, sondern eine gleichwertige Verwendung der rückgebauten Bauteile im Neubau. Durch eine hohe Standardisierung und eine möglichst geringe Komplexität der demontierbaren Bauteile kann aus diesen auch ein anderes Gebäude als das Ursprungsgebäude entstehen [98, 102]. Dabei ist auch eine Kombination rückgewonnener und erstmalig produzierter Bauteile möglich [26]. Aus der Literaturanalyse geht hervor, dass einige Autoren den Gebäudebestand in einer Kreislaufwirtschaft als Materiallager für den Neubau begreifen [21, 91, 99]. Aus den daraus gewonnenen Rohstoffen muss dann ein beliebiger Neubau errichtet werden können. Da die Kreislaufwirtschaft parallel dazu einen größtmöglichen Werterhalt von Produkten an deren Lebensende fordert, ist die Wiederverwendung auf Bauteilebene ein End-of-Life-Szenario mit hoher Gestaltungsfreiheit und Flexibilität im Neubau und einem großen Werterhalt der rückgebauten Struktur.

#### *Hindernisse zur Wiederverwendung auf Bauteilebene*

Bei der Wiederverwendung auf Bauteilebene bleiben einige Hindernisse, die auch aus der Wiederverwendung auf Gebäudeebene bekannt sind:

- (1) Zunächst sind hier die Lager- und Transportkosten sowie die mit dem Transport verbundenen Emissionen zu nennen. Nach dem Rückbau müssen ein schadensfreier Transport und möglicherweise eine vor Witterung geschützte Zwischenlagerung sichergestellt werden [46]. Idealerweise erfolgt die Wiederverwendung ohne Zwischenlagerung. Verzögerungen des Neubaus, erforderliche Anpassungsarbeiten an den Bauteilen und Probleme bei der Suche nach einem geeigneten Nachfolgeprojekt können jedoch eine kostenintensive Zwischenlagerung verursachen.
- (2) Weiterhin stellen Veränderungen in Vorschriften auch auf der Bauteilebene ein Problem dar. Wie auch auf Gebäudeebene erfordern veränderte Anforderungen an Gebäude möglicherweise Umbauarbeiten oder Anpassungen an den Bauteilen.
- (3) Ebenso bestehen bleiben die Problematiken der nicht geklärten Beurteilung zur Tragfähigkeit von Altholz und die visuell nicht überprüfbareren Komponenten von flächigen Bauteilen.

#### *Potenzial der Wiederverwendung auf Bauteilebene*

Mehrere Autoren sehen bei der Wiederverwendung auf Bauteilebene ein Potenzial, dass standardisierte und demontierbare Bauteile, welche im Zuge eines Umbaus oder eines Rückbaus anfallen, mit möglichst geringen Anpassungen wieder in verschiedenen Umbau- oder Neubauprojekten eingebaut werden [21, 26, 71, 91, 95, 98, 99, 102, 103] und dass damit die Entwicklung von Bauteilmarktplätzen, über die ein Großteil der rückgebauten Bauteile in den Gebäudekreislauf zurückgeführt wird, einhergeht [22, 99]. Aus der Literaturrecherche können die nachfolgenden Punkte herausgearbeitet werden, die das hohe Wiederverwendungspotenzial auf der Bauteilebene für mehrgeschossige Holzgebäude ausmachen:

- (1) Die Suche nach einem geeigneten Neubauprojekt für die rückgewonnenen Bauteile ist aufgrund der geringeren Komplexität einfacher als auf Gebäudeebene. Grundsätzlich gilt: Je simpler ein Produkt gestaltet ist, desto einfacher ist es, dieses wiederzuverwenden [98, 102]. Bei der Wiederverwendung auf Bauteilebene entfällt insbesondere die Einschränkung durch die vorgegebene Grundstücksform und Kubatur

der Gebäudeebene. Da die neue Tragstruktur aus einem Pool aus wiederverwendeten Bauteilen erstellt wird, müssen auch die Lastenwirkungen auf dem Gebäudelevel nicht übereinstimmen. Natürlich kann ein tragendes Bauteil nur die Last aufnehmen, für die es ausgelegt ist. Durch Anpassung der Stützweiten können die Lasten, die von einem einzelnen Bauteil getragen werden, gesteuert werden.

- (2) Die Wiederverwendung auf Bauteilebene wird durch eine modulare Bauweise mit vorgefertigten Elementen [26, 95, 103] und gleiche, sich wiederholende Bauteile [102] begünstigt. Die modulare Bauweise ist im Holzbau weit verbreitet, und mehrgeschossige Bauwerke bestehen häufig aus sich wiederholenden Bauteilen.
- (3) Gegenüber Stahl und Beton haben Bauteile aus Holz den Vorteil, dass diese, nachdem sie ihr Wiederverwendungspotenzial in mehreren Wiederverwendungszyklen in der Technosphäre ausgeschöpft haben, in die Biosphäre überführt werden können und dort in einer Kaskadennutzung weiter eingesetzt werden können [91]. Langfristig wurde bei einer Umfrage von Hradil et al. den Werkstoffen Stahl und Holz das höchste Wiederverwendungspotenzial zugesprochen [98]. Auch andere Autoren bestätigen das gute Wiederverwendungspotenzial des Werkstoffes Holz [49, 95].
- (4) Da das Tragwerk innerhalb eines Gebäudes für einen Großteil der Bauteilmasse und grauen Energie verantwortlich ist und die Tragstruktur nach der Theorie der Scherschichten die höchste Lebensdauer aufweist, ist das Wiederverwendungspotenzial für tragende Bauteile des Tragwerks besonders hoch [98].
- (5) Das Wiederverwendungspotenzial für tragende Bauteile wird erhöht, wenn diese einfachen Lasten aufnehmen und die Bauteile wenig Komplexität aufweisen. Es gilt: Je weniger spezifisch ein Bauteil ist, desto einfacher ist es, eine anschließende Wiederverwendung zu finden [102].
- (6) Auch andere Autoren nennen ein simples Design der Tragstruktur als Schlüssel zur Wiederverwendung auf Bauteilebene [22, 46]. Hradil et al. [98] nennen in diesem Zusammenhang explizit den Verzicht auf tragende Wände. Dies deckt sich mit dem von Graf et al. [26] entworfenen Holzhybridgebäude in Skelettbauweise. Diese Bauweise wird auch für flexible und anpassungsfähige Gebäude bevorzugt. Das größte Wiederverwendungspotenzial auf Bauteilebene im Holzbau wird folglich für Tragwerke in Skelettbauweise, also Stützen und Trägern, gesehen.
- (7) Die Skelettbauweise bringt neben einer einfachen Handhabung der rückgewonnenen Tragstruktur auch die Möglichkeit der visuellen Inspektion vor der Wiederverwendung mit sich.
- (8) Auch BSP-Elementen wird aufgrund ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit ein gutes Wiederverwendungspotenzial zugeschrieben [95, 98]. Daneben wird auch für elementweise vorgefertigte Bauteile ein gutes Wiederverwendungspotenzial gesehen [22, 46, 95, 99, 103]. Darunter fallen beispielsweise Holztafelbauelemente, aber auch Betonfertigteile [98].

#### 4.5.4. Wiederverwendungspotenzial auf Bauelement- und Komponentenebene – Re-Use von Komponenten

Bei der Wiederverwendung auf Bauelement- und Komponentenebene werden die demontierten Bauteile in ein Werk zurückgeführt und dort in ihre Bauelemente und Komponenten zerlegt [26]. Bauelemente sind nach Graf et al. [26] und Schuster und Geier [71] vorgefertigte Bestandteile eines Bauteils, welche das Bauteil systematisch in Elementgruppen gliedern. Durch reversible Verbindungen zwischen den Elementgruppen können die

Bauelemente voneinander getrennt werden und eignen sich anschließend zur Wiederverwendung [26, 71]. Das Bauteil Außenwand besteht beispielsweise aus einem Tragelement, den raum- und außenseitigen Bekleidungen, Fenstern, Türen und Sonnenschutz [26]. Die Zerlegung kann im Anschluss weitergeführt werden, sodass die Bauelemente in ihre Komponenten zerlegt werden [26]. Die Komponenten sind dabei die Einzelteile, die zusammen Bauelemente und Bauteile bilden [26, 71]. Das tragende Bauelement einer Holztafelbauwand kann beispielsweise in seine Komponenten Schwelle, Rähm, Ständer und Beplankung zerlegt werden [26]. Auch auf der Komponentenebene ermöglichen reversible Verbindungen die Trennbarkeit und somit die Wiederverwendung sowie Weiterverwendung der Komponenten [26]. Die wiedergewonnenen Bauelemente und Komponenten können in der Produktion von neuen Bauteilen verwendet werden.

#### *Hindernisse zur Wiederverwendung auf Bauelement- und Komponentenebene*

Aus der untersuchten Literatur lassen sich einige Hindernisse zur Verwendung auf Bauelement- und Komponentenebene feststellen:

- (1) Mit der Zerlegung der rückgebauten Bauteile in ihre Bauelemente und Komponenten geht ein Qualitäts- und Wertverlust, hoher Arbeitsaufwand sowie ein Verlust der grauen Energie und der Emissionen aus dem erstmaligen Produktionsprozess einher [91, 98]. Der Werterhalt ist umso größer, je kleiner der Kreislauf ist, in welchem das Produkt geführt wird (siehe Abbildung 4-10), sprich je weniger Veränderungen am Ursprungsprodukt im Zuge der Wiederverwendung vorgenommen werden [91].
- (2) Neben dem Qualitätsverlust ist beim Rückbau und der Zerlegung eines Gebäudes in seine Komponenten und bei deren anschließender Wiederverwendung mit einem höheren Materialverlust als bei der Wiederverwendung auf Bauteil- oder Gebäudeebene zu rechnen [100].
- (3) Auf der Komponentenebene ist die Beurteilung der Tragfähigkeit von wiedergewonnenem Altholz weiterhin ungeklärt. Gegenüber der Wiederverwendung auf Bauteil- und Gebäudeebene können durch das Zerlegen der mehrschichtigen Bauteile in seine Einzelteile alle Komponenten und Bauelemente visuell überprüft werden.

#### *Potenzial der Wiederverwendung auf Bauelement- und Komponentenebene*

Grundsätzlich ist die Wiederverwendung auf Bauelement- und Komponentenebene gut mit anderen Ansätzen kreislauffähiger Gebäude vereinbar. Um die Bauelemente und Komponenten unbeschädigt zur Wiederverwendung zu gewinnen, ist eine schadensfreie Demontierbarkeit des Bauteils notwendig, welche auch Voraussetzung für eine Wiederverwendung auf einer höheren Hierarchieebene ist. Die schadensfreie Trennbarkeit zwischen den Elementgruppen und Komponenten ist auch Voraussetzung für die Reparaturfähigkeit des Bauteils. Daraus ergibt sich, dass eine Wiederverwendung auf Bauelement- oder Komponentenebene automatisch möglich ist, wenn andere, übergeordnete Prinzipien eines kreislauffähigen Gebäudes bei der Planung beachtet werden. Grundsätzlich ist aufgrund des größeren Werterhalts stets eine möglichst hohe Hierarchiestufe bei der Wiederverwendung anzustreben. Das heißt: Primär sollte die Wiederverwendung auf Bauteil- und Gebäudeebene stattfinden. Aus den Analysen der Wiederverwendungspotenziale wird deutlich, dass sowohl bei der Wiederverwendung auf der Bauteilebene als auch auf der Gebäudeebene Schwierigkeiten bei der Suche nach einem geeigneten Wiederverwendungsprojekt oder Probleme mit den Bauteilaufbauten aufgrund veränderter Vorschriften auftreten können. Anstelle einer langen und teuren Zwischenlagerung, bis ein

geeignetes Wiederverwendungsprojekt gefunden wird, oder einer aufwändigen und teuren Anpassung der Bauteile an die aktuellen Vorschriften, kann die Zerlegung und Wiederverwendung auf Komponentenebene erfolgen.

#### 4.5.5. Umsetzung zirkulärer Bauweise im mehrgeschossigen Holzbau

Die Planungsprinzipien zur Umsetzung einer zirkulären Bauweise nennen sich Design for Deconstruction & Reuse. Diese Prinzipien zielen darauf ab, ein Gebäude so zu planen und zu erstellen, dass dieses am Ende des Lebenszyklus rückbaubar ist und die rückgebauten Bauteile sich für eine Wiederverwendung eignen [91]. Zunächst ist festzuhalten, dass eine Wiederverwendung der rückgebauten Bauteile am Ende des Gebäude-Lebenszyklus nur möglich ist, wenn diese während ihrer Nutzungsdauer regelmäßig instandgehalten wurden und keine substantiellen Schäden aufweisen. Daher sind die Reparaturfähigkeit und insbesondere die Trennung der Scherschichten ein wichtiger Bestandteil der Wiederverwendung [91]. Um die Prinzipien der Planung zur Wiederverwendung herauszuarbeiten, werden mehrere Veröffentlichungen zum Thema Design for Deconstruction & Reuse untersucht und Gemeinsamkeiten herausgearbeitet. Die Veröffentlichungen stammen von Akinade et al. (2017) [103], Bertino et al. (2021) [104], Cristescu et al. (2020) [99], Hradil et al. (2014) [98], Kanters (2018) [22] und Ottenhaus et al. (2023) [91]. Es konnten vier übergeordnete Kategorien herausgearbeitet werden, die für die Planung eines wiederverwendbaren Gebäudes entscheidend sind. Diese werden im folgenden Abschnitt vorgestellt sowie in den Kontext des mehrgeschossigen Holzbaus eingeordnet.

##### *Simples Gebäudedesign*

Das Ziel eines simplen Gebäudedesigns ist es, die Komplexität zu verringern und so das Wiederverwendungspotenzial zu erhöhen. Vier Autoren nennen hier ein offenes und flexibles Gebäudesystem [22, 91, 98, 103]. Dies erleichtert eine Umnutzung am originalen Standort, vereinfacht aber auch den Einsatz der Bauteile in einem anderen Objekt oder die Umsiedelung des Gebäudes. Fünf Autoren stellen die Trennung der Scherschichten in Zusammenhang mit einem simplen Gebäudeentwurf [22, 91, 98, 103, 104]. Die klare Trennung funktionaler des Gebäudes in funktionale Einheiten stellt deren Unabhängigkeit voneinander sicher und erleichtert einen Rückbau und erhöht die Wiederverwendung in einem anderen System. Sechs Autoren sehen eine Reduktion der Bauteiltypen sowie der gesamten Anzahl an Bauteilen als hilfreich [22, 91, 98, 99, 103, 104]. Eine geringe Anzahl an Bauteiltypen sorgt für Wiederholung und Ähnlichkeit in den Bauteilen. Dies vereinfacht die Planung für die Wiederverwendung. Eine Reduktion der Gesamtanzahl der Bauteile erleichtert die Logistik des Rückbaus und der Wiederverwendung. Ebenfalls sechs Autoren stellen fest, dass eine modulare Bauweise und Vorfertigung die Chancen der Wiederverwendbarkeit erhöhen [22, 91, 98, 99, 103, 104]. Eine modulare Bauweise bedeutet, ein System (Gebäude, Tragwerk) aus in sich abgeschlossenen und durchdacht miteinander verbundenen sowie sich wiederholenden Standardelementen (Bauteile, Bauelemente, Komponenten) zusammenzufügen (siehe Abbildung 4-11) [105]. Die Standardelemente können vielseitig miteinander kombiniert werden und erhöhen so das Wiederverwendungspotenzial. Eine Vorfertigung bedingt bereits während der Herstellung die Unterteilung eines ganzen Bauteils in kleinere transportierbare und handhabbare Standardelemente. Drei Autoren nennen in diesem Zusammenhang auch die Standardisierung [91, 99, 103]. Durch regelmäßige Grundrisse, Raster, Formen und Abmessung entsteht Wiederholung in den Standardelementen, sodass die Planung für die Wiederverwendung stark vereinfacht wird. Bertin [102] hebt zudem hervor, dass bei der Planung des Tragwerks

einfach belastete Bauteile (z. B. reine Druckbelastung) angestrebt und komplexe Lastkombinationen (z. B. Biege- und Axialbelastung) vermieden werden sollen.

Einige Grundprinzipien des simplen Gebäudedesigns sind unabhängig von der Materialität des Gebäudes. Ein offenes und flexibles Gebäudesystem ist maßgeblich von der Wahl der Konstruktionsweise abhängig und kann gut durch ein Skeletttragwerk erreicht werden. Die Verringerung der Bauteiltypen, die Wiederholung von Größen und Formen sowie die Standardisierung der Grundrisse und Raster werden maßgeblich von architektonischen Vorgaben beeinflusst. Andere Prinzipien jedoch lassen sich besonders gut in Holzbauweise realisieren. Das gilt insbesondere für die Modularität und Vorfertigung, welche bereits flächendeckend den Stand der Technik im mehrgeschossigen Holzbau darstellen. Auch bei der Trennung der Scherschichten bietet der Holzbau gute Grundvoraussetzungen, da bereits vielschichtige Bauteile, mit Bauteilschichten mit unterschiedliche Funktionen verwendet werden.

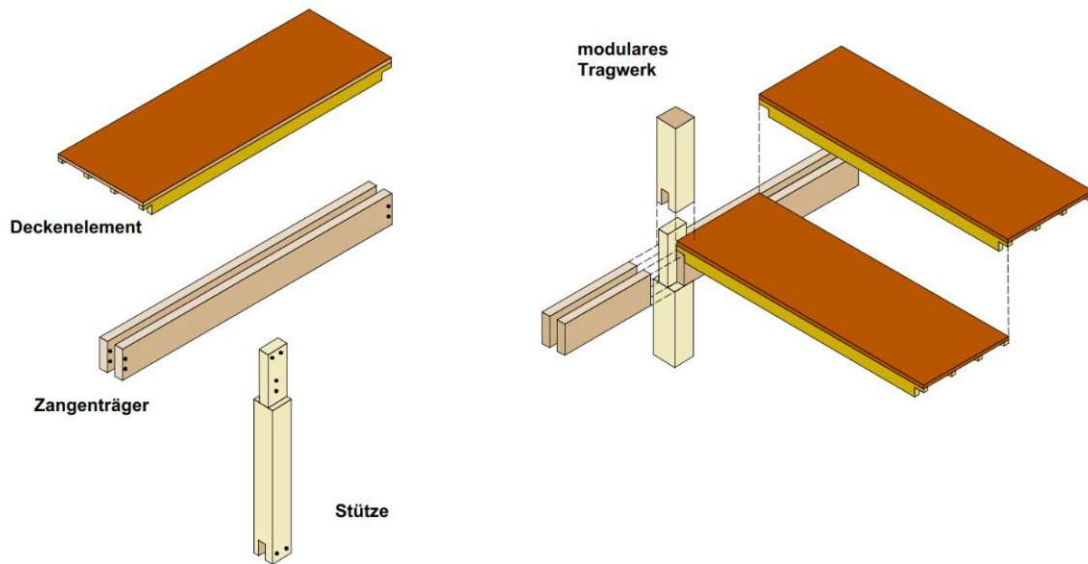


Abbildung 4-11: Standardisiertes und modulares Skeletttragwerk in Holzbauweise (Eigene Darstellung nach [26])

Das Ziel eines einfachen Gebäudedesigns lässt sich im Holzbau gut durch die Skelettbauweise umsetzen. Sie ermöglicht ein offenes, flexibles Gebäude, bedingt eine Trennung des Tragwerks von anderen Scherschichten wie Gebäudehülle und Haustechnik. Mit ihr lässt sich auch die Anzahl der Bauteile reduzieren, indem ein standardisiertes, modulares Skeletttragwerk entwickelt wird. Außerdem erfüllen sie die Anforderung, dass die tragenden Bauelemente einfachen Belastungen ausgesetzt sind.

#### *Einfach lösbare Verbindungen*

Grundlage für einen Rückbau mit anschließender Wiederverwendung ist die schadensfreie Lösbarkeit der Verbindungen zwischen den Bauteilen. Aus der Literaturrecherche werden vier Grundprinzipien für die Lösbarkeit der Verbindungen herausgearbeitet. Drei Autoren stellen fest, dass die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel entscheidend für einen einfachen Rückbau ist [22, 91, 99]. Zwei Autoren erwähnen die Reduktion der Anzahl und Arten von Verbindungsmitteln [91, 103]. Sechs Autoren verweisen auf die einfache Demontierbarkeit der Verbindungsmittel [22, 91, 98, 99, 103, 104]. In diesem Zusammenhang werden zum Teil konkrete Maßnahmen wie der Verzicht auf Verklebungen und die Wahl mechanischer

Verbindungsmittel genannt [91]. Zwei Autoren werden noch genauer und empfehlen die Verwendung von Schraubverbindungen [103] oder verschraubten Bolzen [22] anstelle anderer mechanischer Verbindungsmittel zu verwenden. Zwei Autoren halten außerdem fest, dass eine Demontage mit handelsüblichen Werkzeugen und Geräten möglich sein sollte [22, 91]. In einer vertieften Literaturrecherche zur Lösbarkeit von Verbindungsmitteln im Holzbau kann folgende Einteilung getroffen werden: Klassische zimmermannsmäßige Verbindungen sind bei geringen zeit- und feuchteabhängigen Veränderungen normalerweise wieder rückbaubar, allerdings schränken die Kerben und damit verbundenen Querschnittsschwächungen die Wiederverwendbarkeit ein [91, 98]. Formschlüssige Kontaktverbindungen wie Treppenversätze, Fingerzinken, Schubnocken und Passverzahnungen mit Kerbflanken sind größtenteils schadensfrei lösbar und eignen sich insbesondere in Verbindung mit einer Ausführung aus BSP, LVL, BSH oder Buchenfurnier gut für eine Wiederverwendung (z. B. siehe Abbildung 4-12) [95].

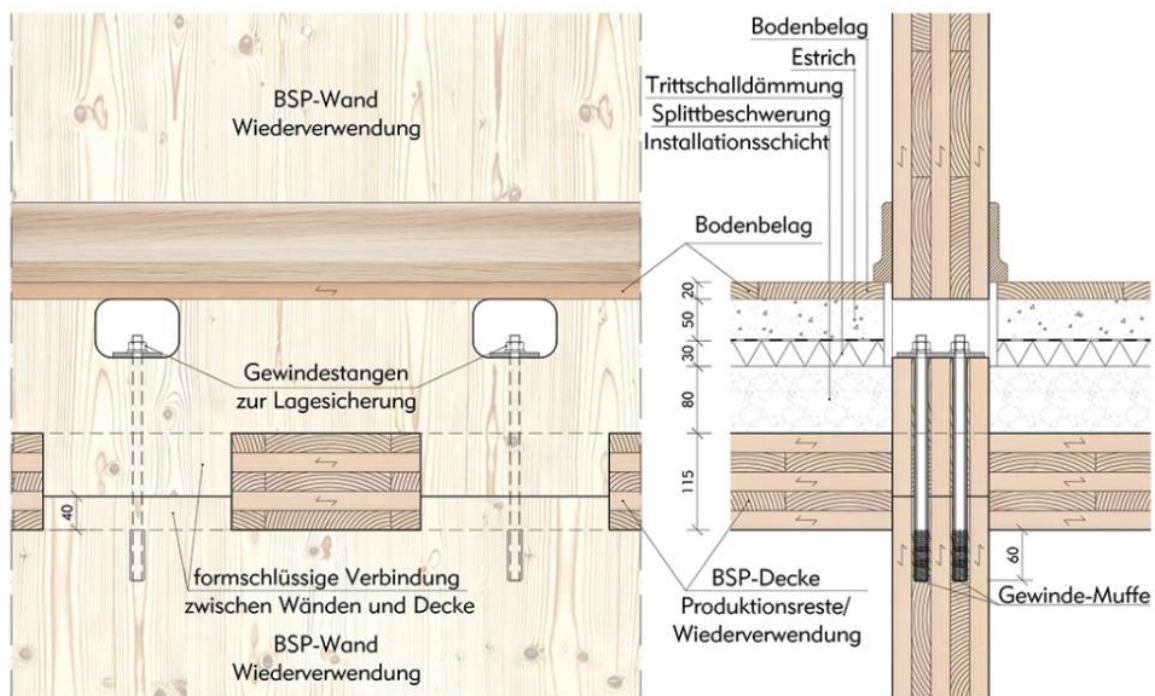


Abbildung 4-12: Reversibler Wand-Decken-Stoß mit Schubkraftübertragung über Fingerzinken und Zugkraftübertragung mittels axial beanspruchter Gewindestangen (aus [95])

Grundsätzlich ungeeignet und nur unter großer Beschädigung lösbar und damit nicht wiederverwendbar sind Verklebungen [98]. Bei mechanischen Verbindungsmitteln wird zwischen axial und lateral belasteten Verbindungsmitteln unterschieden. In allen Fällen gelten Nägel und Klammern als nicht schadensfrei lösbar. Eine Demontage ist nur mit hohem Aufwand und unter Beschädigung möglich [91, 98]. Unter lateraler Belastung fallen auch Holzschrauben in diese Kategorie [91, 98]. Bei rein axialer Belastung gelten Holzschrauben als häufig schadensfreie oder mit geringer Beschädigung lösbare Verbindungsmittel, wobei die Wiederverwendbarkeit durch die Schraubenlöcher eingeschränkt ist. Hinzu kommt, dass der Drehmomentwiderstand der Holzschrauben häufig nicht ausreicht, um dem Ausschraubvorgang standzuhalten [91, 98]. Bei lateral belasteten mechanischen Verbindungsmitteln gelten Dübel als häufig schadensfrei oder mit geringer Beschädigung

lösbar. Hier treten beim Lösen häufig lokale Beschädigungen der Dübellöcher auf, sodass bei einer Wiederverwendung geringere Steifigkeiten in Kauf genommen werden müssen [91]. Unter axialer Belastung gelten Gewindestangen, Bolzen und Passbolzen mit Unterlegscheiben und Muttern, vorgespannte Gewindestangen, eingeklebte Gewindestangen mit Stahlverbindungen sowie metrische Schrauben in Gewindemuffen als schadensfrei lösbar und wiederverwendbar [26, 91, 95, 98]. Bei lateraler Belastung können Bolzen, Passbolzen, Gewindestangen und eingeklebte Gewindestangen bei rein elastischer Beanspruchung sowie Schubverbinder aus Hartholz und Konusdübel aus Kunstharzpressholz (siehe Abbildung 4-13) schadensfrei demontiert und wiederverwendet werden [26, 91, 95, 98].

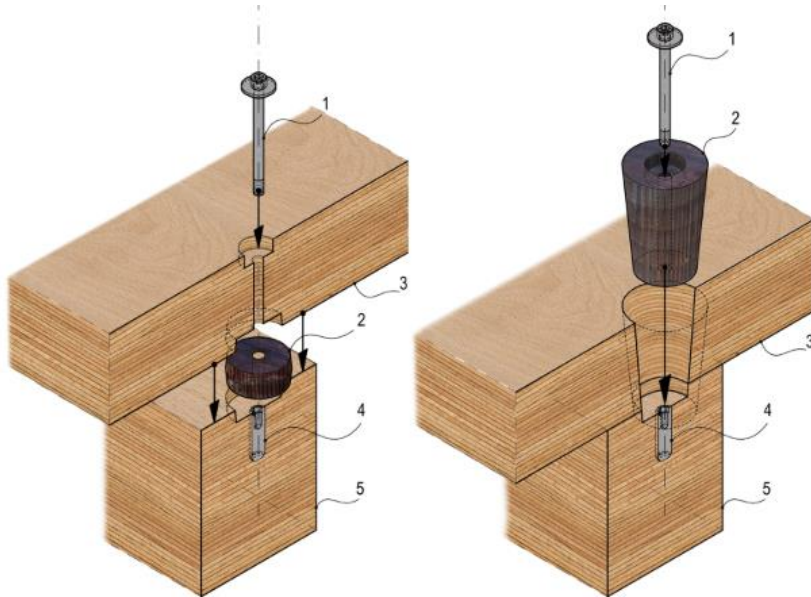


Abbildung 4-13: Reversible Verbindung zur Schubkraftübertragung aus Kunstharzpressholz-Dübeln und metrischen Schrauben (aus [26])

Außerdem werden noch besondere Stahlverbindungen betrachtet. Beispielsweise sind verdeckte Balkenschuhe aus Stahl zu nennen, welche häufig im Skelettbau eingesetzt werden und sich zumeist schadensfrei lösen lassen. Allerdings ist die Wiederverwendung eingeschränkt, da durch Verformungen häufig die erforderliche Passgenauigkeit nicht mehr gegeben ist [91]. Es existieren auch einige spezielle Stahlbauteile, welche sich für einen schadensfreien Rückbau und eine Wiederverwendung eignen. Hierzu zählen zum Beispiel eingeschraubte Gewindemuffen (z. B. Sihga IdeFix), oder im Holz eingeklebte Stahlbauteile mit denen ein Knotendetail in Stahlbauweise erfolgt (z. B. HSK-Systeme) [91]. Die Stahlbauteile lassen sich voneinander schadensfrei lösen, sodass eine Wiederverwendung stattfinden kann. Eine Trennung des eingeklebten Stahlbauteils vom Holzelement ist hingegen nicht schadensfrei möglich.

Aus der Literaturrecherche zu einfach lösbaren Verbindungen geht hervor, dass viele Prinzipien des kreislauffähigen Holzbaus sich in einer Skelettbauweise gut umsetzen lassen. Diese ermöglicht lokal begrenzte Knotenpunkte und damit einfach zu lokalisierende Verbindungen mit einer geringen Verbindungsmittellanzahl. Zusätzlich existieren im Skelettbau bereits demontierbare Bauteilknoten.

#### Hochwertige Materialwahl

Die Möglichkeit zur Wiederverwendung kann durch die Materialwahl stark beeinflusst werden. Um die Wiederverwendbarkeit zu erhöhen, sollten die Materialien bestimmte Eigenschaften aufweisen. Drei Autoren nennen die Verwendung leichter Materialien [22, 91,



103]. Hier hat der Werkstoff Holz insbesondere bei der Herstellung des Tragwerks große Vorteile gegenüber mineralischen oder metallischen Werkstoffen. Zwei Autoren nennen die Langlebigkeit und Robustheit der gewählten Materialien [91, 103]. Daher ist beim biogenen Werkstoff Holz ein besonderes Augenmerk auf den Witterungsschutz zu legen. Drei Autoren nennen als Materialmerkmal die Schadstofffreiheit [91, 103, 104]. Im Holzbau betrifft das insbesondere den chemischen Holzschutz sowie chemische Zusätze in biogenen Dämmstoffen zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften. Anstelle eines chemischen Holzschutzes lässt sich der Schutz vor Feuchte auch konstruktiv und somit schadstofffrei herstellen [53]. Durch eine Trennung der Gebäudehülle und des Tragwerks lässt sich die Fassade mit geringeren Brandschutzanforderungen ausführen [26], sodass ein Einsatz von Holzfaserdämmung oder boratfreier Zellulosedämmung ermöglicht wird. Vier Autoren nennen die Recyclingfähigkeit als wichtige Materialeigenschaft [22, 91, 103, 104]. Hier weist Holz auch sehr gute Eigenschaften auf. Einerseits kann der Werkstoff im technischen Kreislauf in einer Kaskadennutzung weiterverwertet und am Ende thermisch verwertet werden, andererseits können schadstofffreie und klebstofffreie Holzwerkstoffe im biogenen Kreislauf verrottet werden und somit in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden [21]. Weitere Materialien, die im mehrgeschossigen Holzbau aufgrund der Brandschutzeigenschaften häufig eingesetzt werden, sind Gipskartonfeuerschutz- und Gipsfaserplatten sowie Mineralwollgedämmungen. Für Gips existieren bereits Verfahren, die ein hochwertiges Recycling auf gleichbleibender Qualitätsstufe ermöglichen. Es wird von einer potentiellen Effizienz von bis zu 95 % ausgegangen [26]. Aktuell werden diese Verfahren jedoch nur geringfügig praktiziert [26]. Bei Steinwolle existieren auch Verfahren, sortenreine Abfälle oder Verschnittreste wiederzuverwerten und der Produktion hinzuzuführen [21]. Wie auch beim Recycling von Gips wird dies heute nur in geringem Umfang praktiziert [21].

Neben Anforderungen, die an das Material selbst gestellt werden, existieren auch Anforderungen an die Verbindungen zwischen den Materialien innerhalb eines Bauteils. Hier führen vier Autoren Punkte auf, die die sortenreine Trennbarkeit der Materialien betreffen. Die Autoren nennen allen Voran die Vermeidung von Verbundwerkstoffen, Verklebungen und Beschichtungen [22, 91, 103, 104]. Untrennbare Verbindungen wie Verklebungen sollten nur zwischen Komponenten des selben Materials erfolgen [91, 103]. Vor diesem Hintergrund sind Holz-Beton-Verbund-Decken kritisch zu betrachten, ebenso wie vollflächig verklebte Folien zum Witterungsschutz, die im Holzbau eingesetzt werden.

#### *Dauerhafte Informationsverfügbarkeit*

Ein Rückbau zum Zweck der Wiederverwendung nach mehreren Jahrzehnten erfordert eine dauerhafte Informationsverfügbarkeit über das Gebäude. Zwei Autoren geben an, dass Bauteile und Materialien dauerhaft identifizierbar sein müssen [22, 91]. Vier Autoren nennen eine As-Build-Dokumentation und die Aufbewahrung der Planungsunterlagen als wichtige Voraussetzungen für einen erfolgreichen Rückbau [22, 99, 103, 104]. Dabei ist auch insbesondere zu klären, wie der Zugriff und die Pflege der Daten über die langen Lebensdauern eines Gebäudes gewährleistet werden können. Ebenfalls vier Autoren geben an, dass eine frühzeitige Erstellung von Demontageplänen oder Simulationen und Planungen bezüglich des End-of-Life-Szenarios notwendig ist [22, 98, 103, 104]. Daher schlagen zwei Autoren vor, das Know-How zu kreislauffähigem Bauen zu verbessern, sodass dieses möglichst früh und von Seiten aller Projektbeteiligten in den Planungsprozess einfließen kann [22, 103]. Die angesprochenen Punkte erfordern eine konsequente Planung in BIM bis hin zur As-Build-Dokumentation und Datenpflege während der Gebäudenutzung. Zusätzlich müssen im Zuge einer integralen Planung sämtliche Projektbeteiligte zusammenarbeiten und frühzeitig

Kompetenzen im Design for Deconstruction & Reuse in die Planung einbringen. Eine konsequente digitale und integrale BIM-Planung ist eine Herausforderung, vor der die gesamte Baubranche unabhängig vom Werkstoff des Gebäudes steht. Die integrale Planung ist im mehrgeschossigen Holzbau bereits weit verbreitet, da bereits in frühen Entwurfsphasen holzbauspezifische Fragestellungen auftreten und die Vorfertigung einer Vorverlagerung der Planungsleistungen bedarf [106].

#### 4.5.6. Materialrecycling

Das Materialrecycling spielt in der Kreislaufwirtschaft zwar eine wichtige Rolle, wird jedoch nicht als oberste Priorität gesehen. Wie in Kapitel 4.5.1 besprochen, existieren verschiedene Hierarchieebenen, auf denen die Wiederverwendung stattfinden kann. Dabei wird immer ein höchstmöglicher Werterhalt angestrebt. Der Werterhalt steigt mit der Ebene der Wiederverwendung [98, 104].

#### *Rolle des Materialrecyclings in der Kreislaufwirtschaft*

In Abbildung 4-14 ist abgebildet, wie sich die Praktizierung der verschiedenen End-of-Life-Szenarien bei einer Umstellung von einer linearen Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft idealerweise verändern [104]. Es ist deutlich zu erkennen, dass die heute vorherrschenden Praktiken der Deponierung und thermischen Verwertung, gefolgt vom Materialrecycling, stark an Bedeutung verlieren. Dennoch kann auch in einer idealen Kreislaufwirtschaft nicht auf Materialrecycling verzichtet werden. Aus dem Prinzip der Scherschichten ist bekannt, dass bestimmte Bauteilschichten (Verschleißschichten) kürzere Lebensdauern haben als das Bauteil selbst und daher während der Lebensdauer des Gebäudes regelmäßig ausgetauscht werden müssen [94]. Selbst die dauerhaften Scherschichten wie zum Beispiel Komponenten mit tragender Funktion weisen eine begrenzte Lebensdauer auf, sodass Bauteile nicht unendlich oft wiederverwendet werden können [26]. Ist die maximale Lebensdauer einer Komponente erreicht und keine Wiederverwendung möglich, ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Wiederverwertung anzustreben. Diese sollte in einem geschlossenen Kreislauf möglich sein (Closed-Loop), sodass bei den Recyclingprozessen keine Qualitätsverluste und begrenzte Materialverluste auftreten [21].

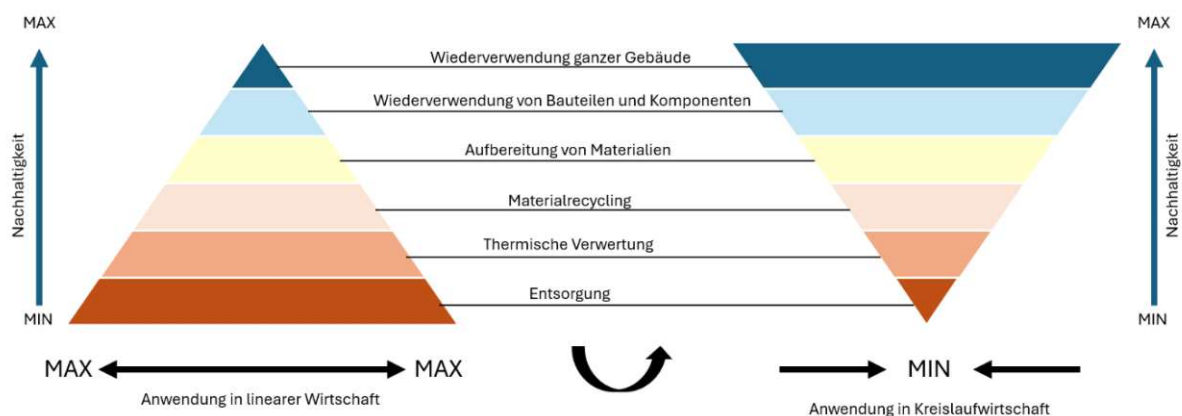


Abbildung 4-14: Nachhaltigkeitshierarchie am Lebensende (Eigene Darstellung nach [104])

#### *Sortenreinheit*

Eine sortenreine Trennbarkeit der Materialien bildet die Grundlage eines hochwertigen Materialrecyclings [12, 25]. Damit eine sortenreine Rückgewinnung der Materialien erfolgen kann, muss beim Aufbau der Bauteile einerseits auf monomaterielle Komponenten und Bauelemente gesetzt werden und andererseits auf leicht lösbare Verbindungen zwischen den

Bauteilschichten [22, 91, 103, 104]. Dies bedeutet insbesondere einen Verzicht auf Verklebungen, Beschichtungen, Veredelungen und Verbundwerkstoffe [22, 91, 103, 104]. Untrennbare Verbindungen sollten lediglich bei Komponenten eingesetzt werden, die aus demselben Material bestehen [91, 103], zum Beispiel BSP. In Tabelle 3-1 sind gängige Verbindungen aufgezählt. Eine sortenreine Zerlegung der Bauteile kann vor allem durch Zusammensetzen beziehungsweise An- und Einpressen erfolgen. Verbindungen durch Zusammensetzen sind zum Beispiel Auflegen, Aufsetzen, Schichten, Einlegen, Einsetzen und Einhängen [63]. Diese ermöglichen neben der sortenreinen Trennbarkeit auch eine schadensfreie Zerlegbarkeit. An- und Einpressen erfolgt beispielsweise durch Schrauben, Presspassung, Nageln, Verstiften und Einschlagen [63]. Hier ist grundsätzlich immer eine sortenreine Trennung möglich, während die schadensfreie Zerlegbarkeit nur bei Schrauben gegeben ist, unter der Voraussetzung, dass die Schraubenköpfe erreichbar sind. Grundsätzlich ist eine sortenreine Trennbarkeit der Materialien auch sehr gut mit dem Prinzip der Scherschichten vereinbar, welches fordert, dass Bauteilschichten stets so untereinander verbunden sein müssen, dass ein Austausch einzelner, weniger langlebiger Schichten möglich ist [94]. In Kapitel 4.4.2 werden Konzepte für sortenrein trennbare Bauteilaufbauten vorgestellt.

#### *Recyclingpotenziale in der Kreislaufwirtschaft*

Eine vollständige Ausarbeitung der Recyclingpotenziale verschiedener Werkstoffe ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. In den später folgenden Referenzanalysen werden die Recyclingpotenziale der Materialien anhand Fachliteratur wie dem „Atlas Recycling“ [19], dem „Urban Mining Index“ [21], „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] oder „Sortenrein Bauen“ [50] beurteilt.

Es wurde bereits darauf eingegangen, dass das Recycling in der Kreislaufwirtschaft insofern eine bedeutende Rolle spielt, als dass Wiederverwendungszyklen von Produkten nur in begrenzter Anzahl möglich sind [26] und während der Nutzung wiederkehrende Instandhaltungsmaßnahmen mit dem entsprechenden Austausch von Komponenten anfallen [94]. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, die dabei anfallenden Materialien nicht als Abfall zu behandeln, sondern über ein Materialrecycling zurück in den Produktionskreislauf zu führen [23]. In Kapitel 4.3.2 wird bereits auf die Reduktion der Rohstoffentnahme eingegangen, wobei zu beachten ist, dass die Entnahme nicht nachwachsender, also endlicher Rohstoffe in der Kreislaufwirtschaft vermieden werden soll. Für diese Rohstoffe ist es wichtig, dass sie in einem geschlossenen Kreislauf ohne Qualitäts- und Materialverlust recyclebar sind [21]. Geschieht das Recycling in einem offenen Kreislauf, sind damit Qualitätsverluste verbunden [21], was wiederum bedeutet, dass für die Ersatzproduktion neue Rohstoffe verwendet werden müssen. Nachwachsende Werkstoffe können in der Regel nicht dauerhaft in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden [91]. Sie können jedoch in die Biosphäre überführt, dort in einer Nutzungskaskade weiterverwertet und schließlich durch Kompostierung einen geschlossenen Kreislauf bilden [91]. Solange eine Wiederverwendung möglich ist, befindet sich ein Holzbauteil in einem geschlossenen Kreislauf in der Technosphäre [91]. Da eine unendliche Wiederverwendung jedoch nicht möglich ist [26], wird das Holzbauteil in die Biosphäre überführt, wo es eine Kaskadennutzung durchläuft [91]. Ein Massivholzbalken kann in einer Nutzungskaskade zunächst in der Produktion von Holzwerkstoffen verwendet werden. Anschließend können die Partikel und Fasern verwendet werden. Sogar eine Nutzung der chemischen Bestandteile ist möglich. Nach der anschließenden Kompostierung erfolgt die Rückführung in den biogenen Kreislauf in Form von Biomasse [91]. Entscheidend bei der Wiederverwendung und anschließenden Kaskadennutzung biogener Werkstoffe ist, die

Nutzungsdauer des Materials möglichst lange zu gewährleisten. So wird sichergestellt, dass der Rohstoff während der Nutzungsdauer des Produktes nachhaltig nachwachsen kann [25]. Ein weiterer Effekt einer langen Nutzung nachwachsender Rohstoffe tritt auf, wenn diese während ihres Wachstums CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entzogen und gespeichert haben. In Kapitel 4.3.3 wird auf die positiven Effekte hingewiesen, die eine verzögerte Freisetzung dieser Treibhausgase auf das Klima hat [79].

Es erfordert also den Einsatz nicht biogener Baustoffe, die sich idealerweise zunächst wiederverwenden lassen (Re-Use) und anschließend in einem geschlossenen Kreislauf mit möglichst geringer Prozessenergie wiederverwerten lassen (Recycle). Sowie den Einsatz biogener Werkstoffe, welche durch Wiederverwendung (Re-Use) möglichst lange hochwertig genutzt werden, um im Anschluss durch eine Kaskadennutzung möglichst lange weiterverwertet zu werden (Recycle) und am Ende der Nutzungskaskade durch Kompostierung ihrem natürlichen Kreislauf zugeführt werden können. Die alternativen End-of-Life-Szenarien, thermische Verwertung und Deponierung spielen in der Kreislaufwirtschaft eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 4-14) [104]. Eine effektive Nutzungskaskade muss im Zusammenspiel von Wirtschaft und Politik entstehen. Dabei ist zu beachten, dass die Verarbeitungsprozesse möglichst wenig CO<sub>2</sub>-Emissionen produzieren und dass eine mögliche energetische Verwertung erst am Ende einer Nutzungskaskade stattfindet und dabei nicht auf Frischholz ausgewichen wird [73]. Eine Studie zur Qualität von Altholz in Bayern zeigt, dass sich Altholz zu etwa 45 % zur stofflichen Nutzung eignet, während der Großteil des Altholzes aufgrund von Schadstoffbelastungen lediglich thermisch verwertet werden kann [73]. Dies zeigt die Notwendigkeit auf, bestehende Praktiken im Holzbau zu ändern, sodass sich Bauteile oder Bauelemente aus Holz in Zukunft mehrheitlich zur Wiederverwendung und anschließenden stofflichen Nutzung eignen.

#### *Thermische Verwertung und Deponierung*

Wie in Abbildung 4-14 zu erkennen ist, spielen die Deponierung und die thermische Verwertung im System der Kreislaufwirtschaft nur eine untergeordnete Rolle. Mit den in Kapitel 2.2 besprochenen Gesetzgebungen arbeitet die Europäische Union daran, sukzessive eine Kreislaufwirtschaft durch Verschärfungen in Deponie- und Abfallrichtlinien durchzusetzen. Im Zuge des EU-Green-Deal (siehe Kapitel 2.2), welcher das Ziel eines klimaneutralen Kontinents verfolgt, kann davon ausgegangen werden, dass eine thermische Verwertung im europäischen Energiemix an Bedeutung verliert und zugunsten erneuerbarer Energiequellen verringert wird [47]. Kurzfristig besteht jedoch ein Konflikt zwischen der stofflichen und energetischen Verwertung, wobei die energetische Verwertung sowohl in der Lebenszyklusanalyse als auch bei Förderungen gegenüber der stofflichen Nutzung bevorzugt wird [73]. Dies sollte sich dahingehend verlagern, dass eine energetische Nutzung erst nach dem Ausreizen der stofflichen Nutzung erfolgt.

#### *Diskrepanz zwischen technisch möglichem und praktiziertem Recycling*

Bei der Betrachtung der Recyclingfähigkeit besteht häufig eine große Diskrepanz zwischen tatsächlich praktizierten und technisch möglichen Wiederverwertungs- und Recyclingverfahren [21, 26]. Die Beispiele Gips und Mineralwolle, bei denen ein Recycling möglich wäre, jedoch kaum Anwendung findet [21, 26], verdeutlichen, dass möglicherweise Anreize oder Kapazitäten fehlen, bestimmte Werkstoffe flächendeckend nach dem Stand der Technik wiederzuverwerten. Hier sind unter anderem gesetzgeberische Kompetenzen gefragt, die verpflichtenden Recyclingquoten zu erhöhen. Dies geschieht beispielsweise mit der EU-Abfallrahmenrichtlinie und der EU-Deponierichtlinie [27, 28]. Dabei scheint jedoch zusätzlich

zu vorgeschriebenen Recyclingquoten eine Verschärfung des Recyclingbegriffs notwendig zu sein, um zu verhindern, dass die Werkstoffe nach einem Rückbau einem Downcycling mit einem Qualitätsverlust unterzogen werden.

#### 4.5.7. Planung mit wiederverwendeten Bauteilen und Materialien

Der Großteil des vorhergegangenen Kapitels hat sich mit der Fragestellung, wie ein Gebäude geplant werden muss, um am Ende des Lebenszyklus rückbaubar und wiederverwendbar zu sein, befasst. Dieser Ansatz ist auch der Hauptfokus dieser Arbeit. Im folgenden Kapitel sollen dennoch Planungsansätze zur Planung mit wiederverwendeten Bauteilen erörtert werden. In diesem Zuge wird auch die Bestandsnutzung behandelt, welche in engem Zusammenhang mit dem Themenbereich der Ressourceneffizienz steht. Zudem werden die im Zusammenhang mit der Nutzung wiederverwendeter Bauteile auftretenden rechtlichen Hindernisse und Zertifizierungsproblematiken erläutert.

##### *Planungsansätze*

Zum aktuellen Zeitpunkt und in dieser Arbeit geht es primär darum, Gebäude so zu planen, dass sie kreislauffähig sind und in Zukunft wiederverwendet werden können. Die Planung mit wiederverwendeten Bauteilen ist nicht der Hauptfokus dieser Arbeit, da einerseits der Gebäudebestand, der heute abgebrochen wird, nicht kreislauffähig geplant wurde und daher Limitationen in der Wiederverwendung aufweist, andererseits bestehen zum aktuellen Zeitpunkt noch rechtliche Restriktionen, die die Wiederverwendung im Bauwesen erschweren. Hradil et al. [98] haben Grundprinzipien zur Planung mit wiederverwendeten Bauteilen, Bauelementen und Komponenten ausgearbeitet. Diese beinhalten unter anderem, mit kleineren Bauelementen, Strukturen und Räumen zu planen, Längen und Dimensionen von Bauelementen nicht zu fixieren, sondern mit einem Spielraum zu planen, eine Vielzahl an Spannweiten und Dimensionen im Projekt zu verwenden, die Umnutzung von Stützen zu Trägern und Wänden zu Decken und umgekehrt sowie weniger Perfektion und Gleichförmigkeit bei nicht tragenden Bauteilen wie der Fassade zuzulassen [98]. Die Autoren möchten insbesondere der Herausforderung entgegentreten, dass während der Planung möglicherweise unklar ist, welche wiederverwendbaren Bauteile verfügbar sein werden. Es wird dabei auch deutlich, dass der Werkstoff Holz aufgrund seiner leichten Bearbeitbarkeit Vorteile mit sich bringt [98]. Durch die Planung kreislauffähiger Gebäude sollen diese Schwierigkeiten in Zukunft besser beherrschbar sein.

##### *Rechtliche und technische Unsicherheiten*

Rechtliche Unsicherheiten bestehen vor allem noch bei der Wiederverwendung von Bauteilen. Während Recyclingprozesse und der Einsatz von Recyclingbaustoffen mit entsprechenden Verordnungen klar geregelt sind (siehe Kapitel 2.2.2) [37, 43], bestehen keine Regelungen für die Zertifizierung, CE-Kennzeichnung oder Haftung bei wiederverwendeten Bauteilen [71]. Besonders die fehlende Regelung für eine CE-Kennzeichnung von genutzten Bauteilen, Bauelementen und Komponenten erschwert die Wiederverwendung stark. Zudem sind insbesondere im Holzbau Fragen zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Altholz noch nicht abschließend geklärt [100]. Hier laufen noch Forschungsvorhaben zur Einstufung und Beurteilung genutzter Tragwerkskomponenten [100]. Nichtsdestotrotz sollte dies kein Hindernis sein, bereits jetzt zu beginnen, kreislauffähig, sprich schadensfrei demontierbare Gebäude und zerlegbare Bauteile zu planen. In aktuellen Forschungsvorhaben wird daran gearbeitet, technische Unsicherheiten zu klären [100]. Außerdem zeigen die übergeordneten Ziele aus dem EU-Green-Deal, dass die Europäische Union eine Kreislaufwirtschaft anstrebt

[1], sodass davon auszugehen ist, dass die rechtlichen Unsicherheiten in Bezug auf die Wiederverwendung von Bauteilen zukünftig geklärt werden.

#### *Schwierigkeiten bei der Wiederverwendung aus dem aktuellen Bestand*

Neben den rechtlichen und technischen Unsicherheiten muss noch hinzugefügt werden, dass das kreislauffähige Bauen eine junge Entwicklung im Bauwesen ist und aktuell keine kreislauffähigen Gebäude rückgebaut werden. Dementsprechend sind die aus dem Bestandsabbruch gewonnenen Ressourcen zum aktuellen Zeitpunkt nicht für eine Wiederverwendung konzipiert. Gut wiederverwendbare Bauteile, Bauelemente und Komponenten sind daher Mangelware.

#### 4.6. Umsetzung des wissenschaftlich-technischen Standes des kreislauffähigen Bauens im mehrgeschossigen Holzwohnungsbau

Der Literaturrecherche ist zu entnehmen, dass das kreislauffähige Bauen noch am Anfang seiner Entwicklung steht und sich noch nicht auf dem Markt etabliert hat. Insbesondere im Wohnbau existieren bisher kaum gebaute Beispiele kreislauffähiger Gebäude. Erste Projekte, die ein kreislauffähiges Gebäudekonzept verwirklichen, sind zumeist für Büro- oder Verwaltungsgebäude sowie Ausstellungspavillons zu finden. Hier ist zum Beispiel das Ersatzparlament Wien zu nennen. Dieses wurde nach vorübergehender Nutzung wieder rückgebaut und im Anschluss wiederverwendet [107]. Dafür wird ein Holzskelettbau mit vorgehängter Holztafelbaufassade aus modularen und standardisierten Einzelbauteilen verwendet [107]. Die Verbindungen zwischen den Bauteilen (Stützenknoten, Fassadenanschluss und Deckenanschluss) erfolgen mit beidseitigen Stahlanschlussteilen und sind somit wieder lösbar [107]. Die Standardisierung aller Bauteile ermöglicht eine anschließende Wiederverwendung für unterschiedlichste Gebäudekonfigurationen [107]. Die Kreislauffähigkeit wird insbesondere durch ein simples, standardisiertes und modulares Gebäudedesign in Holzskelettbauweise sowie lösbare Verbindungsknoten aus besonderen Stahlbauteilen erreicht. Ein weiteres aktuelles Beispiel eines kreislauffähigen Bürogebäudes ist das Projekt HaslTre in Oslo, Norwegen. Auch hier wird versucht, ein modulares und simples Gebäudedesign umzusetzen. Dafür kommt ein Skelettragwerk aus standardisierten, großformatigen Bauelementen zum Einsatz [108]. Die Verbindungen zwischen den tragenden Bauteilen erfolgen in den Stützenknoten mit Buchenholzdübeln und zwischen flächigen BSP-Elementen mit X-Fix-Hartholzverbindern und sind wieder lösbar [108]. Die zuvor getrockneten Buchenholzdübel passen sich nach dem Einbau der Umgebungsfeuchte an und expandieren, sodass der Knoten zwischen Stütze und Träger fixiert wird. Im Falle eines Rückbaus sollen die Dübel herausgebohrt werden [109]. Darüber hinaus wurden zur Verbesserung der Langlebigkeit einfache Bauteilaufbauten gewählt und viele Bauteile mit einer sichtbaren Holzoberfläche belassen. Sämtliche Oberflächenbekleidungen werden mit Holznägeln befestigt und sind somit wieder lösbar [109]. Um einen einfachen Austausch der Haustechnik zu gewährleisten, werden Doppelbodensysteme mit einer Installationsebene zur Leitungsführung sowie seitlich geöffnete Deckenabhängungen für die Belüftung gewählt [109]. Um beurteilen zu können, inwieweit sich der in Kapitel 4 beschriebene Stand der Wissenschaft zum kreislauffähigen Bauen im mehrgeschossigen Holzwohnungsbau in der freien Wohnungswirtschaft umsetzen lässt, sollen drei Referenzgebäude aus dem DACH-Raum untersucht werden. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt daher die Ausarbeitung von Bewertungskriterien sowie die Auswahl entsprechender Holzgebäude.

## 5. Bewertungskriterien zur Bestimmung der Kreislauffähigkeit der Referenzgebäude

Zur Durchführung der Referenzanalyse werden im folgenden Kapitel eigene Bewertungskriterien festgelegt und beschrieben. Die Auswahl und Erstellung der Bewertungskriterien erfolgt einerseits auf Basis der Erkenntnisse der Literaturrecherche und andererseits aufgrund der Analyse bereits bestehender Zertifizierungssysteme.

### 5.1. Themenfelder

Sowohl im DACH-Raum mit BNB, DGNB/ÖGNI (DE/AT), SNBS (CH) und Minergie ECO (CH) als auch im englischsprachigen Raum mit BREEAM (GB) und LEED (USA) sind verschiedene Systeme zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden entstanden. Um der Komplexität der Nachhaltigkeitsbetrachtung gerecht zu werden, besitzen alle Zertifizierungssysteme eine hierarchische Gliederung. Im Folgenden werden die aus dem DACH-Raum stammenden Systeme SNBS und DGNB näher betrachtet. Das Label Minergie ECO mit den Themenfeldern „Schallschutz“, „Innenraumklima“, „Gebäudekonzept“ sowie „Materialien und Bauprozesse“ bildet die Grundlage für das SNBS-System [110]. Die Zertifizierung nach SNBS (Schweiz) verwendet drei Themenfelder. Diese basieren auf den drei Säulen der Nachhaltigkeit: „Umwelt“, „Wirtschaft“ und „Gesellschaft“ [111]. Die Zertifizierung nach DGNB (Deutschland) nutzt ebenfalls die drei Säulen der Nachhaltigkeit zur Definition der Themenfelder „ökologische Qualität“, „ökonomische Qualität“ und „soziokulturelle und funktionale Qualität“. Diese werden um drei weitere Kategorien ergänzt: „technische Qualität“, „Prozessqualität“ und „Standortqualität“ [20]. Die Themenfelder werden jeweils in Kriteriengruppen unterteilt. Diese bestehen aus thematisch zusammengehörigen Kriterien. Die Bewertung der Kriterien erfolgt schlussendlich anhand mehrerer Messgrößen oder Indikatoren. In der nachfolgenden Tabelle wird diese Systematik am Beispiel des SNBS-Bewertungskriteriums „213 Wiederverwendung und Systemtrennung“ aufgezeigt.

Tabelle 5-1: Systematik des SNBS-Systems beispielhaft am Kriterium „Wiederverwendung und Systemtrennung“ [111]

Bereich	
Wirtschaft	
Thema	
21 Lebenszyklus	
Kriterium	Bewertung
213 Wiederverwendung und Systemtrennung	0-6
Messgröße	Punkte
1. Zugänglichkeit von GT-Installationen	0/1/2/3
2. Zerstörungsfreie Rückbaubarkeit (design for disassembly)	0/0,5/1/1,5/2
3. Wiederverwendung von Bauteilgruppen	0/0,5
4. Materialdokumentation	0/0,5

Da sich die vorliegende Referenzanalyse im Gegensatz zu den betrachteten Bewertungssystemen ausschließlich mit der Beurteilung der Kreislauffähigkeit von mehrgeschossigen Holzgebäuden befasst, werden die Themenfelder enger eingegrenzt und befassen sich spezifisch mit dem zirkulären Bauen. In Anlehnung an die Verwendung der drei Säulen der Nachhaltigkeit im DGNB- und SNBS-System werden die Themenfelder für die vorliegende Referenzanalyse anhand der Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft gewählt und lauten „Reduce“, „Long-Use“, „Re-Use & Recycle“. Im Themenfeld „Reduce“ wird das Gebäude

bei der Erstellung hinsichtlich seiner Ressourceneffizienz beurteilt. „Long-Use“ beurteilt die Maximierung der Lebensdauer durch Umbau-, Umnutzungs- und Reparaturfähigkeit während der Nutzungsdauer. Das Themenfeld „Re-Use und Recycle“ beschäftigt sich mit dem Kreislaufpotenzial des Gebäudes für das End-of-Life Szenario. Das heißt, es wird die Rückbau- und Wiederverwendungs-, sowie die Recyclingfähigkeit bewertet.

## 5.2. Kriterien zum Themenfeld Reduce

Aus der durchgeführten Literaturrecherche bezüglich der Suffizienz und Ressourceneffizienz im mehrgeschossigen Holzwohnungsbau wurden folgende relevante Kriteriengruppen identifiziert: „(1.1) reduzierter Flächenverbrauch“ und „(1.2) ressourcenschonender Materialeinsatz“. In der nachfolgenden Tabelle sind die Kriteriengruppen mit den dazugehörigen Kriterien für das Themenfeld „Reduce“ dargestellt. Die Kriteriengruppe Flächenverbrauch betrachtet mit der Flächeninanspruchnahme den Flächenverbrauch auf Gebäudeebene (vgl. DGNB Kriterium ENV 2.3) [20] und mit der Nutzungsdichte den Flächenverbrauch auf Nutzerebene (vgl. SNBS Kriterium 222) [111]. In der Kriteriengruppe ressourcenschonender Materialeinsatz wird versucht, die Ressourceneffizienz der Gebäudestruktur zu bewerten. Dazu wird untersucht, ob für die Errichtung des Gebäudes bereits eine Bauteilwiederverwendung oder die Weiternutzung von Bestandsstrukturen stattfindet (Kriterium 1.2.1.) (vgl. SNBS Kriterium 213 ) [111]. In den Kriterien 1.2.2. und 1.2.3. wird die Ressourceneffizienz des Holztragwerks über die Reduktion des Stahlbetonteils (Kriterium 1.2.2.) und die Effizienz der Tragstruktur aus Holz (Kriterium 1.2.3.) beurteilt. Im Kriterium 1.2.4. soll der Einsatz ökologischer Baustoffe und innovativer Baustoffalternativen in den Bauteilaufbauten beurteilt werden.

Grundsätzlich ist auch die Ökobilanzierung, insbesondere mit Hinblick auf die Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch bei der Gebäudeerstellung, ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Ressourceneffizienz eines Gebäudes und wird sowohl im SNBS- als auch im DGNB-Kriterienkatalog berücksichtigt [20, 111]. Da im Rahmen der Referenzanalyse die für die Ermittlung notwendigen Datengrundlagen nicht vorliegen, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, diese Kriterien zu beurteilen.

Tabelle 5-2: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Reduce

Themenfeld	
1. Reduce	
Kriteriengruppe	Kriterium
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme
	1.1.2. Nutzungsdichte
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung
	1.2.2. Erhöhte Substitution durch Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe in den Bauteilaufbauten



### 5.3. Kriterien zum Themenfeld Long-Use

Für das Themenfeld „Long-Use“ ergeben sich aus der Literaturrecherche die beiden Kriteriengruppen „(2.1) Flexibilität“ und „(2.2) Langlebigkeit“. Für die Beurteilung der Flexibilität werden als Kriterien die Umnutzungsfähigkeit innerhalb derselben Nutzungsart, die Umnutzungsfähigkeit für eine andere Nutzung, die Nutzungsvielfalt durch unterschiedliche Flächenangebote sowie die Erweiterbarkeit gewählt. Diese sind auch im SNBS- (vgl. SNBS-Kriterium 223) und teilweise im DGNB-Kriterienkatalog (vgl. DGNB-Kriterium ECO 2.4) aufgeführt [20, 111]. Für die Beurteilung der Langlebigkeit des Gebäudes werden die Langlebigkeit des Holztragwerks sowie die Reparatur- und Austauschfähigkeit der Haustechnik, der Fassade und der innenliegenden Bauteiloberflächen bewertet. Diese sind dem Verschleiß besonders ausgesetzt und weisen in der Regel eine kürzere Lebensdauer als das Tragwerk auf. Sie werden daher im Verlauf der Gebäudelebensdauer regelmäßig repariert, instandgesetzt und ausgetauscht beziehungsweise erneuert. So beurteilt der DGNB-Kriterienkatalog explizit die Austauschmöglichkeit einzelner Komponenten der Fassade (vgl. DGNB-Kriterium TEC1.3) und die Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der Gebäudetechnik (vgl. TEC 1.4) [20], während im SNBS-Kriterienkatalog die Anpassbarkeit der Fassade (vgl. SNBS-Kriterium 223) und die Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der Gebäudetechnik (vgl. SNBS-Kriterium 213) in die Bewertung mit einfließen [111]. Aus der Literaturrecherche ist bekannt, dass viele Autoren unter Verweis auf das Modell der Scherschichten darauf hinweisen, dass die maximale Gebäudelebensdauer maßgeblich von der Lebensdauer des Tragwerks abhängig ist und diese durch die Austauschbarkeit von Verschleißteilen verlängert werden kann [5, 18, 50, 94].

*Tabelle 5-3: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Long-Use*

Themenfeld	
2. Long-Use	
Kriteriengruppe	Kriterium
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau

### 5.4. Kriterien zum Themenfeld Re-Use und Recycle

Das dritte Themenfeld, welches in der Bewertung der Kreislauffähigkeit mehrgeschossiger Holzgebäude herangezogen wird, befasst sich mit der Wiederverwendung und Wiederverwertung. Dafür werden zwei entsprechende Kriteriengruppen „(3.1) Re-Use“ und „(3.2) Recycling“ verwendet (siehe Tabelle 5-4). Die Kriteriengruppe „Re-Use“ befasst sich mit der Wiederverwendung und dem Recycling des Gebäudes. Dafür wird zunächst das Wiederverwendungspotenzial bewertet (3.1.1.). Mehrere Autoren heben die Einfachheit des Tragwerks als Faktor für ein hohes Wiederverwendungspotenzial hervor [22, 46, 102, 104]. Sie bestimmt also maßgeblich, wie gut sich die aus dem Rückbau gewonnenen Produkte wiederverwenden lassen. Die Wiederverwendung hängt maßgeblich von der schadensfreien Demontierbarkeit der Bauteile ab. Dies garantiert die Wiederverwendung auf Gebäude- und

Bauteilebene. Eine Wiederverwendung einzelner Bauelemente und Komponenten wird durch die schadensfreie Trennbarkeit zwischen den Bauteilschichten ermöglicht. Im Zuge dieser Arbeit werden diese beiden Anforderungen mit den Kriterien (3.1.2.) und (3.1.3.) analysiert. Im SNBS-Kriterienkatalog werden im Kriterium 213 die Rückbaufähigkeit der Primärstruktur, Sekundärstruktur, Gebäudehülle und Gebäudetechnik bewertet [111]. Dabei wird im SNBS-Kriterienkatalog keine Unterscheidung zwischen der Demontierbarkeit der Bauteile und der Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten gemacht. Im DGNB-Kriterienkatalog wird im Kriterium TEC 1.6 auch auf die Rückbaubarkeit eingegangen. Hier wird der Einsatz zirkulärer Produkte bewertet, wobei sowohl die zerstörungsfreie Demontage ganzer Bauteile als auch die sortenreine Trennbarkeit des Bauteils selbst als zirkuläre Eigenschaft eines Produktes gesehen werden [20]. Zudem wird im Zuge der Beurteilung der Re-Use-Eigenschaften des Gebäudes die Informationsverfügbarkeit bewertet. Obwohl Informationen zu Lage und Art der Verbindungsmittel, Materialität oder Leitungsführung auch für die Durchführung von Reparatur- oder Umbauarbeiten benötigt werden, spielt die Informationsverfügbarkeit eine entscheidende Rolle bei der Entstehung eines Marktes zur Wiederverwendung von Bauteilen [18]. Das Materialrecycling (3.2.1.) wird anhand der Recyclingfähigkeit der maßgebenden Bauteilaufbauten, Tragwerk, Fassade, Dach, Decke und Innenwände beurteilt.

Tabelle 5-4: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Re-Use und Recycle

Themenfeld	
3. Re-Use & Recycle	
Kriteriengruppe	Kriterium
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotenzial
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling

## 5.5. Messgrößen

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Messgrößen zu den Kriterien erarbeitet.

### 5.5.1. Methodik der Beurteilung

Jedes Kriterium wird, wie auch im SNBS-System, mit maximal sechs Punkten bewertet. Dafür werden für jedes Kriterium eigene Messgrößen definiert. Die Messgrößen sollen eine objektive und vergleichbare Bewertung ermöglichen. Die Messgrößen werden aufgrund der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zum kreislauffähigen Bauen sowie der Analyse der beiden für die Auswahl der Kriterien herangezogenen Bewertungssysteme SNBS und DGNB festgelegt. Die Anzahl der Messgrößen kann sich zwischen den Kriterien unterscheiden. Dies führt zu unterschiedlichen Gewichtungen der Messgrößen. Bei der Gewichtung der Messgrößen wird sich an der Gewichtung des SNBS- und DGNB-Kriterienkatalogs orientiert, sofern das entsprechende Kriterium dort auch behandelt wird. Bei Kriterien, die nicht in einem der beiden Kataloge vertreten sind, wird die Gewichtung der Messgrößen anhand der Kenntnisse aus der Literaturrecherche hergeleitet. Es wird in quantitative und qualitative Messgrößen unterschieden. Bei der Punktevergabe kann entweder kein Punkt vergeben werden, wenn die Messgröße gar nicht erfüllt ist, oder die volle Punktzahl, wenn die

Messgröße voll erfüllt ist. Es besteht auch die Möglichkeit, einen Teil der Punkte zu vergeben. Dafür muss aufgezeigt werden, zu welchem Teil die Messgröße erfüllt wird.

### *Quantitative Messgrößen*

Bei den Bewertungskriterien kann zwischen quantitativen und qualitativen Messgrößen unterschieden werden. Die quantitativen Messgrößen haben einen messbaren und im Rahmen der Arbeit feststellbaren Wert, anhand derer sie beurteilt werden. Beispielsweise kann ab einer bestimmten Raumhöhe davon ausgegangen werden, dass eine spätere Umnutzung von Wohnen zu Office möglich ist.

### *Qualitative Messgrößen*

Einige der Messgrößen lassen sich nicht an einem konkreten Wert festhalten oder dieser Wert lässt sich nicht feststellen. Die Bewertung der qualitativen Kriterien wird dann über eine beschreibende Analyse ermittelt. So ist beispielsweise die Flexibilität des Grundrisses zur späteren Umnutzung nicht an einem bestimmten Wert festzumachen, sondern hängt vom Zusammenspiel verschiedener Faktoren wie Raumgröße und Abmessungen, Raumanzahl je Einheit, natürliche Beleuchtung etc. ab. In der Analyse der qualitativen Messgrößen werden Stärken und Schwächen des Referenzgebäudes hinsichtlich der Messgröße erörtert und eingeordnet.

#### 5.5.2. Messgrößen zum Themenfeld Reduce

Im Folgenden werden die ausgearbeiteten Messgrößen für die Kriterien des Themenfeldes Reduce erläutert.

### *Flächeninanspruchnahme*

Das Ziel ist es, die Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung durch das Gebäude so gering wie möglich zu halten. Für das Kriterium der Flächeninanspruchnahme werden die Messgrößen entsprechend dem DGNB-Kriterienkatalog (Kriterium ENV 2.3) [20] ausgewählt. In der Literaturrecherche wurde im Kapitel 4.2.1 auf die Notwendigkeit zur Reduktion der Flächenversiegelung eingegangen. Die Standortwahl des Gebäudes beeinflusst dessen Auswirkung auf die Flächenversiegelung stark. Die erste Messgröße zur Bewertung der Flächeninanspruchnahme ist daher die Bewertung des Standortes. Dabei fließen der ursprüngliche Zustand und die Umgebung des Baugrundstücks in die Bewertung ein. Grundsätzlich wird dabei die Wahl einer zuvor ungenutzten Fläche schlechter bewertet als eine mit baulicher oder verkehrlicher Vornutzung. Außerdem wird eine Außenentwicklungsfläche (z. B. Neubaugebiet) schlechter bewertet als eine Innenfläche (Nachverdichtung) (vgl. DGNB-Kriterienkatalog, Kriterium ENV 2.3) [20]. Die Punktevergabe kann der Tabelle 5-5 entnommen werden und ist an das Punkteverhältnis des entsprechenden DGNB-Kriteriums angelehnt. Weitere Messgrößen zur Bewertung der Flächeninanspruchnahme sind zum einen die Minimierung des Eingriffs in den Boden. Wobei hier die Gründung des Gebäudes und dessen Eingriff in den Boden beurteilt werden. Die Punktevergabe erfolgt, wenn durch Verzicht auf Unterkellerung oder Aufständering des Gebäudes der Eingriff in den Boden verringert wird. Oder wenn zusätzliche Ausgleichsmaßnahmen getroffen werden, um der Bodenversiegelung entgegenzuwirken. Hierunter fallen Maßnahmen zur Verbesserung der Sickerleistung des Bodens, Dach- und Fassadenbegrünungen, Wasserhaltungsmaßnahmen oder Entsiegelungen in der näheren Umgebung des Gebäudes. Für die Umsetzung von zwei oder mehr der genannten Maßnahmen

wird der entsprechende Punkt vergeben. Bei der Festlegung der beiden letztgenannten Messgrößen wurde das DGNB-Kriterium ENV 2.3 als Referenz herangezogen [20].

Tabelle 5-5: Messgrößen Flächeninanspruchnahme

<b>Kriterium: Flächeninanspruchnahme</b>		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Bewertung des Standortes	a) Neubau auf unbebauter Außenentwicklungsfläche	a) 0
	b) Nachverdichtung auf unbebauter Innenentwicklungsfläche	b) 2
	c) Neubau auf vorgenutzter Fläche	c) 3
	d) Neubau auf vorgenutzter Fläche - Verbesserung des Versiegelungsgrades	d) 4
Minimierung des Eingriffs in den Boden	Gründungsmaßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden	1
Ausgleichsmaßnahmen	Zusätzliche Maßnahmen, die der Bodenversiegelung entgegenwirken	1

### *Nutzungsdichte*

Das Ziel eines kreislauffähigen Gebäudes ist nicht nur die Minimierung der genutzten Grundfläche, sondern auch eine Maximierung der Nutzungsintensität. Diese wurde in der Literaturrecherche diskutiert und beinhaltet neben einer reduzierten Pro-Kopf-Wohnfläche auch die Reduzierung der Privatflächen zu Gunsten von nutzungsintensiven Gemeinschaftsflächen und -angeboten. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Angebot kleiner Ein- bis Zwei-Zimmer-Wohnungen für Singles und Paare. Im SNBS-Kriterienkatalog wird im Kriterium 222 die Nutzungsdichte für Wohngebäude ausschließlich anhand der Energiebezugsfläche in m<sup>2</sup> pro Kopf bewertet [111]. In der vorliegenden Referenzanalyse soll die personenbezogene Fläche auch bewertet werden. Hierfür wird jedoch die Wohnfläche pro Kopf herangezogen, da die vorliegenden Referenzgebäude teilweise für Wohn- und Gewerbe Zwecke genutzt werden und eine Zuordnung der Verkehrs- und Technikflächen mit den vorhandenen Daten nicht einwandfrei möglich ist. Die Berechnung der Pro-Kopf-Wohnfläche erfolgt mittels des im SNBS-Kriterium 222 angegebenen Berechnungstools [111, 112]. Dieses liefert anhand der Zimmerzahl eine Annahme für die Belegung. Anstelle der Energiebezugsfläche wird in der vorliegenden Referenzanalyse die Wohnfläche (Nutzfläche) eingesetzt. So ergibt sich der Wert für die geschätzte Pro-Kopf-Wohnfläche.

Für die Messgröße Pro-Kopf-Wohnfläche werden maximal drei Punkte vergeben. Dies stellt eine Abweichung von der Punkteverteilung nach SNBS dar, bei welcher alle sechs Punkte für die Nutzungsdichte aufgrund der Pro-Kopf-Fläche vergeben werden [111]. Die Punktevergabe der Messgröße erfolgt anhand der Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche gegenüber dem Durchschnittswert in Österreich und Deutschland, welcher jeweils knapp unter 50 m<sup>2</sup> liegt [113, 114]. Diverse Forschungsvorhaben zeigen den Einfluss der Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche auf den Energieverbrauch über den gesamten Lebenszyklus [114, 115]. Pfäffli et al. beziffern das Einsparpotenzial bei einer Reduktion der Pro-Kopf-Energiebezugsfläche um ein Drittel auf 15 % der Primärenergie und Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Betrieb und Mobilität [115]. Für die Bewertung wurde daher eine Reduktion der durchschnittlichen Pro-

Kopf-Wohnfläche um mehr als 30 % (<35 m<sup>2</sup>/Pers.) als anzustrebender Wert herangezogen und mit drei Punkten bewertet. Eine Reduktion um 15 – 30 % führt zur Vergabe von zwei Punkten. Eine Reduktion bis 15 % führt zur Vergabe von einem Punkt. Für Pro-Kopf-Wohnflächen über dem Durchschnitt werden keine Punkte vergeben. Eine Studie im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes untersucht die Auswirkungen der Reduktion der Pro-Kopf-Wohnflächen. Nach der Studie kann bei Wohnungen von Nutzern (Familien mit Kindern) mit einem bereits unterdurchschnittlichen Pro-Kopf-Wohnflächenverbrauch von 32,7 - 36,2 m<sup>2</sup> auf zusätzliche Maßnahmen zur Reduktion der Wohnfläche verzichtet werden [114]. Diese Pro-Kopf-Wohnfläche entspricht auch in etwa der Reduktion der Durchschnittsfläche um 30 %.

Annahme für noch nicht vermietete / verkaufte Wohnungen:				Bewertung	
Wohnungsspiegel (Zimmerzahl)	Annahme für Belegung (Personen)	Stückzahl (Wohnungen)	Annahme Belegung	Referenzwert	Punkte
1	1,3		0,0	Nutzungsdichte ≤ 50.0 m <sup>2</sup> /Pers	6
1,5	1,4		0,0	50.0 < Nutzungsdichte ≤ 52.5 m <sup>2</sup> /Pers	5,5
2	1,4		0,0	52.5 < Nutzungsdichte ≤ 55.0 m <sup>2</sup> /Pers	5
2,5	1,7		0,0	55.0 < Nutzungsdichte ≤ 58.8 m <sup>2</sup> /Pers	4,5
3	1,9		0,0	58.8 < Nutzungsdichte ≤ 62.5 m <sup>2</sup> /Pers	4
3,5	2,2	4	8,8	62.5 < Nutzungsdichte ≤ 65.0 m <sup>2</sup> /Pers	3,5
4	2,5		0,0	65.0 < Nutzungsdichte ≤ 67.5 m <sup>2</sup> /Pers	3
4,5	2,7	2	5,4	67.5 < Nutzungsdichte ≤ 72.5 m <sup>2</sup> /Pers	2,5
5	2,8		0,0	72.5 < Nutzungsdichte ≤ 77.5 m <sup>2</sup> /Pers	2
5,5	2,8		0,0	77.5 < Nutzungsdichte ≤ 82.5 m <sup>2</sup> /Pers	1,5
6	2,8		0,0	82.5 < Nutzungsdichte ≤ 87.5 m <sup>2</sup> /Pers	1
>6	2,8		0,0	Nutzungsdichte > 87.5 m <sup>2</sup> /Pers	0
Total		6	14,2		

Reale Belegungen in vermieteten / verkauften Wohnungen:	
Anzahl Personen in vermieteten / verkauften Wohnungen	
EBF total gem. Bauprojekt	640 m <sup>2</sup>
Anzahl Personen (Annahme + reale Belegung)	14,2
Anzahl Zimmer (Zu übertragen ins Hilfstool 335 "Mobilitätsmassnahmen", Messgröße 2)	20
<b>Nutzungsdichte</b>	<b>45,1 m<sup>2</sup>/Pers</b>

Abbildung 5-1: SNBS-Hilfstool (Kriterium 222) zur Berechnung der Pro-Kopf-Wohnfläche (aus [112])

Besonders hoher Handlungsbedarf wird bei Ein- oder Zweipersonen-Haushalten ausgemacht, welche einen deutlich überdurchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch an Wohnfläche aufweisen [114]. Erschwerend auf die Reduktion wirkt sich der Mangel an kleinen Wohnungen aus [114]. Daher wird mit der zweiten Messgröße das Angebot kleiner Wohnungen bewertet. Für Single-Haushalte und Paare kommen insbesondere 1- bis 2-Zimmer-Wohnungen in Frage. Um der zuvor definierten optimalen Pro-Kopf-Wohnfläche zu entsprechen, erfolgt die Vergabe von einem Punkt, wenn im vorliegenden Gebäude entsprechend kleine Wohnungen mit 35 m<sup>2</sup> Wohnfläche für 1- bis 1,5-Zimmer-Wohnungen und 70 m<sup>2</sup> Wohnfläche für 2- bis 2,5-Zimmer-Wohnungen angeboten werden.

Aus der Literaturrecherche zur Suffizienz gehen weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Nutzungsdichte hervor. Es werden das Anbieten von gemeinschaftlichen Mobilitätskonzepten in Form von Car-Sharing-Stationen [5] oder der Förderung von Fahrradmobilität zur Minimierung der Parkplatzflächen mit 0,5 Punkten, das Anbieten von Cluster-Wohnen und Wohngemeinschaften [26] mit 0,5 Punkten und das Anbieten von Gemeinschaftsflächen [5] mit einem Punkt bewertet.

Tabelle 5-6: Messgrößen Nutzungsdichte

<b>Kriterium:</b> Nutzungsdichte		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Pro-Kopf-Wohnfläche	a) Größer als durchschnittliche Wohnfläche > 50 m <sup>2</sup>	a) 0
	b) Durchschnittliche Wohnfläche bis 15 % reduziert 42,5 m <sup>2</sup> - 50 m <sup>2</sup>	b) 1
	c) Durchschnittliche Wohnfläche 15 – 30 % reduziert 35 m <sup>2</sup> - 42,5 m <sup>2</sup>	c) 2
	d) Durchschnittliche Wohnfläche > 30 % reduziert < 35 m <sup>2</sup>	d) 3
Angebot kleiner Wohnungen	1 bis 1,5-Zimmer Wohnungen < 35 m <sup>2</sup> oder 2 bis 2,5-Zimmer Wohnungen < 70 m <sup>2</sup>	1
Mobilitätskonzept mit Gemeinschaftsnutzung	Car-Sharing Angebote, Förderung der Fahrradmobilität	0,5
Nutzungsmaximierende Wohnformen	Cluster-Wohnen oder Wohngemeinschaften im Wohnungsspiegel	0,5
Flächen zur Gemeinschaftsnutzung	Gemeinschaftsbüro, Waschräume, Werkstätten, Aufenthaltsräume, Spielräume etc.	1

#### *Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung*

Mit dem Kriterium der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung wird der Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen sowie, falls vorhanden, die Nutzung des Bestandes im aktuellen Projekt bewertet. Dabei wird lediglich der Grad des Einsatzes wiederverwendeter Materialien bewertet, wobei die Hierarchieebenen der Wiederverwendung bei der Punkteverteilung berücksichtigt wurden. Die Bewertungsstufen und entsprechende Punkteverteilung können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Hier muss angemerkt werden, dass es als unwahrscheinlich gilt, dass eines der Referenzobjekte bereits eine Punktzahl von 5 oder 6 erreicht. Die entsprechenden Voraussetzungen sind die Wiederverwendung vollständiger Gebäude durch einen Ortswechsel oder die vollständige Wiederverwendung von Bauteilen und gelten laut der Literaturrecherche als höchster Standard für den Einsatz wiederverwendeter Materialien [98]. Daher sollen sie auch in der Punkteverteilung abgebildet werden.

Tabelle 5-7: Messgrößen Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

<b>Kriterium:</b> Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Einsatz wiederverwendeter Bauteile	a) Kein Einsatz	a) 0
	b) Vereinzelter Einsatz, z. B.: einzelne Stützen oder kleinere Teile der Fassadenbekleidung	b) 1
	c) Systematischer Einsatz in einzelnen, nicht tragenden Bauteilschichten, z. B.: Fassadenbekleidung oder Fußbodenbelag	c) 2
	d) Systematischer Einsatz in der Sekundärstruktur, z. B. nicht tragende Fassadenelemente oder Fenster	d) 3
	e) Systematischer Einsatz für einen wesentlichen Teil der Tragstruktur, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk oder Weiternutzung eines bestehenden Untergeschosses	e) 4
	f) Großteil der Primär- und Sekundärstruktur wiederverwendet, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk mit wiederverwendeten Fassadenelementen	f) 5
	g) Nahezu vollständiger Einsatz wiederverwendeter Bauteile, z. B.: Ortswechsel eines ganzen Gebäudes	g) 6

#### *Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung*

Aus der Literaturrecherche zur Suffizienz und Ressourceneffizienz im mehrgeschossigen Holzbau geht hervor, dass mineralische Bauteile einen großen Einfluss auf die Umweltbilanz eines Holzgebäudes haben und selbst bei einem reinen Holztragwerk der Massenanteil der nachwachsenden Rohstoffe nur bei circa 18 % liegt [52]. So entsteht durch die Bodenplatte und mögliche Untergeschosse [52] sowie Erschließungskerne [74] ein nicht geringer Anteil am Gebäude aus Stahlbeton. Das Substitutionspotenzial eines Holzgebäudes ist umso höher, je geringer der Stahlbetonanteil ist. Um die Reduktion des Stahlbetonteils im Gebäude und damit schlussendlich auch das Substitutionspotenzial des Holzgebäudes bewerten zu können, werden drei Messgrößen betrachtet.

Zunächst wird das oberirdische Tragwerk ohne Erschließung betrachtet. Hier erfolgt eine Wertung mit einem Punkt, wenn die Bauteile der Tragstruktur ab dem ersten Obergeschoss (exklusive Erschließung) aus Holz bestehen und insbesondere auf den Einsatz von Hybridbauteilen verzichtet wird. Zudem wird für die Bewertung des oberirdischen Tragwerks ein weiterer Punkt vergeben, wenn das Erdgeschoss in Holzbauweise ausgeführt wird.

Neben dem oberirdischen Tragwerk erfolgt eine Betrachtung der Gründung. Diese Messgröße bewertet, ob Maßnahmen getroffen werden, um die eingesetzte Menge an Stahlbeton in der Gründung zu reduzieren. Dafür werden zwei Punkte für den Verzicht auf ein Untergeschoss vergeben sowie ein weiterer Punkt für Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung, beispielsweise durch Bestandsnutzung. Als dritte Messgröße wird der Stahlbetonanteil in der Gebäudeerschließung betrachtet. Die Vergabe von einem Punkt erfolgt für den Verzicht auf Erschließungskerne oder außenliegende Erschließungen in Stahlbetonbauweise.

Tabelle 5-8: Messgrößen Reduktion des Stahlbetonteils

<b>Kriterium:</b> Reduktion des Stahlbetonteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk (oberirdisch exkl. Erschließung)	Tragstruktur ab 1. OG (exkl. Erschließungskerne) in Holzbauweise mit Verzicht auf Hybridbauteile	1
	Verzicht auf ein Stahlbeton-Erdgeschoss	1
Gründung	Verzicht auf Untergeschoss	2
	Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung	1
Erschließung	Verzicht auf Stahlbeton-Erschließungskerne	1

### *Effizienz des Holztragwerks*

Für die bestmöglichen Treibhausgasreduktion sollte ein möglichst hoher Gebäudeanteil aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Dabei ist entscheidend, dass möglichst viele mineralische Bauteile durch Bauteile aus Holz substituiert werden. Für das Einsparpotenzial von Holzgebäuden gegenüber mineralischen Gebäuden ist die verbaute Holzmenge jedoch eher nebensächlich, da in der Lebenszyklusanalyse die CO<sub>2</sub>-Speicher-Effekte von Holz am Ende des Lebenszyklus ausgebucht werden, sodass die Effekte in der Bilanzierung egalisiert werden [74]. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung und im Hinblick auf eine steigende Nachfrage nach Holz als Baustoff ist ein ressourceneffizienter Einsatz von Holz besonders wichtig, um eine Erzeugung aus nachhaltiger Forstwirtschaft weiterhin zu gewährleisten [17]. Da der größte Teil der Gebäudemasse im Tragwerk steckt [98], wird in diesem Kriterium die Ressourceneffizienz des Holztragwerks beurteilt. Für die Bewertung des ressourceneffizienten Holzeinsatzes im Tragwerk werden vier Messgrößen betrachtet. Der ressourceneffiziente Holzeinsatz in den Decken, in den Innenwänden, in der Fassade sowie bei der Aussteifung. Dabei wird die Reduktion der eingesetzten Holzmenge im Tragwerk positiv bewertet. Für die Decken wird der Materialbedarf anhand der Abbildung 5-2 bewertet [55]. Als weitere Messgrößen wird der Materialeinsatz bei den Innenwänden beurteilt. Hier führt eine Reduktion der tragenden Innenwände im Gebäude zur Bewertung mit einem Punkt. Wird durch die Wahl eines Skeletttragwerks auf tragende Innenwände verzichtet, wird dies mit zwei Punkten bewertet. Bei den Außenwänden wird der Einsatz von Holztafelbauwänden oder einem Skeletttragwerk mit nicht tragenden Fassaden mit einem Punkt bewertet. In einem von Jung [116] veröffentlichten Beitrag wird ein mehrgeschossiges Wohngebäude in BSP-Bauweise (tragende und nicht tragende Innen- und Außenwände aus BSP) mit einer fiktiven Alternative in Skelett-Rahmenbauweise verglichen. Bei der Skelett-Rahmenbauweise handelt es sich um ein Skeletttragwerk aus primären Stützen und Trägern, welche jedoch im Werk zu Wandelementen vorgefertigt werden [116]. Bei dem Vergleich hätte der Skelett-Rahmenbau mit 280 m<sup>3</sup> Holz realisiert werden können, während für den Massivholzbau 840 m<sup>3</sup> Holz verwendet wurden [116]. Wird die Gebäudeaussteifung mit bereits vorhandenen tragenden Wänden gelöst, ohne zusätzliche Wände im Projekt zum Zwecke der Aussteifung hinzuzufügen, wird dies positiv bewertet. Ein aussteifender Treppenhaukern oder die stellenweise Aussteifung von vorhandenen Bauteilen in Skelett- oder Holztafelbauweise tragen dazu bei, den Materialverbrauch der aussteifenden Wände zu reduzieren.



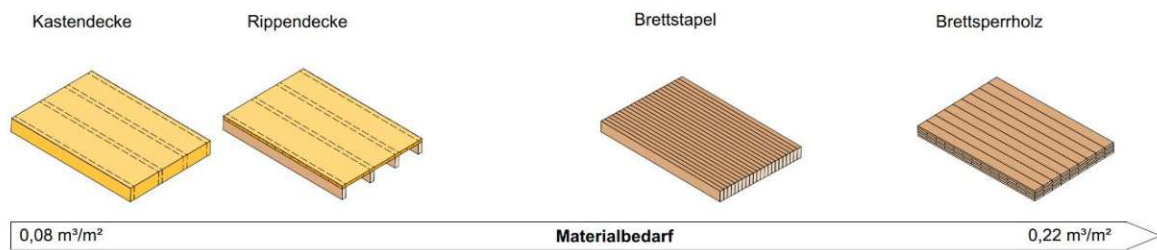


Abbildung 5-2: Materialbedarf verschiedener Holzdeckensysteme im Vergleich (Eigene Darstellung, nach [57])

Tabelle 5-9: Messgrößen Effizienz des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Ressourceneffizienz des Holztragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Decken	a) Brettstapeldecken b) Kasten- oder Rippendecken	a) 1 b) 2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Innenwände	a) Reduktion tragender Innenwände b) Skeletttragwerk ohne tragende Innenwände	a) 1 b) 2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Fassade	Holztafelbauweise	1
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Aussteifung	Gebäudeaussteifung über Treppenhauswände und Teile der Außenwände	1

### Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe in den Bauteilaufbauten

Nicht nur der Anteil der tragenden Bauteile aus Stahlbeton hat eine große Auswirkung auf das Substitutionspotenzial von Holzgebäuden, auch der Anteil mineralischer Baustoffe in den Bauteilaufbauten und im Ausbau beeinflusst, um wieviel sich das Treibhauspotenzial eines Holzgebäudes gegenüber eines identen mineralischen Gebäudes senken lässt [74]. Im Kriterium „Ökologische Baustoffe“ wird ermittelt, inwieweit ökologische Baustoffe über das Tragwerk hinaus eingesetzt werden. In dem Forschungsvorhaben „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] werden verschiedene Innenwand- und Fußbodenaufbauten hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit untersucht. Für den Fußbodenaufbau werden alternative Aufbauten mit Baustoffen wie Lehm oder Holzfasern gesucht, um die gängigen Materialien in Schüttung, Trittschalldämmung und Estrich ersetzen zu können [26]. Für die Wandaufbauten der Innenwand und Fassade wird hingegen die Verwendung biogener Dämmstoffe, raumseitiger Bekleidungen aus Holzwerkstoffen oder Lehmbauplatten sowie eine Fassadenbekleidung aus Holz untersucht [26]. In einer Arbeit von Hafner et al. [74] zur Treibhausbilanzierung von Holzgebäuden wird festgestellt, dass im Ausbau ein Treibhausgas-Einsparpotenzial von circa 19 bis 38 % liegt (bei Betrachtung der Module A und C, sowie A, B und C). Dabei wurde für die untersuchten Referenzgebäude eine Treibhausgasbilanzierung für jeweils zwei Ausstattungsvarianten mit unterschiedlichen Bodenbelägen, Fenstern und Fassadenbekleidungen aufgestellt [74]. Zum Fußbodenaufbau muss hinzugefügt werden, dass Parkettboden erst unter Hinzunahme des Moduls D in der Bilanzierung Vorteile gegenüber PVC, Linoleum und Fliesen aufweist [74]. Die in Tabelle 5-10 dargestellten Messgrößen werden auf Basis der Erkenntnisse dieser beiden Arbeiten ausgewählt, um die Ökologie der Baustoffwahl der Referenzgebäude bewerten zu können.

Tabelle 5-10: Messgrößen ökologische Baustoffwahl

Kriterium: Ökologische Baustoffwahl		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Fußbodenaufbau	Bodenbelag aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5
	Alternativen zu mineralisch gebundener Schüttung	0,5
	Alternativen zu mineralischer Trittschalldämmung	0,5
	Alternativen zu Zementestrich	0,5
Raumseitige Bekleidung	Raumseitige Bekleidungen aus Holzwerkstoff oder Lehm	1
Dämmstoffe	Verwendung biogener Dämmstoffe	1
Fassadenbekleidung	Fassadenbekleidung aus nachwachsenden Rohstoffen	1
Fenster	Holzfenster	1

### 5.5.3. Messgrößen zum Themenfeld Long-Use

Im Folgenden werden die ausgearbeiteten Messgrößen zu den Kriterien des Themenfeldes Long-Use erläutert.

#### *Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart*

Eine lange Nutzungsdauer wird vor allem auch durch eine durchgängige Vermietung des Objektes gefördert. Um im Laufe des Lebenszyklus auf veränderliche Anforderungen der Nutzer reagieren zu können, sollte ein Gebäude im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart zulassen [26]. Dazu gehört einerseits, dass eine Wohnung eine gewisse Flexibilität im Grundriss bietet, sodass sie auf geänderte Anforderungen in laufenden Mietverhältnissen reagieren kann. Andererseits sollte eine Wohneinheit auch die Möglichkeit zur Teilung oder Zusammenlegung bieten, um auf tiefgreifendere Veränderungen auf dem Wohnungsmarkt reagieren zu können. Sowohl im DGNB- als auch im SNBS-Kriterienkatalog wird die Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart als Teil des Kriteriums „Nutzungsflexibilität“ bewertet [20, 111]. In der folgenden Tabelle werden die auf Basis des SNBS-Kriteriums 223 und des DGNB-Kriteriums ECO 2.4 ausgearbeiteten Messgrößen dargestellt. Die Messgrößen beschäftigen sich vorwiegend mit den Optionen, innerhalb einer Nutzungseinheit Räume auf verschiedene Weisen zu nutzen, diverse Grundrisse durch das Verschieben der nicht-tragenden Innenwände zu erstellen und größere Nutzungseinheiten in zwei oder mehrere kleinere Einheiten aufzuteilen.

Tabelle 5-11: Messgrößen Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Größtenteils nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit > 80 %	1
	Anschlüsse von leichten Innenwänden ohne Eingriff in Fußbodenaufbau und Decke	1
	Anschlussmöglichkeit von Innenwänden in geringen Abständen in der Fassade	1
Erschließung	Erschließung kleiner voneinander unabhängige Einheiten, z. B.: zwei Eingangsmöglichkeiten	1
Grundriss	Nutzungsneutrale Räume, circa 3 x 3m bis 5 x 5m	1
Versorgung	Mehrere Steigzonen je Einheit ermöglichen Teilung in kleinere Einheiten	1

#### *Umnutzung für eine andere Nutzungsart*

Um auf Veränderungen reagieren zu können, sollte ein Gebäude nicht nur die Möglichkeit bieten, innerhalb derselben Nutzungsart anpassbar zu sein, sondern auch so weit anpassbar sein, dass zu einem späteren Zeitpunkt eine andere Nutzungsart möglich ist [26]. Das bedeutet laut SNBS-Kriterienkatalog zum Beispiel eine Umnutzung von Wohnen zu Büro oder Verwaltung [111]. Auch im DGNB-Kriterienkatalog wird die Umnutzung für eine andere Nutzung im Kriterium ECO 2.4 / Wertstabilität und Anpassungsfähigkeit bewertet [20].

Die Messgrößen zur Umnutzung wurden mit Hilfe des „Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) für Büro- und Verwaltungsgebäude“ [117], des Forschungsvorhabens „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26, 95] sowie des „Circular Housing Reports“ [5] erarbeitet. Grundlage für die Nutzungs Offenheit bildet ein nutzungsneutrales Tragwerk, welches größtenteils auf tragende Innen- und Trennwände verzichtet [95, 117], Tragwerksreserven aufweist [111, 117] und Anpassungsmöglichkeiten in der Fassade zulässt [5, 26, 95]. Zudem muss die Gebäudegeometrie eine Umnutzung zulassen. Hierfür sind die Raumhöhen [5, 117] und die Gebäudetiefe entscheidend [20, 117]. Es wird eine möglichst hohe lichte Raumhöhe angestrebt, um die Flexibilität zu erhöhen und zum Beispiel eine Umnutzung von Wohnen zu Büro zu ermöglichen. Für die Gebäudetiefe gibt der DGNB-Kriterienkatalog optimale Bereiche für verschiedene Nutzungen an. Für die Büronutzung liegt die optimale Gebäudetiefe zwischen 10,00 und 16,50 m, für die Wohnnutzung zwischen 11,50 und 13,50 m [20]. In der Forschungsarbeit „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen“ [26] ergibt sich aus der zusätzlich angestrebten Nutzung als Parkhaus eine Gebäudetiefe von 16,00 m. In der Arbeit wird darauf verwiesen, dass diese Gebäudetiefe nicht ideal für die Wohnnutzung sei. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird die unten dargestellte Punkteverteilung für die Gebäudetiefe angewandt.

Bei der Erschließung wird, wie auch im BNB, die Bruttogrundfläche eines Stockwerks pro Erschließungskern bewertet [117]. Bei der Versorgung wird die Möglichkeit der Nachrüstung über vorhandene Platzreserven bewertet [5, 117].

Tabelle 5-12: Messgrößen Umnutzung für eine andere Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Nutzungsneutrales Tragwerk, größtenteils nicht tragende Innen- und Trennwände > 80 %	1
	Tragreserven, Nutzlast > 2 kN/m <sup>2</sup> auf 50 % der Bruttogrundfläche	0,5
	Fassade austauschbar, ermöglicht z. B.: Vergrößerung der Belichtungsfläche	0,5
Geometrie	a) Raumhöhe > 2,50 m b) Raumhöhe > 2,75 m c) Raumhöhe > 3,00 m	a) 0,5 b) 0,75 c) 1
	a) Gebäudetiefe: 10,00 m < Tiefe < 16,50 m b) Gebäudetiefe: 11,50 m < Tiefe < 13,50 m	a) 0,5 b) 1
Erschließung	a) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 600 m <sup>2</sup> b) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 400 m <sup>2</sup>	a) 0,5 b) 1
	Versorgung	Möglichkeit zur Erweiterung Haustechnischer Anlagen, z. B.: Platzreserven in Technikräumen und Schächten

#### *Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit*

Neben der Umnutzungsfähigkeit innerhalb und über die Nutzungsart hinaus sind die Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit ebenfalls ein entscheidender Faktor für die Flexibilität des Gebäudes. Vielfältige Flächenangebote innerhalb eines Gebäudes sowie in der näheren Umgebung des Gebäudes erzeugen Synergien und gewährleisten eine konstante Auslastung und Vermietung des Gebäudes. Folglich ist das Risiko eines Leerstands gering und ein langer Werterhalt und eine lange Nutzung der Immobilie sind wahrscheinlich [20]. Die Messgröße der „Standortqualität“ wird über die öffentliche Verkehrsanbindung [20] und verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld bewertet [111]. Die Messgröße der „Nutzungsvielfalt“ wird über einen breiten Wohnungsspiegel und verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Gebäudes bewertet [111]. Die Vergabe der Punkte erfolgt für das Angebot von 1- bis 4-Zimmer-Wohnungen und für mindestens zwei verschiedene Nutzungsarten im Gebäude. Zuletzt wird als Messgröße die „Erweiterbarkeit“ betrachtet. Hierfür werden die horizontale und vertikale Erweiterbarkeit bewertet [111].

Tabelle 5-13: Messgrößen Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit

<b>Kriterium:</b> Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Standortqualität	Bewertung der öffentlichen Verkehrsanbindung	1
	Verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld, mind. Wohnen + Büro + Gewerbe + Gastro	1
Nutzungsvielfalt	Breiter Wohnungsspiegel mit Wohnungen von 1 bis 4 Zimmern	1
	Verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Projekts, mind. Wohnen + Büro / Gewerbe / Gastro	1
Erweiterbarkeit	Horizontale Erweiterbarkeit durch Reserveflächen	1
	Vertikale Erweiterbarkeit	1

### *Langlebigkeit des Holztragwerks*

Viele Arbeiten zum kreislauffähigen Bauen beziehen sich auf das Konzept der Scherschichten. Dieses besagt, dass die maximale Lebensdauer des Gebäudes der Lebensdauer des Tragwerks entspricht [5, 18, 50]. Besonders im Hinblick auf den Holzbau ist eine Beurteilung der Langlebigkeit notwendig, da Holz als biogener Baustoff verwittern kann [53]. Aus der Literaturrecherche lassen sich drei zentrale Punkte in Bezug auf die Langlebigkeit von Holztragwerken herausarbeiten. Als Messgrößen werden daher der Witterungsschutz, die Trennung der Scherschichten und die Robustheit des Tragwerks beurteilt (vgl. Kapitel 4.4.1).

Beim Witterungsschutz wird bewertet, ob alle tragenden Bauteile vor freier Bewitterung und dem damit verbundenen Feuchteeintrag geschützt sind. Zusätzlich wird positiv bewertet, wenn alle tragenden Bauteile aus Holz sich innerhalb der thermischen Gebäudehülle befinden und somit auch vor starken Temperaturschwankungen geschützt sind.

Bei der Trennung der Scherschichten wird der Grad der Trennung beurteilt. Zunächst ist es bereits positiv zu bewerten, wenn die Austauschbarkeit der Schichten innerhalb eines Bauteils, welches unter anderem tragende Funktionen übernimmt, gewährleistet ist. Ein Beispiel ist eine zerlegbare Holztafelbauwand. Sind tragende Bauteile jedoch vollständig von Bauteilen mit anderen Funktionen getrennt und übernehmen diese lediglich die Tragfunktion, wird dies noch einmal besser bewertet. Ein Beispiel ist ein Skeletttragwerk mit vorgehängten, nicht tragenden Fassadenelementen. Zudem wird betrachtet, ob die tragenden Bauteile so gestaltet sind, dass eine einfache optische Kontrolle stets möglich ist. So können Beschädigungen frühzeitig erkannt und behoben werden. Die Messgröße Robustheit wird anhand vorhandener Tragwerksreserven bewertet. Ebenfalls positiv werden Maßnahmen bewertet, die Setzungen minimieren.

Tabelle 5-14: Messgrößen Langlebigkeit des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Langlebigkeit des Tragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Witterungsschutz	Keine freie Bewitterung tragender Holzbauteile	1
	Alle tragenden Holzbauteile innerhalb der thermischen Gebäudehülle	1
Trennung Tragwerk und Gebäudehülle	a) Trennbare Bauteilschichten b) Getrennte Bauteile	a) 1 b) 2
Robustheit	Tragwerksreserven, Maßnahmen zur Verringerung von Setzungen, etc.	1
Zugänglichkeit	Einfache optische Kontrollmöglichkeit tragender Bauteile	1

#### *Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau*

Für das Kriterium der Austausch- und Reparaturfähigkeit der Haustechnik, der Gebäudehülle und des Ausbaus werden die Messgrößen analog zu den drei genannten Kategorien gewählt. Bei der Austausch- und Reparaturfähigkeit der Haustechnik wird die Zugänglichkeit der vertikalen Leitungsführung durch ausreichend große Schächte, geschossweise Zugänge oder Zugangstüren, die Minimierung der horizontalen Leitungsführung durch entsprechende Platzierung der Nasszellen und Küchen in der Nähe der Schächte sowie die Zugänglichkeit der horizontalen Leitungsführung durch offene Verlegung oder Verlegung in abgehängten Decken, Sockelleisten oder Vorsatzschalen mit demontierbaren Verkleidungen bewertet [118]. Diese Kriterien basieren auf dem Kriterienkatalog von Minergie-ECO für Mehrfamilienhäuser [118], auf welchen sich der SNBS-Kriterienkatalog zur Beurteilung der Reparaturfähigkeit bezieht [111].

Die Messgröße Gebäudehülle und Sekundärstruktur bezieht sich auf die Trennbarkeit zwischen der Gebäudehülle beziehungsweise den nicht tragenden Innenwänden und der Tragstruktur [118]. Dabei wird betrachtet, ob sich die einzelnen Komponenten der Fassade schadensfrei lösen und wieder anbringen lassen, um einen Austausch von Schichten mit verschiedenen Lebensdauern zu vereinfachen. Des Weiteren werden zusätzliche Punkte vergeben, wenn sich ganze Fassadenelemente schadensfrei von der Tragstruktur lösen und sich somit austauschen lassen. Für die nicht tragenden Innenwände wird die Rückbaubarkeit bewertet, das heißt, dass alle Verbindungen innerhalb des Bauteils sowie Anschlüsse an benachbarte Bauteile rein mechanisch erfolgen, schadensfrei lösbar und gut zugänglich sein müssen. Dabei sollten nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit nur mit minimalem Eingriff in die angrenzenden Boden-, Decken- und Wandaufbauten rückbaubar sein. Bei Wohnungstrennwänden lässt sich ein Eingriff in die angrenzenden Aufbauten nicht verhindern, da Trennwände stets an den Rohbau anschließen müssen [26]. Dafür wird als weiterer Aspekt die schadensfreie Rückbaubarkeit des Fußbodenaufbaus bewertet. Sollte ein schadensfreier Rückbau auch punktuell möglich sein, werden zusätzliche Punkte vergeben. Die Messgröße Ausbau betrachtet die raumseitigen Oberflächen und deren Möglichkeit zur Erneuerung, beispielsweise bei einem Mieterwechsel. Um in der Bewertung Punkte zu erreichen, muss die Oberfläche mit einfachen Mitteln und häufig erneuerbar sein. Auch punktuelle Ausbesserungen müssen möglich sein. Besonders gut sind beispielsweise

Oberflächen, die sich durch einen Anstrich oder durch Abschleifen erneuern lassen, ohne die Oberflächen austauschen zu müssen.

Tabelle 5-15: Messgrößen Austausch und Reparatur

<b>Kriterium:</b> Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Haustechnik	Zugänglichkeit der vertikalen Versorgungsleitungen	0,5
	Minimierung der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5
	Zugänglichkeit der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5
Gebäudehülle und Sekundärstruktur	Austausch einzelner Komponenten der Fassade durch schadensfreie Lösbarkeit und Zugänglichkeit	1
	Schadensfreie Lösbarkeit ganzer Fassadenelemente	0,5
	Rückbaubare Innenwandaufbauten (nicht tragend) ohne Beschädigung benachbarter Bauteile	1
	a) Schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten b) Punktuell schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten	a) 0,5 b) 1
Oberflächen	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Wand), z. B.: durch Anstrich	0,5
	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Bodenbelag), z. B.: durch trocken verlegtes Parkett	0,5

#### 5.5.4. Messgrößen zum Themenfeld Re-Use und Recycle

Im Folgenden werden die ausgearbeiteten Messgrößen zu den Kriterien des Themenfeldes Re-Use und Recycle erläutert.

#### *Wiederverwendungspotenzial*

Aus der Literaturrecherche zu den Prinzipien des kreislauffähigen Bauens (Design for Deconstruction) lässt sich die Einfachheit des Tragwerks als zentraler Aspekt rückbau- und wiederverwendbarer Gebäude ausmachen [22, 26, 99]. Akinade et al. [103] und Bertino et al. [104] nennen als Maßnahme zur Vereinfachung des Tragwerks die Reduktion der tragenden Bauteile und die Reduktion unterschiedlicher Bauteiltypen. In der Analyse der Referenzgebäude muss durch Sichten der Grundrisse und Schnitte festgestellt werden, ob im vorliegenden Gebäude die Anzahl der tragenden Bauteile und die Anzahl der Bauteiltypen reduziert wurde. Anzeichen für eine reduzierte Anzahl tragender Bauteile sind unter anderem freie Grundrisse, erhöhte Spannweiten oder eine geringe Anzahl tragender Innenwände. Eine Reduktion der Bauteiltypen kann durch geschossweise idente Bauteile und sich innerhalb eines Geschosses wiederholende Bauteile erzielt werden.

Ein weiterer Aspekt, der von mehreren Autoren im Zusammenhang mit einer Vereinfachung des Tragwerks genannt wird, ist die klare Trennung zwischen Tragwerk, Sekundärstruktur, Haustechnik und Ausbau nach dem Prinzip der Scherschichten [22, 50, 98]. Die Trennung kann insbesondere durch Skeletttragwerke erzielt werden [26, 98]. Für die Referenzgebäude muss beurteilt werden, ob die Trennung zwischen Tragwerk und den sonstigen Scherschichten konsequent eingehalten wird.

Daneben werden nachvollziehbare Lastpfade und tragende Bauteile mit einer möglichst einfachen Belastung als besonders kreislauffähig angesehen [102]. Ein Bauteil mit reiner Druckbelastung ist einem Bauteil mit einer Kombination verschiedener Belastungen vorzuziehen [102]. Besonders lineare Bauteile wie Stützen oder Träger sind in der Regel einer einfachen Belastung ausgesetzt und können auch mit einfachen statischen Mitteln berechnet werden, während BSP-Platten mit Öffnungen häufig komplexe Lastpfade aufweisen [116]. Es wird überprüft, ob die tragenden Bauteile der Referenzgebäude einfach geformt sind. Komplexe Formen, Auskragungen oder Sprünge im vertikalen Lastabtrag sollten vermieden werden [22].

Neben der Einfachheit sind die Modularität und Standardisierung ein weiterer zentraler Aspekt für eine Demontage und Wiederverwendung des Gebäudes [22, 95, 103]. Eine modulare Bauweise mit werkseitig, elementweise vorgefertigten Bauteilen begünstigt die Wiederverwendung [22, 46, 104]. Für die Referenzanalyse wird überprüft, ob die Herstellung des Referenzgebäudes mittels vorgefertigter und elementierter Bauteile erfolgt.

Die Verwendung nutzungsöffener Bauteile im Tragwerk ermöglicht eine mehrfache Wiederverwendung [95]. Elemente, die bei einer Wiederverwendung mehr als nur eine Funktion ausführen können, sollten bevorzugt eingesetzt werden. So können BSP-Platten im Tragwerk zum Stützen, Überspannen oder Aussteifen eingesetzt werden [95]. Auch Stützen und Träger können in umgekehrter Weise verwendet werden. Dabei sind Stützen flexibel in ihrem Abstand und können in verschiedenen Rastern platziert werden.

Neben der Elementierung und Nutzungs Offenheit spielt die Standardisierung der eingesetzten Bauteile eine große Rolle bei deren Wiederverwendung [26, 95, 99]. Dies bedeutet, dass sich das Gebäuderaster wiederholt sowie die im Gebäude eingesetzten Bauteile jeweils in form- oder dimensionsgleichen Elementen gefertigt werden [99].

*Tabelle 5-16: Messgrößen Wiederverwendungspotenzial*

<b>Kriterium:</b>			
Wiederverwendungspotenzial			
<b>Messgröße</b>		<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Einfachheit Konstruktion	der	Reduktion tragender Bauteile und Bauteiltypen	1
		Klare Trennung des Tragwerks von Sekundär- und Tertiärstruktur	1
		Nachvollziehbarkeit der Belastung tragender Bauteile	1
Modularität Standardisierung	und	Modulare Bauweise, Vorfertigung und Leichtigkeit der Elemente	1
		Nutzungsneutrale tragende Bauteile	1
		Standardisierte Raster und Bauteile	1



### Demontierbare Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauteilen

Der größtmögliche Werterhalt des End-of-Life-Szenarios ist dann gegeben, wenn die Wiederverwendung auf Gebäude- oder Bauteilebene stattfindet [98]. Dafür ist die Demontierbarkeit der Bauteile maßgebend. Sie bedeutet den zerstörungsfreien Rück- oder Ausbau ganzer Bauteile beziehungsweise ganzer vorgefertigter Elemente, sodass diese in einem anderen Gebäude wiederverwendet werden können [26]. Auch im DGNB- und SNBS-Kriterienkatalog wird die Rückbaubarkeit bewertet, die Ausarbeitung der Messgrößen erfolgt jedoch hauptsächlich anhand der gesichteten Literatur [20, 111]. Im Zuge der Referenzanalyse wird das Kriterium der Demontierbarkeit der Bauteile anhand dreier Messgrößen beurteilt. Zunächst spielt die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel eine große Rolle bei der Demontage [46]. Hierfür werden zwei Aspekte beurteilt: einmal die Rückbaubarkeit der darüberliegenden Sekundärstruktur beziehungsweise des Ausbaus. So ist die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel im Bereich eines Stützenfußes oder Wandsockels maßgeblich von der Trennbarkeit und Rückbaubarkeit des Bodenbelags und Fußbodenaufbaus abhängig. Beurteilt wird die Rückbaufähigkeit von Bodenaufbauten, abgehängten Decken und Wandverkleidungen. Darüber hinaus spielt die Position der Verbindungsmittel beim Rückbau eine entscheidende Rolle [46]. Diese sollten so positioniert sein, dass sie beim Rückbau schnell gefunden werden und nicht übersehen werden können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Auffinden der Verbindungsmittel zu erleichtern. So sind Bauweisen wie die Skelettbauweise, bei der sich die Positionen der Verbindungsmittel am Tragwerk ablesen lassen, ideal für eine einfache Demontage [46]. Aber auch bei scheibenförmigen Wandelementen kann die Auffindbarkeit der Verbindungsmittel durch eine digitale Dokumentation und Speicherung der Position vereinfacht werden [71]. Die zweite Messgröße beurteilt die Trennbarkeit der verwendeten Verbindungsmittel. Die Beurteilung der Trennbarkeit erfolgt aufgrund der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 5-18 dargestellt. Es erfolgt die Vergabe von bis zu 2,5 Punkten, je nach Beurteilung der Lösbarkeit. Die dritte Messgröße betrachtet die Reduktion des Rückbauaufwands. Dazu wird beurteilt, ob im Gebäude Maßnahmen getroffen werden, um die Verbindungsmittelanzahl zu reduzieren, und ob die Verbindungsmittel mit herkömmlichen Geräten und Hebewerkzeugen rückbaubar sind [22, 98, 103].

Tabelle 5-17: Messgrößen Demontierbarkeit

<b>Kriterium:</b> Demontierbarkeit der Bauteile		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Erreichbarkeit der Verbindungen	Rückbaubarkeit des Ausbaus und der der Sekundärstruktur	1
	Positionierung der Verbindungsmittel	1
Trennbarkeit der Verbindungsmittel	a) Teilweise schadensfrei lösbare Verbindungen b) Größtenteils schadensfrei lösbare und wiederverwendbare Verbindungen	a) 1 b) 2,5
Reduktion des Rückbauaufwands	Reduktion der Verbindungsmittelanzahl	1
	Rückbau mit einfachen Geräten möglich	0,5

Tabelle 5-18: Beurteilung der Trennbarkeit der Verbindungsmittel zwischen Bauteilen

Beurteilung der Lösbarkeit	Zimmermannmäßige Verbindungsmittel	Axial belastete mechanische Verbindungsmittel	Lateral belastete mechanische Verbindungsmittel	Besondere Stahlverbindungen
Nur unter großer Beschädigung lösbar	-	Verklebung [98]	Verklebung [98]	-
Nicht schadensfrei lösbar, nur mit hohem Aufwand lösbar	-	Nägeln, Klammern [91, 98]	Nägeln, Nagelplatten, Klammern, Holzschrauben [91, 98]	-
Häufig schadensfrei oder mit geringer Beschädigung lösbar, eingeschränkte Wiederverwendung	Klassische Zimmermannmäßige Verbindungen z. B. Schwalbenschwanz, Zapfen, Kerben [91, 98]	Holzschrauben, [91, 98]	Dübel [91]	Verdeckte Balkenschuhe aus Stahl [91]
Zumeist schadensfrei lösbar und wiederverwendbar	Formschlüssige Kontaktverbindungen, z. B. Treppenversätze, Fingerzinken, Schubnocken und Passverzahnungen mit Kerbflanken [95]	Gewindestangen, Bolzen und Passbolzen mit Unterlegscheiben und Muttern, Vorgespannte Gewindestangen, eingeklebte Gewindestangen mit Stahlverbindungen, metrische Schrauben in Gewindemuffen [26, 91, 95, 98]	Bolzen, Passbolzen, Gewindestangen und eingeklebte Gewindestangen bei rein elastischer Beanspruchung, Schubverbinder aus Hartholz und Hartholz Konusdübel mit Verschraubung zur Lagesicherung [26, 91, 95, 98]	Spezielle Stahlbauteile zur schadensfreien Demontage: u.a. Rothoblaas X-Rad, Eingeschraubte Gewindemuffen, z. B. Sihga IdeFix [91]

### Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils

Während die Demontierbarkeit der Bauteile die Verbindung zwischen den Bauteilen betrachtet und für die Wiederverwendung auf Gebäude- und Bauteilebene maßgebend ist, betrachtet die Trennbarkeit innerhalb des Bauteils die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauelementen, Komponenten und Materialien innerhalb eines Bauteils. Die Trennbarkeit ist neben der Reparaturfähigkeit auch entscheidend für die Wiederverwendung von Bauelementen und Komponenten sowie für das Materialrecycling. Dafür werden zwei Messgrößen betrachtet: die Verbindung zwischen den Komponenten sowie das Wiederverwendungspotenzial der Komponenten.

Erstere wird anhand von vier Aspekten beurteilt. Der Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen, die Reduktion der Bauteilschichten, die gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel sowie eine geringe Anzahl an Verbindungsmitteln innerhalb der Bauteile werden positiv bewertet. Alle genannten Aspekte vereinfachen die Trennung und sorgen dafür, dass die Komponenten nach der Trennung in einem schadensfreien Zustand vorliegen.

Letztere betrachtet, ob die im Bauteil eingesetzten Komponenten nutzungsneutral sind, also ob diese mehrmals hochwertig eingesetzt werden können. Graf [95] beschreibt den Vorteil von tragenden Bauelementen, die mehrere Funktionen erfüllen können, und nennt in diesem Zusammenhang BSP. Eine BSP-Platte mit geeigneten Abmessungen für Wand- und Deckenelemente ohne große Öffnungen kann einfach wiederverwendet werden. Nach dem Rückbau und der Trennung des ursprünglichen Bauteils entsteht ein nutzungsneutrales Bauelement, das vielseitig wiederverwendet werden kann.

Tabelle 5-19: Messgrößen Trennbarkeit

<b>Kriterium:</b> Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Verbindungen zwischen Komponenten	Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen	2
	Reduktion der Bauteilschichten	1
	Gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel	1
	Geringe Anzahl der Verbindungsmittel	1
Wiederverwendungspotenzial	Nutzungsneutrale Bauelemente und Komponenten	1

### Informationsverfügbarkeit

Zuletzt ist für den Re-Use-Fall auch die Informationsverfügbarkeit entscheidend. Da die Errichtung und die Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus in der Regel einen großen zeitlichen Abstand von mehr als 50 Jahren aufweisen, sind besondere Vorkehrungen für den Erhalt der Informationsverfügbarkeit zu treffen. Als Messgrößen werden das digitale Gebäudemodell sowie ein Rückbaukonzept gewählt. Die Grundlage für die Messgröße Digitales Gebäudemodell bildet das Vorhandensein eines digitalen Zwillings in Form eines BIM-Modells. Zusätzlich wird positiv bewertet, wenn das Gebäude in einer Bauteildatenbank erfasst wird und zur Bildung von entsprechenden Bauteilmarktplätzen beiträgt. Daneben wird bewertet, ob für das betrachtete Gebäude ein Rückbaukonzept vorliegt. Die Grundlage des Rückbaukonzepts besteht aus einem Rückbau- und Demontageplan beziehungsweise einer entsprechenden Anleitung. Die Anfertigung von Prüfkörpern und Mockups zur Validierung des Konzeptes wird zusätzlich positiv bewertet.

Tabelle 5-20: Messgrößen Informationsverfügbarkeit

<b>Kriterium:</b> Informationsverfügbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Digitales Gebäudemodell	BIM-Modell – Digitaler Zwilling	2
	Erfassung in Bauteildatenbank zur Wiederverwendung	1
Rückbaukonzept	Rückbau- und Demontagekonzept	2
	Mock-Up / Prüfkörper zur Erprobung von Rückbauszenarien	1

### Materialrecycling

In den Hierarchieebenen der Wiederverwendung ist das Materialrecycling der Wiederverwendung auf Gebäude-, Bauteil- und Komponentenebene untergeordnet [26, 98, 99]. Dennoch sollten die Bauteile mit recyclingfähigen Materialien hergestellt werden, da die

Lebensdauer der Materialien keine unendliche Wiederverwendung zulässt [26]. Um die Recyclingfähigkeit zu beurteilen, werden das Tragwerk, die Gebäudehülle sowie der Ausbau des Gebäudes betrachtet. Beim Tragwerk werden die tragenden Bauelemente beurteilt. Entscheidend für die Recyclingfähigkeit biogener Materialien wie Holz sind die Sortenreinheit und Schadstofffreiheit. So können die Bauelemente aus Holz, wenn diese ihr Wiederverwendungspotenzial im technischen Kreislauf ausgeschöpft haben, in den biotischen Kreislauf überführt werden, dort zunächst in einer Kaskadennutzung zu weniger hochwertigen Holzwerkstoffen verarbeitet und schlussendlich der Kompostierung zugeführt werden [91]. Beton wird bei der Beurteilung der Recyclingfähigkeit eher kritisch betrachtet, da bisher keine Verfahren absehbar sind, die geschlossene Kreisläufe beim Recycling ermöglichen [21]. Bei der Gebäudehülle werden der Fassaden- und Dachaufbau bewertet. Bei dem Ausbau werden die nicht tragenden Innenwandaufbauten und Deckenaufbauten bewertet. Positiv werden jeweils die sortenreine Trennbarkeit sowie der Einsatz von kaskadenfähigen oder Closed-Loop-Materialien bewertet.

*Tabelle 5-21: Messgrößen Materialrecycling*

<b>Kriterium: Materialrecycling</b>		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Recyclingfähigkeit Tragwerk	Tragende Bauteile und Bauteilelemente	2
Recyclingfähigkeit Gebäudehülle	Fassade	1
	Dachaufbau	1
Recyclingfähigkeit Ausbau	Innenwand	1
	Boden	1

## 6. Referenzanalyse

Im folgenden Kapitel werden die ausgewählten Referenzgebäude aus dem DACH-Raum mit den in Kapitel 5 erarbeiteten Bewertungskriterien analysiert und ausgewertet.

### 6.1. Auswahl der Referenzgebäude

Bei der Auswahl der Referenzgebäude wurden folgende Kriterien angewandt: Zunächst muss das Gebäude ein Holz- oder ein Holzhybridgebäude der Gebäudeklasse 4 oder 5 sein. Die Nutzung muss zumindest zum Teil dem Wohnzweck dienen. Räumlich wird die Auswahl der Gebäude auf den DACH-Raum beschränkt, wobei aus jedem der entsprechenden Länder ein Referenzgebäude gewählt werden soll. Die Referenzgebäude sollen außerdem herausragende Beispiele des nachhaltigen, mehrgeschossigen Holzbaus sein, welches zudem Ansätze der Rückbaufähigkeit und Kreislauffähigkeit aufzeigt. Aus der Literaturrecherche zum kreislauffähigen Bauen und der Suche nach geeigneten Referenzobjekten wird deutlich, dass die Kreislauffähigkeit in den letzten Jahren zunächst in der Forschung an Relevanz gewonnen hat, aber das kreislauffähige Bauen noch nicht am Markt etabliert ist, während CO<sub>2</sub>-armes Bauen mit Holz bereits seit längerem in der Baubranche praktiziert wird. Bei der Suche nach kreislauffähigen Gebäuden ist außerdem aufgefallen, dass kreislauffähig geplante Pilotprojekte größtenteils für temporäre Nutzungen oder Büronutzungen errichtet wurden, während im mehrgeschossigen Wohnungsbau kaum Projekte zu finden waren, die rückbaufähig geplant wurden. Dies kann natürlich einerseits mit der zu erwarteten Nutzungsdauer der Gebäude zu tun haben, welche im Wohnungsbau deutlich länger ist als im Industriebau [5], aber wahrscheinlich auch mit den damit verbundenen Baukosten, welche aufgrund der Entwicklung neuer, bisher nicht standardisierter Verbindungen und Bauteile höher ausfallen. Eine genaue Begründung der Auswahl erfolgt jeweils zu Beginn der entsprechenden Referenzanalyse. Folgende Gebäude wurden für die Referenzanalyse ausgewählt:

- (1) Haus des Holzes, Sursee, Schweiz
- (2) Bikes & Rails, Wien, Österreich
- (3) Walden 48, Berlin, Deutschland

### 6.2. Haus des Holzes (CH)

Das Haus des Holzes ist das neueste der drei Referenzobjekte. Bei der Planung und Konstruktion des Haus des Holzes wurde von den drei betrachteten Objekten am meisten Augenmerk auf die Kreislauffähigkeit und Ressourceneffizienz gelegt. Beide Ziele werden konsequent umgesetzt, wobei auch erhebliche Mehrkosten in Kauf genommen werden.

Es unterscheidet sich beim Nutzungszweck von den weiteren Referenzobjekten, welche in den Regelgeschossen ausschließlich zu Wohnzwecken genutzt werden, während beim Haus des Holzes nur einer der drei Baukörper zu Wohnzwecken genutzt wird. Die restliche Nutzfläche wird für Büroräumlichkeiten genutzt, wobei der Hauptnutzer, das Ingenieurbüro Pirmin Jung AG, zeitgleich Bauherr des Gebäudes ist.

#### 6.2.1. Grundlagen

Das Haus des Holzes wurde vom Ingenieurbüro Pirmin Jung als Bauherr und späterer Nutzer realisiert. Entstanden ist ein Gebäude mit Wohn- und Gewerbenutzung. Die Planung fand von 2017 bis 2021 statt, die Herstellung von 2021 bis 2022 und die Inbetriebnahme im Jahr 2022. Das Ziel der Bauherren war es, ein ganzheitliches, nachhaltiges Gebäude zu bauen. Das Haus des Holzes ist nach SNBS-Platin und Minergie P-Eco zertifiziert [119].

Das Haus des Holzes befindet sich in Sursee. Die Kleinstadt mit etwa 10.000 Einwohnern liegt im Schweizer Kanton Luzern. Das Gebäude befindet sich in Bahnhofsnähe. Die bereits bestehenden Nachbargebäude zeichnen sich durch große Kubaturen mit 4 bis 5 oberirdischen Geschossen aus. Auf dem Grundstück des Haus des Holzes befand sich zuvor eine zweistöckige Stadtvilla [120]. Folgende Kennzahlen werden vom Bauherren zu den Flächen des Projektes angegeben [120]:

Tabelle 6-1: Haus des Holzes – Flächen und Volumen

Bezeichnung	Fläche/Volumen
Grundstücksfläche:	1.748 m <sup>2</sup>
Gebäudegrundfläche:	707 m <sup>2</sup>
Gebäudevolumen:	16.543 m <sup>3</sup>
Geschossfläche:	4.757 m <sup>2</sup>
Nutzfläche:	3.774 m <sup>2</sup>
Gewerbe:	2.108 m <sup>2</sup>
Wohnen:	639 m <sup>2</sup>
Untergeschoss:	1.027 m <sup>2</sup>
Konstruktions-, Verkehrs- und Funktionsfläche:	unbekannt

Wie aus der Flächenaufteilung der Nutzflächen zu entnehmen ist, wird das Gebäude sowohl zu Wohn- als auch zu Gewerbezwecken genutzt. Wobei die gewerbliche Nutzung hauptsächlich eine Büronutzung ist. Zusätzlich ist zum aktuellen Zeitpunkt ein Sportstudio im Gebäude untergebracht [120].

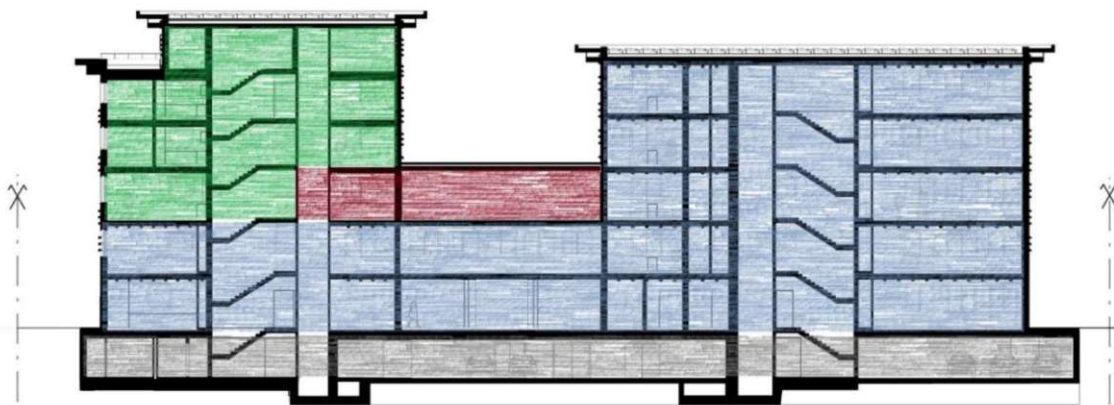


Abbildung 6-1: Haus des Holzes - Querschnitt mit Nutzung: Büro (blau), Wohnen (grün), Sportstudio (rot) und Untergeschoss (grau) ( Eigene Bearbeitung aus [119])

Das Gebäude besteht aus drei Baukörpern. Der mittlere Baukörper hat die geringste Grundfläche und ist auch mit 3 Geschossen am niedrigsten. Der Baukörper mit der zweitgrößten Grundfläche ist der Wohnturm und mit 6 Geschossen der höchste der drei Baukörper. Der ausschließlich als Büro genutzte Baukörper mit der größten Grundfläche ist mit 5 Geschossen am zweithöchsten.

Das Untergeschoss ist aus Stahlbeton. Ab dem Erdgeschoss wird das Gebäude vollständig in Holzbauweise errichtet [120]. Die tragenden Achsen verlaufen in die Gebäudelängsrichtung. Dabei dienen jeweils die Außenwände sowie die Mittelachse als Auflager für die Decken [121]. Die Decken spannen in Richtung der kurzen Gebäudeseite. Die Mittelachse ist in Skelettbauweise mit Stützen und Trägern errichtet, für die Außenwände kommt eine Skelett-Rahmenbauweise zum Einsatz [121]. Ein Skelett aus Primärstützen wird dabei in vorgefertigte Holztafelbauwände integriert, um die Vorteile des Skelettbaus (Ressourceneffizienz) mit denen des Holztafelbaus (hoher Vorfertigungsgrad) zu kombinieren [116, 121]. Für die Aufnahme der horizontalen Lasten werden aussteifende Wände (siehe Abbildung 6-2, grün) aus BSP verwendet. Jeder der Hauptbaukörper wird durch eine Längs- und zwei Querwände ausgesteift [121]. Für die Verbindungen zwischen den tragenden Bauteilen wurde versucht, schadensfrei lösbare Verbindungsmittel zu wählen [120, 121].

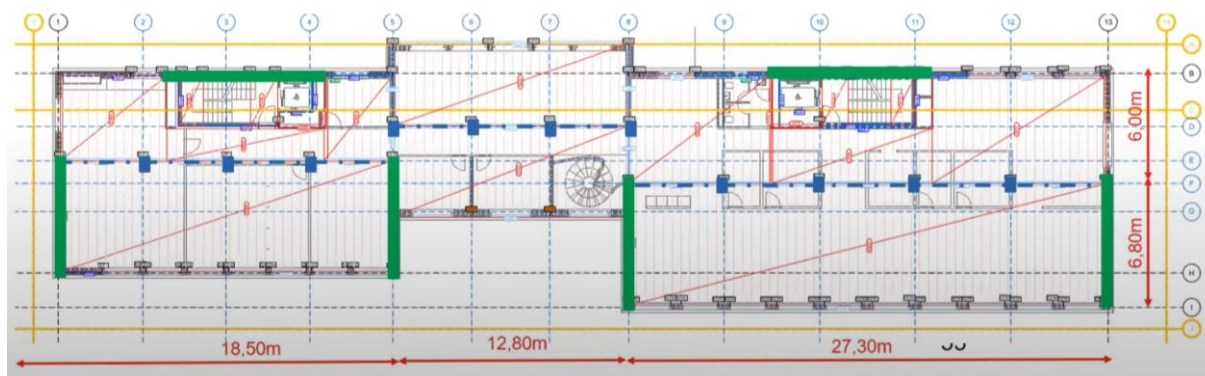


Abbildung 6-2: Haus des Holzes - Grundriss Tragwerk (aus [121])

Das Energiekonzept umfasst die Wärme- und Kälteproduktion mittels Erdsonden-Wärmepumpe [120]. Dazu verfügt das Gebäude über 3 Wasserspeicher mit jeweils 2000 Litern

Kapazität [120]. Die Lüftungsanlage verfügt über eine Wärmerückgewinnung [120]. Auf den Dachflächen ist eine PV-Anlage (117 kWp) installiert. Das Gebäude hat zudem über einen 80 kWh Salz-Stromspeicher sowie 6 PKW-Ladestationen im Untergeschoss [120]. Die vertikale Verteilung der Haustechnik erfolgt in eigens dafür vorgesehenen und für Reparaturarbeiten zugänglichen Schächten [120].



## 6.2.2. Analyse – Reduce

### Flächeninanspruchnahme

Der Baugrund, auf dem sich das Haus des Holzes befindet, ist eine Innenentwicklungsfläche. Teile des Grundstücks weisen eine Vornutzung auf. Teile des Grundstücks waren davor unbebaut [120]. Es wurden keine Maßnahmen wie Aufständigung oder Verzicht auf Unterkellerung zur Minimierung des Eingriffs in den Boden unternommen. Bei der Gestaltung der Umgebung erfolgte der Einsatz unterschiedlicher Substrate, um die Versickerungsleistung des Oberflächenwassers zu verbessern [120].

Tabelle 6-2: Haus des Holzes – Bewertung der Flächeninanspruchnahme

Kriterium: Flächeninanspruchnahme		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Bewertung des Standortes	a) Neubau auf unbebauter Außenentwicklungsfläche	a) 0/0
	b) Nachverdichtung auf unbebauter Innenentwicklungsfläche	b) 0/2
	c) Neubau auf vorgenutzter Fläche	c) 2,5/3
	d) Neubau auf vorgenutzter Fläche - Verbesserung des Versiegelungsgrades	d) 0/4
Minimierung des Eingriffs in den Boden	Gründungsmaßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden	0/1
Ausgleichsmaßnahmen	Zusätzliche Maßnahmen, die der Bodenversiegelung entgegenwirken	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

### Nutzungsichte

Für das Pro-Kopf-Wohnverhältnis werden die Angaben zur Wohnfläche (639 m<sup>2</sup>) und die aus den Grundrissen ermittelten Wohnungstypen (4-mal 3,5 Zimmer und 2-mal 4,5 Zimmer) in das Excel-Tool (SNBS) eingegeben [120, 121]. Es ergibt sich eine geschätzte Pro-Kopf-Wohnfläche von 45,1 m<sup>2</sup>/Pers. [112]. Dies bedeutet eine durchschnittliche bis leicht unterdurchschnittliche Wohnfläche pro Kopf im Vergleich zum nationalen Durchschnitt in Österreich und Deutschland [113, 114]. Aus den zur Verfügung gestellten Grundrissen lässt sich auch erkennen, dass kein Angebot für kleine Single- und Paar-Wohnungen besteht [119]. Die Parkflächen in der Tiefgarage wurden reduziert. Den Nutzern des Gebäudes steht eine Car-Sharing-Station im Untergeschoss zur Verfügung [120, 121]. Der Wohnungsspiegel bietet kein explizites Angebot für Cluster-Wohnen oder große Wohngemeinschaften [119]. Aus den Grundrissen sind gemeinschaftlich nutzbare Außenflächen und Terrassen erkennbar. Zudem können Teile der Räumlichkeiten im Erdgeschoss für Vorträge oder Veranstaltungen genutzt werden [120, 121].

Tabelle 6-3: Haus des Holzes - Bewertung der Nutzungsdichte

<b>Kriterium:</b> Nutzungsdichte		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Pro-Kopf-Wohnfläche	a) Größer als durchschnittliche Wohnfläche > 50 m <sup>2</sup>	a) 0/0
	b) Durchschnittliche Wohnfläche bis 15 % reduziert 42,5 m <sup>2</sup> - 50 m <sup>2</sup>	<b>b) 1/1</b>
	c) Durchschnittliche Wohnfläche 15 – 30 % reduziert 35 m <sup>2</sup> - 42,5 m <sup>2</sup>	c) 0/2
	d) Durchschnittliche Wohnfläche > 30 % reduziert < 35 m <sup>2</sup>	d) 0/3
Angebot kleiner Wohnungen	1 bis 1,5-Zimmer Wohnungen < 35 m <sup>2</sup> oder 2 bis 2,5-Zimmer Wohnungen < 70 m <sup>2</sup>	0/1
Mobilitätskonzept mit Gemeinschaftsnutzung	Car-Sharing Angebote, Förderung der Fahrradmobilität	0,5/0,5
Nutzungsmaximierende Wohnformen	Cluster-Wohnen oder Wohngemeinschaften im Wohnungsspiegel	0/0,5
Flächen zur Gemeinschaftsnutzung	Gemeinschaftsbüro, Waschräume, Werkstätten, Aufenthaltsräume, Spielräume etc.	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>2/6</b>

### Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

Beim Haus des Holzes wurde keine nennenswerte Bauteilwiederverwendung oder Bestandsnutzung praktiziert.

Tabelle 6-4: Haus des Holzes - Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

<b>Kriterium:</b> Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Einsatz wiederverwendeter Bauteile	a) Kein Einsatz	a) 0
	b) Vereinzelter Einsatz, z. B.: einzelne Stützen oder kleinere Teile der Fassadenbekleidung	b) 0/1
	c) Systematischer Einsatz in einzelnen, nicht tragenden Bauteilschichten, z. B.: Fassadenbekleidung oder Fußbodenbelag	c) 0/2
	d) Systematischer Einsatz in der Sekundärstruktur, z. B. nicht tragende Fassadenelemente oder Fenster	d) 0/3
	e) Systematischer Einsatz für einen wesentlichen Teil der Tragstruktur, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk oder Weiternutzung eines bestehenden Untergeschosses	e) 0/4
	f) Großteil der Primär- und Sekundärstruktur wiederverwendet, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk mit wiederverwendeten Fassadenelementen	f) 0/5
	g) Nahezu vollständiger Einsatz wiederverwendeter Bauteile, z. B.: Ortswechsel eines ganzen Gebäudes	g) 0/6
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>0/6</b>

### Reduktion des Stahlbetonteils

Das oberirdische Tragwerk wird ab dem Erdgeschoss vollständig in Holzbauweise ausgeführt. Es wurde nicht auf die Errichtung eines Untergeschosses verzichtet. Das Untergeschoss wurde konventionell mit Ort beton errichtet. Dabei konnten keine Bestandsfundamente oder wiederverwendete Fundamente genutzt werden, um den Anteil des Stahlbetons zu senken. Bei der oberirdischen Erschließung konnte vollständig auf Stahlbeton verzichtet werden.

Tabelle 6-5: Haus des Holzes - Bewertung Reduktion des Stahlbetonteils

<b>Kriterium:</b> Reduktion des Stahlbetonteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk (oberirdisch exkl. Erschließung)	Tragstruktur ab 1. OG (exkl. Erschließungskerne) in Holzbauweise mit Verzicht auf Hybridbauteile	1/1
	Verzicht auf ein Stahlbeton-Erdgeschoss	1/1
Gründung	Verzicht auf Untergeschoss	0/2
	Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung	0/1
Erschließung	Verzicht auf Stahlbeton-Erschließungskerne	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3/6</b>

#### *Ressourceneffizienz des Holztragwerks*

Die Decken bestehen im Bereich der Büronutzung und des Studios aus Rippendecken, im Bereich der Wohnnutzung aus Brettstapeldecken [121]. Mit Ausnahme der Treppenhauswände wird auf tragende Innenwände verzichtet. Die tragende Mittelachse des Gebäudes besteht aus Stützen und Trägern. Die Fassade besteht aus einer Mischung aus Skelettragwerk und Holztafelbauwänden. Das Skelettragwerk wird in Form von Holztafelbauelementen vorgefertigt. Dadurch kann der Abstand zwischen den Holzständern im Vergleich zu einer tragenden Holztafelbauwand signifikant erhöht werden und beträgt beim Haus des Holzes mehr als zwei Meter [121]. Dazwischen installierte Holzständer dienen lediglich der Lagesicherung der Dämmung und zur Weiterleitung der Windlasten und können entsprechend klein dimensioniert werden [116]. Es handelt sich dabei um eine sehr effiziente Bauweise [116]. Für die Aussteifung wurden keine zusätzlichen Wände im Tragwerk benötigt. Sie erfolgt sehr effizient, indem die vorhandenen Treppenhauskerne zusammen mit Teilen der Außenwand, welche in den entsprechenden Bereichen mit BSP-Scheiben ausgebildet werden, aussteifend wirken [121].

Tabelle 6-6: Haus des Holzes - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Ressourceneffizienz des Holztragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Decken	a) Brettstapeldecken	a) 0/1
	b) Kasten- oder Rippendecken	<b>b) 1,5/2</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Innenwände	a) Reduktion tragender Innenwände	a) 0/1
	b) Skelettragwerk ohne tragende Innenwände	<b>b) 2/2</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Fassade	Holztafelbauweise	1/1
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Aussteifung	Gebäudeaussteifung über Treppenhauswände und Teile der Außenwände	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

### Ökologische Baustoffwahl

Als Fußbodenbelag kommt trocken verlegtes Parkett zum Einsatz. Auch im Fußbodenaufbau werden innovative Lösungen eingesetzt, um ökologische Baustoffe verwenden zu können. Als Schüttung kommt eine ungebundene Kalksplittschüttung zum Einsatz. Darüber werden Holzfaserplatten ausgelegt [122]. Anstelle eines mineralischen Estrichs werden Elemente aus Buchenholz verwendet. Diese sind vollständig klebstofffrei [122].

Die raumseitige Bekleidung besteht im Wohnbereich aus Gipskarton- oder Gipsfaserplatten. Im Bereich der Büronutzung wird eine Holzschalung als raumseitige Bekleidung verwendet. Die Dämmung in den Außenwänden besteht aus Mineralfaserdämmung; ansonsten wurden Holzfaserdämmungen verwendet [121]. Die außenseitige Fassadenbekleidung besteht aus einer Holzschalung [121].

Tabelle 6-7: Haus des Holzes – Bewertung der ökologischen Baustoffwahl

Kriterium: Ökologische Baustoffwahl		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Fußbodenaufbau	Bodenbelag aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/0,5
	Alternativen zu mineralisch gebundener Schüttung	0,25/0,5
	Alternativen zu mineralischer Trittschalldämmung	0,5/0,5
	Alternativen zu Zementestrich	0,5/0,5
Raumseitige Bekleidung	Raumseitige Bekleidungen aus Holzwerkstoff oder Lehm	0,5/1
Dämmstoffe	Verwendung biogener Dämmstoffe	0,5/1
Fassadenbekleidung	Fassadenbekleidung aus nachwachsenden Rohstoffen	1/1
Fenster	Holzfenster	1/1
Gesamtbewertung		4,75/6

### 6.2.3. Analyse - Long-Use

#### Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

Innerhalb der Nutzungseinheiten existieren keine tragenden Innenwände. Tragende Wände sind im Bereich der Fassade und des Treppenhauses [120]. Nicht tragende Innenwände können im Bereich der Büronutzung mittels gleitenden Anschlüssen auf der Dreischichtplatte der Rippendecke demontierbar befestigt werden [71]. Durch den trockenen Bodenaufbau, welcher aufgrund der kleinformatischen Estrichelemente punktuell veränderbar ist, lassen sich in diesem Gebäudebereich die nicht tragenden Innenwände einfach demontieren und neu aufbauen [122, 123]. Im Bereich der Wohneinheiten wird ein anderer Fußbodenaufbau gewählt. Über der Brettstapeldecke befinden sich eine Splittschüttung, eine Trittschalldämmung und ein Zementestrich. Die nicht tragenden Innenwände im Wohnbereich scheinen den Zementestrich zu durchstoßen, weshalb ein Versetzen der Innenwand nicht ohne Eingriff in den Fußboden möglich ist [121]. Im Bereich der Decke besteht jedoch auch hier ein

gleitender Anschluss [121]. Die Fassade weist circa alle 2,5 bis 2,7 m eine tragende Stütze auf. In diesem Abstand können folglich auch nicht tragende Innenwände problemlos angeschlossen werden [121]. Im Bereich der Wohnnutzung ermöglicht die Erschließung keine kleineren, voneinander unabhängigen Einheiten. Im Bereich der Büronutzung, wo jedes Stockwerk ab dem 2. OG eine Nutzungseinheit bildet, könnte über einen Vorraum im Anschluss an das Treppenhaus ein Zugang zu mehreren kleineren Nutzungseinheiten gewährleistet werden. Im Wohnbereich weisen die Zimmer Abmessungen zwischen 3,0 und 5,0 m auf. Im Bürobereich des Gebäudes sind keine Zimmergrößen festgelegt, da diese flexibel anpassbar und nutzerabhängig sind [119]. Im Bereich der Wohnnutzung existieren mehrere Steigzonen je Einheit. Im Bereich der Büronutzung existieren drei Steigzonen, zu beiden Seiten sowie in der Mitte des Treppenhauses. Dies würde eine Unterteilung in kleinere Nutzungseinheiten ermöglichen (siehe Abbildung 6-3).

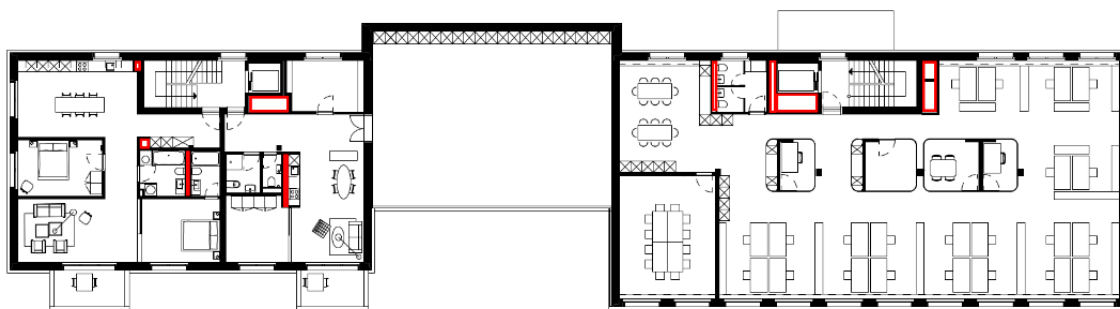


Abbildung 6-3: Haus des Holzes - Grundriss 2. OG mit Steigschächten (Bearbeitet, aus [119])

Tabelle 6-8: Haus des Holzes - Bewertung der Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

Kriterium: Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Tragwerk	Größtenteils nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit > 80 %	1/1
	Anschlüsse von leichten Innenwänden ohne Eingriff in Fußbodenaufbau und Decke	0,5/1
	Anschlussmöglichkeit von Innenwänden in geringen Abständen in der Fassade	1/1
Erschließung	Erschließung kleiner voneinander unabhängige Einheiten, z. B.: zwei Eingangsmöglichkeiten	0,5/1
Grundriss	Nutzungsneutrale Räume, circa 3 x 3m bis 5 x 5m	1/1
Versorgung	Mehrere Steigzonen je Einheit ermöglichen Teilung in kleinere Einheiten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5/6</b>

#### Umnutzung für eine andere Nutzungsart

Im vorhergehenden Punkt wurde bereits erläutert, dass innerhalb der Nutzungseinheiten keine tragenden Wände sind. Dies trifft ebenso auf die Trennwände zwischen den Nutzungseinheiten zu. Auch diese sind nicht tragend. Im Bereich der Büronutzung ist von einer Nutzlast von 2 kN/m<sup>2</sup> oder mehr auszugehen, sodass hier neben der Büronutzung auch eine Wohnnutzung möglich ist. Da das Tragwerk prinzipiell ein Skelettragwerk ist und auch die

vorgefertigten Holztafelbauelemente nur punktuell im Bereich der Stützen tragende Funktionen übernehmen, ist die Fassade relativ frei in der Außenansicht gestaltbar [123].

Im Bereich der Wohnnutzung wird eine Lichte Raumhöhe von mindestens 2,50 m eingehalten, im Bereich der Büronutzung beträgt die Raumhöhe 2,90 m. Im Erdgeschoss wird eine lichte Raumhöhe größer als 3,00 m erreicht. Eine Umnutzung von den aktuellen Wohnungen zu Büros beziehungsweise Arbeitsplätzen ist eingeschränkt möglich, bei Installation einer Zwischendecke zur Leitungsführung kann eine Lichte Raumhöhe von 2,50 m dort nicht mehr eingehalten werden. Die aktuell als Büro genutzten Flächen weisen die entsprechende Raumhöhe auf, um zu einem späteren Zeitpunkt zu Wohnzwecken genutzt zu werden. Das Erdgeschoss ist mit einer lichten Raumhöhe von über 3,00 m in der Nutzung kaum eingeschränkt. Die maximale gesamte Gebäudetiefe beträgt im Baukörper mit reiner Büronutzung circa 12,25 m, im Baukörper mit Wohnnutzung beträgt die Gebäudetiefe etwa 10,00 m. Die Bruttogrundfläche je Erschließungskern beträgt weniger als 400 m<sup>2</sup>. Die Ermittlung der Raumhöhen und Gebäudetiefen erfolgte auf Grundlage, der, von Pirmin Jung zur Verfügung gestellten Planunterlagen [124]<sup>2</sup>.

Zu möglichen Platzreserven in Schächten und Technikräumen zum Zweck der Erweiterung der Haustechnischen Anlagen können aus den vorhandenen Unterlagen keine Aussagen getroffen werden. Da im Projekt die Flexibilität und zukünftige Umnutzung einen hohen Stellenwert besitzt [120, 121] ist davon auszugehen, dass neben der Zugänglichkeit der haustechnischen Anlagen auch gewisse Platzreserven für zukünftige Umbaumaßnahmen und neue Anforderungen vorhanden sind.

Tabelle 6-9: Haus des Holzes – Bewertung der Umnutzung für eine andere Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Nutzungsneutrales Tragwerk, größtenteils nicht tragende Innen- und Trennwände > 80 %	1/1
	Tragreserven, Nutzlast > 2 kN/m <sup>2</sup> auf 50 % der Bruttogrundfläche	0,5/0,5
	Fassade austauschbar, ermöglicht z. B.: Vergrößerung der Belichtungsfläche	0,5/0,5
Geometrie	a) Raumhöhe > 2,50 m b) Raumhöhe > 2,75 m c) Raumhöhe > 3,00 m	a) 0/0,5 <b>b) 0,75/0,75</b> c) 0/1
	a) Gebäudetiefe: 10,00 m < Tiefe < 16,50 m b) Gebäudetiefe: 11,50 m < Tiefe < 13,50 m	a) 0/0,5 <b>b) 0,75/1</b>
Erschließung	a) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 600 m <sup>2</sup> b) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 400 m <sup>2</sup>	a) 0/0,5 <b>b) 1/1</b>
	Versorgung	Möglichkeit zur Erweiterung Haustechnischer Anlagen, z. B.: Platzreserven in Technikräumen und Schächten
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

<sup>2</sup> [124] O. Bopp, "Pirmin Jung Schweiz AG, persönliche Kommunikation," 2024. ist eine nicht öffentlich einsehbare Quelle

### Nutzungsvielfalt

Das Gebäude befindet sich in Bahnhofsnähe und ist somit an den öffentlichen Personennahverkehr angebunden. Im Untergeschoss wurde bewusst auf Stellplätze verzichtet. Dafür befinden sich hier Umkleieräume und Duscmöglichkeiten für die Anreise mit dem Fahrrad. In der Umgebung befinden sich diverse Geschäfte, Supermärkte, Gastronomiebetriebe, Wohn- und Bürogebäude sowie Freizeitangebote. Im Wohnungsspiegel werden jeweils drei 3,5-Zimmer- und 4,5-Zimmer-Wohnungen angeboten [121]. Innerhalb des Gebäudes befinden sich neben der Wohnnutzung auch Büronutzung sowie ein Yogastudio [121].

Auf dem Grundstück sind keine Platzreserven zur horizontalen Erweiterbarkeit vorhanden. Die Möglichkeit einer Aufstockung, also einer vertikalen Erweiterung, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht gegeben, da das Gebäude die maximale Gebäudehöhe aus dem Bebauungsplan von 20 m erreicht. In unmittelbarer Nachbarschaft sind Zonen mit einer maximalen Gebäudehöhe von 50 beziehungsweise 60 m ausgewiesen [125]. Möglicherweise kann das Gebäude in Zukunft vertikal erweitert werden. Dazu sind jedoch unter anderem die Brandschutzbestimmungen zu beachten.

Tabelle 6-10: Haus des Holzes - Bewertung der Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit

<b>Kriterium:</b> Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Standortqualität	Bewertung der öffentlichen Verkehrsanbindung	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld, mind. Wohnen + Büro + Gewerbe + Gastro	1/1
Nutzungsvielfalt	Breiter Wohnungsspiegel mit Wohnungen von 1 bis 4 Zimmern	0/1
	Verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Projekts, mind. Wohnen + Büro / Gewerbe / Gastro	1/1
Erweiterbarkeit	Horizontale Erweiterbarkeit durch Reserveflächen	0/1
	Vertikale Erweiterbarkeit	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

### Langlebigkeit Holztragwerk

Alle tragenden Bauteile befinden sich innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Im Bereich der Außenwände sind Tragwerk und Gebäudehülle nicht zwei getrennte Bauteile. Die Fassade besteht aus vorgefertigten Holztafelbauelementen. Bei deren Herstellung wurde auf die Trennbarkeit zwischen den einzelnen Bauteilschichten geachtet. So erfolgt die Befestigung der Bekleidung und der außenseitigen Schalung mittels Verschraubung [71, 120, 121]. Eine vollständige konstruktive Trennung in zwei separate Bauteile wurde bei der Gebäudehülle und dem Tragwerk nicht umgesetzt.

Grundsätzlich wurden die Bauteilstöße im Bereich der Außenwände sowie der tragenden Mittelachse so konstruiert, dass keine Querdruckbelastungen in den Decken anfallen [121]. Dies minimiert vertikale Verformungen [116], sodass die Robustheit des Tragwerks erhöht wird.



Eine einfache optische Kontrolle tragender Bauteile ist bei Teilen des Tragwerks möglich. Die Stützen und Träger der Mittelachse des Gebäudes sowie die Brettstapeldecken und Teile der Rippendecken sind stets sichtbar und lassen sich optisch auf Beschädigungen oder Veränderungen kontrollieren. Im Bereich der Außenwände lässt sich die Fassadenverkleidung entfernen und das darunterliegende Tragwerk kontrollieren. Eine laufende Sichtkontrolle der tragenden Bauteile im Bereich der Außenwand ist jedoch nicht durchführbar.

Tabelle 6-11: Haus des Holzes – Bewertung der Langlebigkeit des Tragwerks

<b>Kriterium:</b> Langlebigkeit des Tragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Witterungsschutz	Keine freie Bewitterung tragender Holzbauteile	1/1
	Alle tragenden Holzbauteile innerhalb der thermischen Gebäudehülle	1/1
Trennung Tragwerk und Gebäudehülle	a) Trennbare Bauteilschichten b) Getrennte Bauteile	a) 1/1 b) 0/2
Robustheit	Tragwerksreserven, Maßnahmen zur Verringerung von Setzungen, etc.	1/1
Zugänglichkeit	Einfache optische Kontrollmöglichkeit tragender Bauteile	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4,5/6</b>

#### *Austausch und Reparatur*

Das Haus des Holzes ist so konstruiert, dass die vertikalen Versorgungsschächte zugänglich sind [120]. In Abbildung 6-3 ist zu erkennen, dass die vertikalen Schächte so gelegen sind, dass ein Zugang von allen Geschossen möglich ist. Es ist zudem zu erkennen, dass teilweise große Schächte verwendet werden, was ebenfalls die Zugänglichkeit verbessert. Im Bereich der Wohnnutzung ist in Abbildung 6-3 zu erkennen, dass die Versorgungsschächte im Bereich der übereinanderliegenden Bad- und Kücheneinheiten liegen. Dadurch wird die horizontale Leitungsführung innerhalb der Nutzungseinheit minimiert.

Innerhalb der Wohnnutzung sind keine weiteren Angaben zur horizontalen Leitungsführung aus den Unterlagen zu entnehmen. Es ist davon auszugehen, dass die horizontale Leitungsführung für die Elektrik hauptsächlich in den nicht tragenden Innenwänden erfolgt, während die horizontale Leitungsführung für Frisch- und Abwasser durch die Platzierung der vertikalen Schächte stark minimiert wird. Im Bereich der Büronutzung erfolgt ein Großteil der horizontalen Leitungsführung in einer Vorsatzschale im unteren Wandbereich und ist somit einfach zugänglich.

Die Fassade ist so gestaltet, dass zwischen den einzelnen Bauteilschichten nur mechanische Verbindungen verwendet werden. Sowohl die Fassadenbekleidung als auch die Brandschutzbekleidung sind verschraubt. Die Dampf- und Winddichtung sind vereinzelt geklammert und mithilfe der Bekleidung eingeklemmt, während die Dämmung in die Gefache eingeklemmt ist [71, 124]. Die Fassade ist zudem so konzipiert, dass die tragende und dämmende Kernschicht mit entsprechenden Brandschutzanforderungen beidseitig mit lösbaren und austauschbaren Bekleidungen ergänzt wird [121]. Da die Fassade ebenfalls Teil des Tragwerks ist, ist ein schadensfreier Ausbau und Austausch ganzer Fassadenelemente nicht möglich. Die nicht tragenden Innenwandaufbauten können problemlos demontiert werden,

ohne Schäden an den angrenzenden Bauteilen zu verursachen. Der Rückbau ist auch im Konzept des Haus des Holzes vorgesehen, um flexible Grundrisse zu ermöglichen [71, 120, 121, 123]. Der Bodenaufbau ist im Bereich der Büronutzung durch die trocken verlegten Estrichelemente aus Buchenholz und die darin eingeklemmte Fußbodenheizung schadensfrei und punktuell rückbaubar [122]. Im Bereich der Wohnnutzung mit Zementestrich ist dies nicht der Fall [121].

Die raumseitigen Wandoberflächen sind im Bereich der Wohnnutzung gespachtelte und gestrichene Bekleidungen und lassen sich leicht erneuern. Im Bereich der Büronutzung bildet eine Holzschalung die raumseitige Oberfläche. Diese kann problemlos ausgetauscht werden. Der Bodenbelag wird im Gebäude aus trocken verlegtem Parkett hergestellt. Dieses lässt sich bei leichten Beschädigungen oder Verschleiß durch Abschleifen erneuern und kann bei größeren Beschädigungen punktuell rückgebaut und ausgetauscht werden, ohne andere Bauteilschichten zu beschädigen.

*Tabelle 6-12: Haus des Holzes – Bewertung Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau*

<b>Kriterium:</b> Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Haustechnik	Zugänglichkeit der vertikalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Minimierung der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Zugänglichkeit der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
Gebäudehülle und Sekundärstruktur	Austausch einzelner Komponenten der Fassade durch schadensfreie Lösbarkeit und Zugänglichkeit	1/1
	Schadensfreie Lösbarkeit ganzer Fassadenelemente	0/0,5
	Rückbaubare Innenwandaufbauten (nicht tragend) ohne Beschädigung benachbarter Bauteile	1/1
	a) Schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten b) Punktuell schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten	a) 0/0,5 b) 0,75/1
Oberflächen	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Wand), z. B.: durch Anstrich	0,5/0,5
	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Bodenbelag), z. B.: durch trocken verlegtes Parkett	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,25/6</b>

#### 6.2.4. Analyse - Re-Use & Recycle

##### *Wiederverwendungspotenzial*

Sowohl die Anzahl der tragenden Bauteile als auch die Anzahl unterschiedlicher tragender Bauteiltypen wurden beim Haus des Holzes gering gehalten. Aus der nachfolgenden Abbildung [121] kann entnommen werden, dass sich die tragenden Elemente einerseits innerhalb eines Stockwerks und andererseits stockwerksweise regelmäßig wiederholen. Dies reduziert die Anzahl der Bauteiltypen.



Abbildung 6-4: Haus des Holzes - Modell des Tragwerks (aus [121])

Die Trennung zwischen Tragwerk und Sekundärstruktur ist im Bereich der Mittelachse klar durchgeführt. Im Bauteil Außenwand werden Tragfunktion und Gebäudehülle vereint, es findet dabei keine klare Trennung statt [121]. Aus dem Skeletttragwerk ergibt sich, dass das Tragwerk größtenteils aus linearen Bauteilen besteht. Dieses kann somit mit Hilfe einfacher statischer Modelle abgebildet, nachvollzogen und nachgewiesen werden [116]. Im Haus des Holzes weisen die tragenden Bauteile zumeist eine einfache lineare Form auf. Der horizontale Lastabtrag geschieht über BSP-Scheiben ohne Öffnungen [121]. Versprünge und Auskragungen oder Sprünge im Lastabtrag werden beim Tragwerk des Haus des Holzes vermieden [121]. So können die Lastpfade leicht nachvollzogen werden und sind klar erkennbar.

Die Errichtung des Tragwerks erfolgt in modularer Bauweise. Die Fassade wird aus flächig vorgefertigten Holztafelbauelementen erstellt. Die tragende Mittelachse wird aus Stützen und Durchlaufträgern hergestellt, wobei die Stützen bereits werksseitig vormontierte Stahlbauteile zur Lastdurchleitung und Lagefixierung aufweisen und der Durchlaufträger an den entsprechenden Stellen Durchlässe für die Stahlbauteile aufweist [121]. Alle Elemente lassen sich per LKW transportieren und mittels herkömmlichem Auto- oder Hochbaukran bewegen. Auch die Deckenelemente werden im Werk vorgefertigt [121]. Insbesondere die linearen Bauteile (Stützen und Träger) sowie die öffnungsfreien BSP-Elemente weisen eine hohe Nutzungsneutralität auf und können vielfältig wiederverwendet werden. Die Holztafelbauelemente und Rippendecken sind im Fall einer Wiederverwendung vor allem wieder für denselben Zweck verwendbar. Die gute Umbaubarkeit der Fassade ermöglicht jedoch auch hier einen nutzungsneutralen Einsatz.

In den beiden großen Baukörpern kommen leicht unterschiedliche Raster im Bereich von 4,60 mal 6,00 m bis 5,50 mal 6,80 m vor. In der Längsrichtung des Bauwerks ist das Raster in den

Baukörpern jeweils regelmäßig. So können innerhalb eines Baukörpers standardisierte Außenwand- und Deckenbauteile eingesetzt werden [121]. Aufgrund der geringen Unterschiede in den Maßen wird beim Konstruktionsprinzip der Außenwand zwischen den Baukörpern nicht unterschieden und ein Großteil der Bauteile wiederholt sich für jeden Baukörper geschossweise [121].

Tabelle 6-13: Haus des Holzes – Bewertung des Wiederverwendungspotenzials

Kriterium: Wiederverwendungspotenzial		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Einfachheit der Konstruktion	Reduktion tragender Bauteile und Bauteiltypen	1/1
	Klare Trennung des Tragwerks von Sekundär- und Tertiärstruktur	0,5/1
	Nachvollziehbarkeit der Belastung tragender Bauteile	1/1
Modularität und Standardisierung	Modulare Bauweise, Vorfertigung und Leichtigkeit der Elemente	1/1
	Nutzungsneutrale tragende Bauteile	1/1
	Standardisierte Raster und Bauteile	1/1
Gesamtbewertung		5,5/6

#### Demontierbare Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauteilen

Für die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel in den Wandstößen und in den Stützenstößen ist die Rückbaubarkeit der darüberliegenden Sekundärstruktur entscheidend. Im vertikalen Wandstoß ist die Lösbarkeit der Bekleidung maßgeblich. Im Wand-Deckenstoß und im Stützenstoß ist die Lösbarkeit des Fußbodenaufbaus entscheidend. Beim Haus des Holzes sind sowohl die innen- als auch außenliegenden Wandbekleidungen verschraubt und schadensfrei demontierbar, sodass die Verbindungsmittel im vertikalen Wandstoß erreichbar sind [124]. Hier muss jedoch bedacht werden, dass die innenseitige Bekleidung, sofern diese gespachtelt und gestrichen wird, nicht mehr schadensfrei lösbar ist, da die Schraubköpfe verdeckt, und nicht mehr auffindbar sind. Im Baukörper mit der Büronutzung ist auch der Fußbodenaufbau vollständig schadensfrei rückbaubar. Im Bereich der Wohnnutzung muss der Zementestrich im Falle eines Rückbaus zunächst entfernt werden, um die Verbindungen im Wand- und Stützensockel erreichen zu können. Im Dachaufbau wird eine lösbare Abdichtungsbahn eingesetzt, um den Flachdachaufbau rückbaubar zu gestalten [71]. Die Auffindbarkeit der Verbindungsmittel kann die Demontage erleichtern, da sie eine große Zeiteinsparung mit sich bringt [46]. Für die Verbindungsmittel im Stützenknoten ist die Auffindbarkeit stets gegeben. Um die Verbindungsmittel im Sockelbereich der Wand sowie der Attika leicht auffinden zu können, sind die Winkelpositionen in einem As-Build-Modell digital dokumentiert worden und abrufbar [71]. Eine sichtbare Verschraubung der Fassadenschalung ermöglicht auch ein schnelles Entfernen derselben und so ein einfaches Freilegen der vertikalen Wandstöße [71]. Im Bereich der aussteifenden Wände und der Rippendecken werden die Verbindungen mittels X-förmiger Hartholz-Verbinder hergestellt [121], deren Positionen aufgrund ihrer Größe und

Regelmäßigkeit leicht auffindbar sind. Zudem ist die Position jedes Verbinders anhand der Produktionsdaten der vorgefertigten Elemente nachvollziehbar.

Die Trennbarkeit des Stützenknotens wird als teilweise schadensfreie bis größtenteils schadensfrei lösbare Verbindung eingestuft. Es kommt ein am Stützenkopf eingeklebtes Stahlteil in Kombination mit einer am Stützenfuß befestigten Grundplatte aus Stahl zum Einsatz, diese sorgen für die Übertragung der vertikalen Kräfte sowie für die Lagesicherung der Stützen mittels Montagenocken [121]. Die Verbindung kann als schadensfrei lösbar betrachtet werden. An der Grundplatte werden zudem die darauf zulaufenden Deckenrippen mittels Verschraubung aufgehängt [121]. Hier könnte bei einem Rückbau der Drehmomentwiderstand der Verschraubung nicht für den Ausdrehvorgang ausgelegt sein und eine schadensfreie Demontage beeinträchtigen.

Die Trennbarkeit des Wandstoßes wird als schadensfrei lösbar beurteilt. Im Bereich der Holztafelbauelemente erfolgt eine Lagesicherung der Decke durch eine schräge Verschraubung der Rippe mit dem Deckenaufleger. Die Lagesicherung der Wandelemente folgt mit auf der Decke verschraubten Winkeln. Da es sich jeweils um eine Verschraubung zur Lagesicherung mit geringer Kraftübertragung handelt, werden diese Verschraubungen als schadensfrei lösbar angesehen.

Der Wandstoß im Bereich der aussteifenden Wände (siehe Abbildung 6-5) wird ebenfalls als schadensfrei lösbar angesehen. Die Übertragung der Schubkräfte zwischen den Wänden erfolgt in der horizontalen Fuge mittels Verzahnung. Die vertikalen Wandstöße sowie die Verbindung zwischen der Deckenscheibe und der Wand werden mittels Schubverbindern aus Hartholz hergestellt [121]. Die Ausbildung der Deckenscheiben erfolgt im Bereich der Rippendecken ebenfalls mittels Hartholzverbinder [121]. Im Bereich der Brettstapeldecke wird ein „liegendes Fachwerk mit vereinzelt Anschlägen“ [71] zur Ausbildung der Deckenscheibe verwendet.

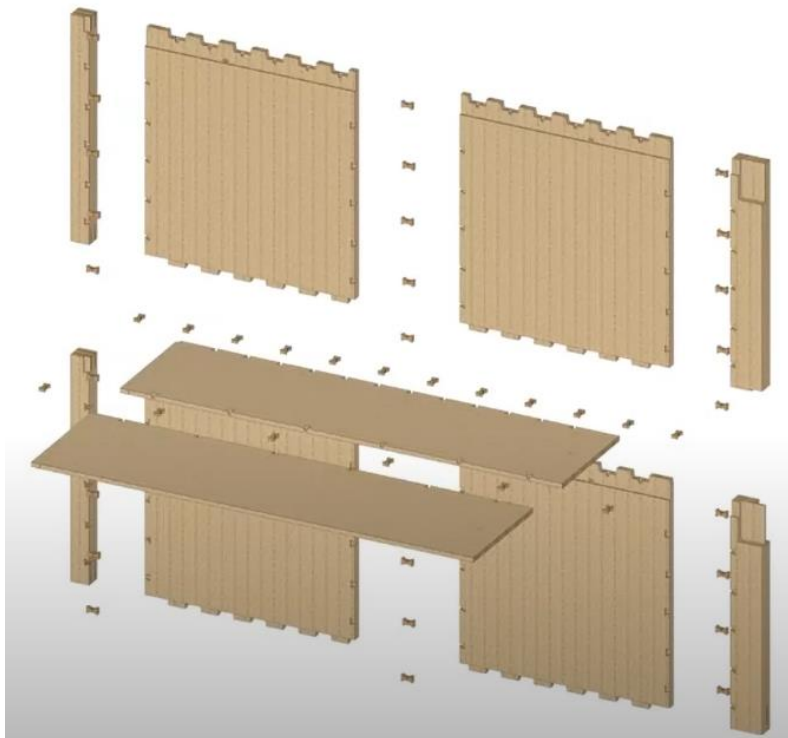


Abbildung 6-5: Haus des Holzes - Wandstoß Aussteifung Haus des Holzes (aus [121])

Insgesamt wird die Trennbarkeit der Bauteilverbindungen als teilweise schadensfrei lösbar bis größtenteils schadensfrei lösbar eingestuft, wobei die Tendenz mehr zu Letzterem geht.

Besonders die Gebäudeaussteifung ohne metallische Verbindungsmittel ist eine innovative Lösung, während die Verwendung von Holzschrauben im Bereich der Stützenanschlüsse kritisch zu beurteilen ist. Die Verschraubungen zur Lagesicherung sind in der Regel lösbar, solange sie keine lateralen Kräfte aufnehmen, die zu Verformungen führen.

Durch den innovativen Einsatz von formschlüssigen Kontaktverbindungen, Hartholzverbindern und die Ausbildung liegender Fachwerke auf den Brettstapeldecken kann die Verbindungsmittelanzahl zur Scheibenbildung in den aussteifenden Wänden und Deckenscheiben deutlich reduziert werden.

Für den Rückbau können die zur Errichtung des Gebäudes verwendeten Geräte genutzt werden. Für das Lösen der Verschraubungen und Hartholzverbinder sind keine besonderen Geräte notwendig. Auch das Bewegen der rückgebauten Elemente kann mit den üblichen Hebewerkzeugen erfolgen.

Tabella 6-14: Haus des Holzes – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Demontierbarkeit der Bauteile		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Erreichbarkeit der Verbindungen	Rückbaubarkeit des Ausbaus und der der Sekundärstruktur	1/1
	Positionierung der Verbindungsmittel	1/1
Trennbarkeit der Verbindungsmittel	a) Teilweise schadensfrei lösbare Verbindungen b) Größtenteils schadensfrei lösbare und wiederverwendbare Verbindungen	a) 0/1 <b>b) 2/2,5</b>
Reduktion des Rückbauaufwands	Reduktion der Verbindungsmittelanzahl	1/1
	Rückbau mit einfachen Geräten möglich	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

#### *Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils*

Innerhalb der tragenden Bauteile wurde größtenteils auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen verzichtet [124]. Die Verbindungen innerhalb der Holztafelbauelemente sind geschraubt, beziehungsweise im Fall der Folien stellenweise getackert und eingeklemmt [124]. Lediglich die L-förmigen Deckenaufleger werden aus zwei miteinander verklebten Kerto-Elementen hergestellt [124]. Die Rückbaubarkeit der Bodenaufbauten wurde bereits im Verlauf der Analyse diskutiert und ist größtenteils gegeben. Zwischen den tragenden Bauelementen und den darüberliegenden Schichten werden mit ungebundenen Splittschüttungen und trennbaren Abdichtungsfolien sowohl für die Decken als auch für den Dachaufbau vollständig schadensfrei lösbare Verbindungen gewählt [71, 120-122]. Während die Brettstapelelemente ohne Verklebung auskommen, werden die Rippenelemente mit einer Schraubpressverklebung zwischen den Balken und der BSP-Platte hergestellt [121]. Diese Rippenelemente eignen sich jedoch, wie auch die Kerto-Deckenaufleger, zur späteren Wiederverwendung auf Komponentenebene, und müssen nicht weiter zerlegbar sein.

Es sind keine Maßnahmen erkennbar, die die Anzahl der Bauteilschichten reduzieren. So weisen zum Beispiel die Deckenaufbauten im Bereich der Büronutzung eine hohe Anzahl an

Schichten auf. Die Außenwände im Bereich der Büronutzung weisen ebenfalls einen vielschichtigen Aufbau auf, allerdings ist hier ein additiver Aufbau gewählt worden, sodass sich die Schichten voneinander trennen lassen. Zudem werden Vorkehrungen getroffen, um die Verbindungsmittel innerhalb der Bauteile gut erreichbar zu machen. So werden im Wandaufbau außenseitig sichtbare Verschraubungen eingesetzt [71]. Der trockene Fußbodenaufbau kann Schicht für Schicht zurückgebaut werden [71]. Die Bauteilaufbauten bringen auch eine reduzierte Anzahl an Verbindungsmitteln mit sich. Da die Bekleidungen der Holztafelbauelemente lediglich dem Brandschutz und nicht der Aussteifung dienen, können diese mit wenigen Verschraubungen zur Lagesicherung befestigt werden. Die trocken verlegten Fußbodenaufbauten kommen fast vollständig ohne Verbindungsmittel aus. Bei der Zerlegung der Bauteile in ihre Komponenten und Bauelemente ist eine Nutzungsneutralität der tragenden Bauelemente und Komponenten anzustreben. Dies trifft für Holztafelbauelemente, die Rippen- und Brettstapeldecken sowie für die öffnungsfreien BSP-Wände zu, welche sich wieder als tragende Komponenten einsetzen lassen [71].

Tabelle 6-15: Haus des Holzes – Bewertung der Trennbarkeit innerhalb der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Verbindungen zwischen Komponenten	Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen	2/2
	Reduktion der Bauteilschichten	0/1
	Gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel	1/1
	Geringe Anzahl der Verbindungsmittel	1/1
Wiederverwendungspotenzial	Nutzungsneutrale Bauelemente und Komponenten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5/6</b>

### Informationsverfügbarkeit

Für das Haus des Holzes wurde während der Planungsphase ein digitaler Zwilling in Form eines BIM-Modells erstellt. Über dieses 3-D-Modell lassen sich alle Aufbauten, Details, Materialien, Entscheidungen und Änderungen über die Planung bis zum Ende der Ausführung nachvollziehen [121]. Es liegen keine Informationen vor, ob das Haus des Holzes in eine Materialdatenbank wie Madaster oder Ähnliches eingespeist wurde und so zum Aufbau von Materialdatenbanken und Bauteilbörsen einen Beitrag leistet.

Bei der Planung des Haus des Holzes wurden diverse Bauteilverbindungen neu entworfen, um einen schadensfreien Rückbau mit anschließender Wiederverwendung zu ermöglichen. Im Rahmen der Planung wurden entsprechende Rückbaukonzepte für sämtliche Bauteilverbindungen entwickelt [120, 121]. Zur Verifizierung und Verbesserung der Rückbaukonzepte wurden für bestimmte Bauteilverbindungen während der Planungsphase Prüfkörper erstellt [71].

Tabelle 6-16: Haus des Holzes – Bewertung Informationsverfügbarkeit

Kriterium: Informationsverfügbarkeit		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Digitales Gebäudemodell	BIM-Modell – Digitaler Zwilling	2/2
	Erfassung in Bauteildatenbank zur Wiederverwendung	0/1
Rückbaukonzept	Rückbau- und Demontagekonzept	2/2
	Mock-Up / Prüfkörper zur Erprobung von Rückbauszenarien	1/1
Gesamtbewertung		5/6

### Materialrecycling

Das Tragwerk besteht aus den Holztafelbauwänden, den Stützen und Trägern der Mittelachse, den aussteifenden Wänden sowie den Rippen- und Brettstapeldecken. Insbesondere die Wandstützen in den Außenwänden und die Brettstapeldecken sind aufgrund ihrer Klebstofffreiheit besonders für eine Kompostierung geeignet. Die Bauelemente der Rippendecke, der aussteifenden Wände sowie der tragenden Mittelachse bestehen aus BSP oder BSH und weisen daher alle einen Klebstoffanteil auf. Dieser könnte eine Kompostierung erschweren.

Grundsätzlich sind alle Komponenten der Außenwand sortenrein trennbar. Die nicht dem Primärtragwerk zugeordneten Komponenten des Ständerwerks der Außenwand bestehen aus Vollholz und eignen sich sehr gut für eine Kaskadennutzung oder Kompostierung. Dasselbe gilt für die äußere sowie im Bereich der Büronutzung innere Bekleidung aus Vollholz. Aus brandschutztechnischen Gründen sind in der Kernschicht der Fassade Gipsfaserbekleidungen und eine Mineralwollendämmung notwendig. Die Gipsfaserplatten lassen sich theoretisch in einem fast geschlossenen Kreislauf recyceln, auch wenn dies noch nicht dem Stand der Technik entspricht [26]. Auch der Dachaufbau ist durch den Verzicht auf eine verschweißte Bitumenabdichtung vollständig sortenrein trennbar. Weitere Angaben zur Materialität des Dachaufbaus liegen nicht vor.

Zu den Innenwänden ist bekannt, dass diese sich einfach demontieren lassen und biogene Dämmstoffe verwendet werden [71, 120]. Aufgrund dieser Informationen wird davon ausgegangen, dass eine sortenreine Trennbarkeit der einzelnen Komponenten der Innenwände möglich ist, welche schlussendlich auch als Voraussetzung für ein hochwertiges Materialrecycling gilt. Da zu den weiteren Materialien keine Angaben gemacht werden, kann nicht beurteilt werden, ob es sich um Closed-Loop- oder kaskadenfähige Materialien handelt. Die Deckenaufbauten im Bürobereich sind vollständig schadensfrei und sortenrein trennbar. Im Wohnbereich kann der Zementestrich nur mit erheblichem Aufwand und Vorsorge in Form von Trennlagen sortenrein rückgebaut werden, ein schadensfreier Rückbau ist jedoch nicht möglich [21]. Die verwendete Splittschüttung lässt sich wiederverwenden, ebenso die im Bürobereich verwendeten Estrichelemente aus Hartholz. Der vollständig klebstofffreie Fußbodenaufbau aus biogenen Baustoffen im Bereich der Büronutzung erlaubt auch eine Kaskadennutzung oder Kompostierung. Sollte eine Wiederverwendung der Komponenten nicht mehr möglich sein.



Tabelle 6-17: Haus des Holzes – Bewertung Materialrecycling

Kriterium: Materialrecycling		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Recyclingfähigkeit Tragwerk	Tragende Bauteile und Bauteilelemente	1/2
Recyclingfähigkeit Gebäudehülle	Fassade	1/1
	Dachaufbau	0,5/1
Recyclingfähigkeit Ausbau	Innenwand	0,5/1
	Boden	1/1
Gesamtbewertung		4/6

#### 6.2.5. Auswertung Haus des Holzes

Aus der Auswertung der Kriterien ergibt sich, dass das Haus des Holzes in fast allen Kriterien mit überdurchschnittlicher bis sehr guter Bewertung abschneidet. Aus dem Rahmen fallen lediglich die Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung sowie die Nutzungsdichte in den vorhandenen Wohnungen. Bei der Ressourceneffizienz, der Umnutzungsmöglichkeit und der Wiederverwendung schneidet das Haus des Holzes sehr gut ab. Aus den veröffentlichten Artikeln und Informationen zum Haus des Holzes [119-121, 123] lässt sich erkennen, dass diese Themen bei der Planung und Errichtung des Haus des Holzes auch eine zentrale Rolle gespielt haben.

Tabelle 6-18: Haus des Holzes - Auswertung

Haus des Holzes		
<b>1. Reduce</b>		
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	3,5
	1.1.2. Nutzungsdichte	2
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	0
	1.2.2. Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung	3
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	5,5
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	4,75
<b>2. Long-Use</b>		
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	5
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	5,5
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	3,5
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	4,5
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	5,25
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>		
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	5,5
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	5,5
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	5
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit	5
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling	4

### 6.3. Bikes & Rails (AT)

Das Gebäude Bikes & Rails zeichnet sich durch einen besonders sozialen und ökologischen Ansatz aus. Ein solidarischer Zusammenschluss von Wohnbauprojekten in Österreich schafft günstigen und selbstverwalteten Wohnraum. Im Gegensatz zu den beiden anderen Referenzprojekten liegt hier ein deutlicher größerer Fokus auf der Leistbarkeit der Wohnungen. Das Gebäude zeichnet sich neben der sozialen Komponente auch durch einen hohen ökologischen Standard aus. Dabei spielt die Ressourceneffizienz vor allem im Betrieb, aber auch bei der Errichtung des Gebäudes eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu den anderen Gebäuden wird bei diesem Projekt ein großes Augenmerk auf passive Wärmeerzeugung und Kühlung gesetzt. Es zeigt, dass durch innovative Lösungen auch mit begrenzten finanziellen Mitteln nachhaltige und hochwertige Holzbauarchitektur möglich ist.

#### 6.3.1. Grundlagen

Beim Bauprojekt Bikes & Rails handelt es sich um ein von einer Bauherrengemeinschaft in Auftrag gegebenes und gemeinsam mit dem Architekturbüro Reinberg geplantes Wohnbauprojekt mit gewerblicher Nutzung in der Sockelzone [126]. Die Wettbewerbs- und Planungsphase fand von Ende 2014 bis 2018 statt, die Ausführung von 2018 bis 2020 [126]. Das Ziel der Bauherrenschaft war es, ein sozial verträgliches Gebäude mit hohem architektonischem und städtebaulichem Anspruch und Passivhausstandard zu realisieren [126]. Das Projekt Bikes & Rails befindet sich im 10. Wiener Gemeindebezirk im Sonnwendviertel. Dieses befindet sich auf der ehemaligen Fläche des Frachtbahnhofs Süd [127]. Im Zuge des Baus des neuen Wiener Hauptbahnhofs wurde diese Fläche, auf der sich ehemals Gleise und Betriebsgebäude befanden, zu einem neuen, lebendigen Viertel umgebaut [127]. Folgende Kennzahlen werden zu den Flächen des Projektes angegeben [126, 128, 129]<sup>3</sup>:

---

<sup>3</sup> [129] Architekturbüro Reinberg ZT GmbH "Errichtung eines Wohnheimes: Baugruppe Bikes & Rails", in *BestandsplanWien*, 2016. und [128] G. Reinberg, "Gastvortrag "Solararchitektur und Werkbericht"", in *Modul Ressourceneffiziente Materialisierung SS2023, Masterstudium Architektur, Hocheffiziente Gebäudekonzepte mit Naturbaustoffen*, Technische Universität Wien, Institut für Tragwerk Holz Bau, am 03.05.2023, 2023. sind nicht öffentlich einsehbare Quellen

Tabelle 6-19: Bikes & Rails - Flächen und Volumen

Bezeichnung	Fläche/Volumen
Grundstücksfläche:	743 m <sup>2</sup>
Gebäudegrundfläche:	431 m <sup>2</sup>
Gebäudevolumen:	9.587 m <sup>3</sup>
Bruttogrundfläche:	Ca. 2.000 m <sup>2</sup>
Nutzfläche:	Ca. 2.200 m <sup>2</sup>
Gewerbe:	Ca. 200 m <sup>2</sup>
Wohnen (Inkl. Loggia/Balkon/Terrasse):	Ca. 1.450 m <sup>2</sup>
Wohnen (exkl. Loggia/Balkon/Terrasse):	Ca. 1.250 m <sup>2</sup>
Gemeinschaft:	Ca. 350 m <sup>2</sup>
Dachterrasse:	Ca. 200 m <sup>2</sup>
Untergeschoss:	431 m <sup>2</sup>
Konstruktions-, Verkehrs- und Funktionsfläche:	unbekannt

Der Flächenaufstellung ist zu entnehmen, dass das Gebäude hauptsächlich zu Wohn-, aber auch zu Gewerbezwecken genutzt wird. Daneben sind großzügige Gemeinschaftsflächen für Bewohner und Anwohner vorhanden [126, 128]. Die Gewerbenutzung befindet sich im Erdgeschoss. Die Gemeinschaftsflächen sind über alle Geschosse vom Untergeschoss bis zur Dachterrasse verteilt, während die Wohnnutzung vom 1. bis zum 5. Obergeschoss stattfindet [126, 128].

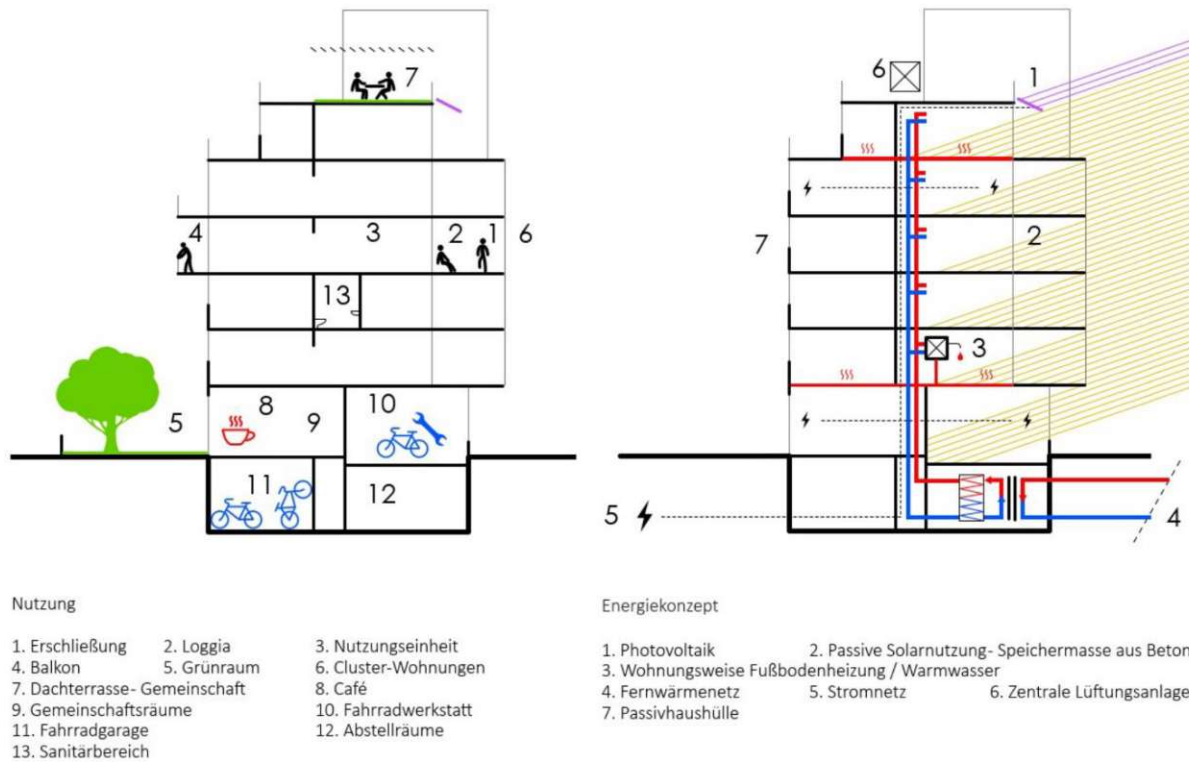


Abbildung 6-6: Bikes & Rails - Querschnitt mit Nutzung und Energiekonzept (aus [130])

Der Baukörper ist in Holz-Beton-Hybridbauweise gefertigt. Der Keller und das Erdgeschoss sowie der Treppenhaukern an der kurzen Gebäudeseite im Osten und der Wintergarten beziehungsweise Laubengang entlang der langen Gebäudeseite im Süden bestehen aus Stahlbeton (siehe Abbildung 6-7) [126, 131]. Diese dienen der Aussteifung des Gebäudes. Die restlichen Teile des Tragwerks der Obergeschosse bestehen aus Holz. Eine Mittelwand in Gebäudelängsrichtung aus BSP und die Fassade in Gebäudelängsrichtung in Holztafelbauweise bilden zusammen mit dem Wintergarten aus Stahlbeton die Deckenaufleger (siehe Abbildung 6-8) [126]. Die BSP-Decke wird in Richtung der kurzen Gebäudeseite gespannt und lagert auf dem Wintergarten, der Mittelwand und der Fassade auf [126]. Im Bereich der kurzen Gebäudeseite wird die Fassade ebenfalls aus Holztafelbauelementen gefertigt. Die Trennwand zwischen Wintergarten und Wohnung ist aus Holz und größtenteils verglast. Der Wintergarten ist mit einer offenbaren Glasfassade eingehaust (siehe Abbildung 6-7) [126].

Das Energiekonzept des Gebäudes ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Die stark gedämmte Gebäudehülle bildet die Grundlage für das Erreichen des Passivhausstandards [126]. Die Beheizung erfolgt wohnungsweise über eine Fußbodenheizung, die Bereitstellung der Wärme über das Fernwärmenetz [126]. Darüber hinaus sorgen der solare Wärmeeintrag über den verglasten, südseitigen Wintergarten und die dahinterliegende, größtenteils verglaste Außenwand der Wohnung in Verbindung mit der Speichermasse des Betons für eine passive Wärmeerzeugung im Winter, während im Sommer die Speichermasse des Betons und die Möglichkeit zur Querlüftung in den durchgesteckten Wohnungen für eine passive Kühlung sorgen [126].

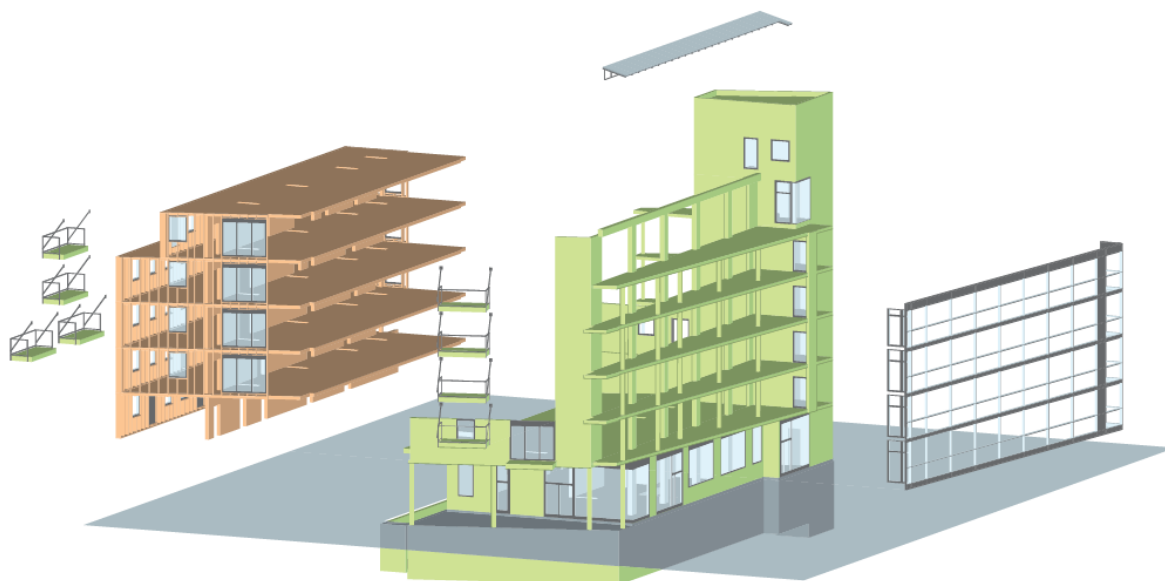


Abbildung 6-7: Bikes & Rails - Konstruktionsprinzip (aus [126])

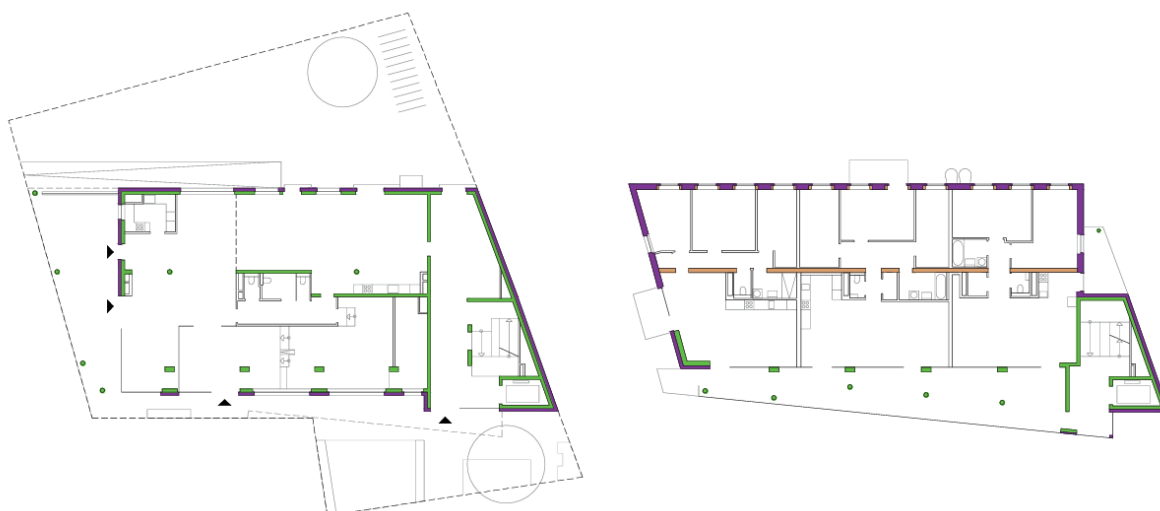


Abbildung 6-8: Bikes & Rails - Grundriss und Tragsystem - Erdgeschoss und Regelgeschoss (aus [126])

### 6.3.2. Analyse – Reduce

#### Flächeninanspruchnahme

Der Baugrund befindet sich auf dem ehemaligen Areal eines Frachtbahnhofs. Er ist daher als vorgenutzte Fläche zu betrachten. Die Gebäudegrundfläche nimmt einen Großteil der Grundstücksfläche ein. Die nicht bebauten Flächen konnten jedoch größtenteils begrünt werden, da auf Stellplätze verzichtet wird [126]. Betrachtet man die gesamte Quartiersentwicklung, ist eine deutliche Verbesserung des Versiegelungsgrades im Vergleich zur Vornutzung erzielt worden. Neben einem zentralen Park befinden sich im Sonnwendviertel viele private Grünflächen um die Gebäude und in den Innenhöfen [127].

Es erfolgten keine Maßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden. Dafür wurde durch den Verzicht auf Stellplätze auf der unbebauten Grundstücksfläche zusätzliche Sickerfläche geschaffen [126].

Tabelle 6-20: Bikes & Rails - Bewertung der Flächeninanspruchnahme

<b>Kriterium:</b> Flächeninanspruchnahme		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Bewertung des Standortes	a) Neubau auf unbebauter Außenentwicklungsfläche	a) 0/0
	b) Nachverdichtung auf unbebauter Innenentwicklungsfläche	b) 0/2
	c) Neubau auf vorgenutzter Fläche	c) 0/3
	d) Neubau auf vorgenutzter Fläche - Verbesserung des Versiegelungsgrades	<b>d) 4/4</b>
Minimierung des Eingriffs in den Boden	Gründungsmaßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden	0/1
Ausgleichsmaßnahmen	Zusätzliche Maßnahmen, die der Bodenversiegelung entgegenwirken	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5/6</b>

#### Nutzungsdichte

Im Gebäude Bikes & Rails befinden sich 18 Nutzungseinheiten zu Wohnzwecken. Diese bestehen aus fünf 2-Zimmer-Wohnungen, jeweils sechs 3- beziehungsweise 4-Zimmer-Wohnungen sowie einer 5-Zimmer-Wohnung und wurden aus den Bestandsplänen ermittelt [129]. Dies ergibt bei der Eingabe in das SNBS-Excel-Tool eine geschätzte Belegung von 36,2 Personen [112]. Daraus ergibt sich eine Pro-Kopf-Wohnfläche von 40,1 m<sup>2</sup>/Person bei Berücksichtigung der Wohnfläche inklusive Balkone, Terrassen und Loggien (ca. 1450 m<sup>2</sup>) beziehungsweise von 34,5 m<sup>2</sup>/Person bei Berücksichtigung der reinen Wohnungsfläche (ca. 1250 m<sup>2</sup>) [112]. Daher wurden Bikes & Rails bei der Pro-Kopf-Wohnfläche mit 2,5 von 3 möglichen Punkten bewertet.

Aus den Grundrissen lässt sich erkennen, dass die 2-Zimmer-Wohnungen zwischen 35 und 55 m<sup>2</sup> groß sind und daher das Kriterium für kleine Wohnungen, insbesondere für Paar-Wohnungen, erfüllen [129]. Das Projekt beinhaltet keine Car-Sharing-Angebote. Im Wohnungsspiegel sind auch Wohnungen enthalten, welche explizit als Wohngemeinschaften für Studierende oder junge Geflüchtete konzipiert wurden [126]. Daneben sind über alle Stockwerke verteilt gemeinschaftlich nutzbare Flächen für alle Bewohner vorhanden. Die

Bewohner können neben dem Wintergarten unter anderem Musik- und Veranstaltungsräume sowie die Dachterrasse nutzen [126, 128].

Tabella 6-21: Bikes & Rails - Bewertung der Nutzungsdichte

<b>Kriterium:</b> Nutzungsdichte		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Pro-Kopf-Wohnfläche	a) Größer als durchschnittliche Wohnfläche > 50 m <sup>2</sup>	a) 0/0
	b) Durchschnittliche Wohnfläche bis 15 % reduziert 42,5 m <sup>2</sup> - 50 m <sup>2</sup>	b) 0/1
	c) Durchschnittliche Wohnfläche 15 – 30 % reduziert 35 m <sup>2</sup> - 42,5 m <sup>2</sup>	c) 0/2
	d) Durchschnittliche Wohnfläche > 30 % reduziert < 35 m <sup>2</sup>	<b>d)</b> <b>2,5/3</b>
Angebot kleiner Wohnungen	1 bis 1,5-Zimmer Wohnungen < 35 m <sup>2</sup> oder 2 bis 2,5-Zimmer Wohnungen < 70 m <sup>2</sup>	1/1
Mobilitätskonzept mit Gemeinschaftsnutzung	Car-Sharing Angebote, Förderung der Fahrradmobilität	0,5/0,5
Nutzungsmaximierende Wohnformen	Cluster-Wohnen oder Wohngemeinschaften im Wohnungsspiegel	0,5/0,5
Flächen zur Gemeinschaftsnutzung	Gemeinschaftsbüro, Waschräume, Werkstätten, Aufenthaltsräume, Spielräume etc.	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

### Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

Beim Objekt Bikes & Rails wurde keine nennenswerte Bauteilwiederverwendung oder Bestandsnutzung praktiziert.

Tabelle 6-22: Bikes & Rails – Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

<b>Kriterium:</b> Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Einsatz wiederverwendeter Bauteile	a) Kein Einsatz	a) 0
	b) Vereinzelter Einsatz, z. B.: einzelne Stützen oder kleinere Teile der Fassadenbekleidung	b) 0/1
	c) Systematischer Einsatz in einzelnen, nicht tragenden Bauteilschichten, z. B.: Fassadenbekleidung oder Fußbodenbelag	c) 0/2
	d) Systematischer Einsatz in der Sekundärstruktur, z. B. nicht tragende Fassadenelemente oder Fenster	d) 0/3
	e) Systematischer Einsatz für einen wesentlichen Teil der Tragstruktur, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk oder Weiternutzung eines bestehenden Untergeschosses	e) 0/4
	f) Großteil der Primär- und Sekundärstruktur wiederverwendet, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk mit wiederverwendeten Fassadenelementen	f) 0/5
	g) Nahezu vollständiger Einsatz wiederverwendeter Bauteile, z. B.: Ortswechsel eines ganzen Gebäudes	g) 0/6
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>0/6</b>

### Reduktion des Stahlbetonteils

Das Projekt Bikes & Rails besitzt ein Keller- und Erdgeschoss in Stahlbeton. Dabei wurden im Erdgeschoss keine Maßnahmen zur Reduzierung des Stahlbetons, wie z.B. die Wiederverwendung von Fundamenten, umgesetzt. Ab dem 1. Obergeschoss werden der Treppenhauskern und der Gang zur Erschließung der Wohnungen in Stahlbeton ausgeführt, während der Wohnbereich des Gebäudes vollständig in Holzbauweise ausgeführt wird.



Tabelle 6-23: Bikes & Rails - Bewertung der Reduktion des Stahlbetonteils

<b>Kriterium:</b> Reduktion des Stahlbetonteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk (oberirdisch exkl. Erschließung)	Tragstruktur ab 1. OG (exkl. Erschließungskerne) in Holzbauweise mit Verzicht auf Hybridbauteile	1/1
	Verzicht auf ein Stahlbeton-Erdgeschoss	0/1
Gründung	Verzicht auf Untergeschoss	0/2
	Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung	0/1
Erschließung	Verzicht auf Stahlbeton-Erschließungskerne	0/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>1/6</b>

#### *Ressourceneffizienz des Holztragwerks*

Die Decken werden im Bereich des Holzbaus vollständig in BSP ausgeführt. Bis auf die Mittelwand aus BSP sind in den Regelgeschossen keine weiteren tragenden Innenwände verbaut. Die Fassade besteht aus Holztafelbauelementen. Diese sind auf der Längsseite des Gebäudes im Norden tragend und auf den kurzen Gebäudeseiten im Westen und Osten nicht tragend. Die Gebäudeaussteifung erfolgt hauptsächlich über den Anschluss an den Erschließungskern und den Wintergarten aus Stahlbeton. Zusätzlich wird die für den vertikalen Lastabtrag erforderliche Mittelwand zur Aussteifung herangezogen [126].

Tabelle 6-24: Bikes & Rails - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Ressourceneffizienz des Holztragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Decken	a) Brettstapeldecken	a) 0/1
	b) Kasten- oder Rippendecken	b) 0/2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Innenwände	a) Reduktion tragender Innenwände	<b>a) 1/1</b>
	b) Skeletttragwerk ohne tragende Innenwände	b) 0/2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Fassade	Holztafelbauweise	1/1
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Aussteifung	Gebäudeaussteifung über Treppenhauswände und Teile der Außenwände	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3/6</b>

#### *Ökologische Baustoffwahl*

Als Fußbodenbelag wird in den Wohnungen Parkett verwendet. Darunter folgt ein gegossener, mineralischer Heizestrich. Dieser ist mittels einer Trennfolie von den darunterliegenden Schichten abgetrennt. Es folgen eine mineralische Trittschalldämmung und eine trockene Splittschüttung [128]. Die raumseitige Bekleidung ist so ausgeführt, dass diese als Installationsebene genutzt werden kann. Dafür werden Gipskartonfeuerschutzplatten in Verbindung mit dahinterliegender Mineralwollendämmung verwendet [128]. Die Trag- und

Dämmebene der Außenwände wird beidseitig von Gipskartonfeuerschutzplatten bekleidet. Als Dämmung wird Mineralwolle verwendet [128]. Die Fassadenbekleidung besteht im Bereich der Holztafelbauwände aus einer Holzschalung. Im südlichen Bereich entlang des Wintergartens wird eine Glasfassade verwendet, während die Gebäudeteile mit Stahlbetonwänden im südwestlichen und südöstlichen Gebäudeeck gedämmt und verputzt werden [126, 128]. Die Fenster sind Holz-Alu-Fenster [126], sie bestehend aus einem Holzrahmen, der außenseitig mit Aluminiumprofilen verstärkt ist.

Tabelle 6-25: Bikes & Rails - Bewertung Ökologische Baustoffwahl

<b>Kriterium: Ökologische Baustoffwahl</b>		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Fußbodenaufbau	Bodenbelag aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/0,5
	Alternativen zu mineralisch gebundener Schüttung	0/0,5
	Alternativen zu mineralischer Trittschalldämmung	0/0,5
	Alternativen zu Zementestrich	0/0,5
Raumseitige Bekleidung	Raumseitige Bekleidungen aus Holzwerkstoff oder Lehm	0/1
Dämmstoffe	Verwendung biogener Dämmstoffe	0/1
Fassadenbekleidung	Fassadenbekleidung aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/1
Fenster	Holzfenster	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>2/6</b>

### 6.3.3. Analyse- Long-Use

#### *Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart*

Innerhalb der Nutzungseinheiten ist die Mittelwand tragend und in BSP-Bauweise ausgeführt, sodass die Grundfläche jeder Nutzungseinheit in zwei etwa gleich große Flächen geteilt wird. Diese werden dann mit Trockenbauwänden entsprechend den Anforderungen der Bewohner in Räume unterteilt [126, 128]. Je nach der konfigurierten Raumaufteilung nehmen die nicht tragenden Innenwände jedoch einen Anteil von weniger als 80 % innerhalb der Nutzungseinheit ein [126, 128]. Die nicht tragenden Trennwände werden in Trockenbauweise errichtet. Die Metallprofile sind in der sichtbaren BSP-Decke verschraubt [128]. Ein Rückbau beziehungsweise Einbau ist möglich, ohne die Struktur der Decke zu beschädigen. Kleinere optische Mängel müssten jedoch ausgebessert werden. Aus den vorhandenen Unterlagen ist erkennbar, dass die Wohnungstrennwände sowie die Badezimmerwände in Trockenbauweise den Fußbodenaufbau durchdringen und daher nicht ohne Beschädigung desselben rückgebaut werden können. Es ist jedoch nicht erkennbar, ob dies für die weiteren nicht tragenden Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit auch gilt - wird jedoch so angenommen [128]. Im Erdgeschoss wurden die Trennwände zwischen den

Nutzungseinheiten so konfiguriert, dass ein flexibler Zusammenschluss zwischen den einzelnen Gewerbe- und Gemeinschaftsflächen möglich ist [126].

Die nordseitige Fassade in Holztafelbauweise bietet in regelmäßigen Abständen Anschlussmöglichkeiten für Innenwände. Diese Anschlüsse können grundsätzlich in beliebigen Zwischenräumen zwischen jeweils zwei Fenstern platziert werden. Die südseitige Außenwand der Wohnung zum Wintergarten lässt einen Anschluss der Wohnungstrennwände unabhängig vom Stützenraster des Wintergartens zu. Ein nachträglicher Wandanschluss ist hier jedoch nur in Abhängigkeit des bei Errichtung festgelegten Fensterrasters möglich (siehe Abbildung 6-9). Anhand Abbildung 6-9 lässt sich erkennen, dass größere Wohneinheiten die Möglichkeit mehrerer unabhängiger Zugänge bieten. In der dargestellten Wohnung gibt es zwei eigenständige Zugänge. Die Wohnräume mit Küche sind im südlichen Teil der Wohnung gelegen und sind zum Wintergarten ausgerichtet. Im nördlichen Bereich der Wohnung befinden sich die privaten Räume. Die Abmessungen variieren je nach Wohnungstyp und liegen etwa zwischen 2,5 m x 5,0 m und 4,5 m x 5,0 m. Sie können als Schlaf-, Kinder-, WG- oder Arbeitszimmer genutzt werden und sind daher als nutzungsneutral anzusehen. Die Steigzonen für die Haustechnik sind zentral im Gebäude angeordnet. Die meisten Nutzungseinheiten weisen einen Steigschacht auf, es gibt jedoch größere Wohneinheiten, die zwei Steigschächte aufweisen und so eine Teilung ermöglichen würden (z. B. rechte Wohnung im Regelgeschoss, Abbildung 6-8).



Abbildung 6-9: Bikes & Rails - Südseitige Außenwand zwischen Wohnung und Wintergarten (aus [126])

Tabelle 6-26: Bikes & Rails – Bewertung der Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

Kriterium: Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Tragwerk	Größtenteils nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit > 80 %	0,5/1
	Anschlüsse von leichten Innenwänden ohne Eingriff in Fußbodenaufbau und Decke	0,5/1
	Anschlussmöglichkeit von Innenwänden in geringen Abständen in der Fassade	1/1
Erschließung	Erschließung kleiner voneinander unabhängige Einheiten, z. B.: zwei Eingangsmöglichkeiten	1/1
Grundriss	Nutzungsneutrale Räume, circa 3 x 3m bis 5 x 5m	1/1
Versorgung	Mehrere Steigzonen je Einheit ermöglichen Teilung in kleinere Einheiten	0,5/1
Gesamtbewertung		4,5/6

#### Umnutzung für eine andere Nutzungsart

Da die Trennwände zwischen den Nutzungseinheiten nicht tragend sind und in Trockenbauweise ausgeführt werden [126, 128], erhöht sich der Anteil nicht tragender Wände bei Betrachtung eines ganzen Stockwerks gegenüber einer Nutzungseinheit. Bei einer Abschätzung der Innenwandlängen im Regelgeschoss aus Abbildung 6-8 wurde ein Anteil nicht tragender Innenwände von circa 80 % ermittelt. Zu etwaigen Tragreserven konnten keine Angaben gefunden werden. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass das Gebäude besondere Nutzlastreserven, die über die Wohnnutzung hinausgehen, aufweist. Bei der Planung des Gebäudes war es möglich, die Balkone und dementsprechend die bodentiefen Fenster frei zu positionieren [128]. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Holztafelbaufassade im nördlichen Bereich teilweise anpassen lässt. So ist ein späterer Umbau von einem normalen Fenster zu einem bodentiefen Fenster denkbar. Zudem können die Balkone demontiert werden [132].

Die Raumhöhe beträgt in den Regelgeschossen knapp über 2,50 m (gemessen aus [128, 132]). Dies erlaubt eine Umnutzung als Büro. 2,50m ist allerdings die minimale Raumhöhe für eine Büronutzung, sodass keine Installationen unter der Decke mehr möglich sind. Die Gebäudetiefe liegt bei etwa 10,50 m (gemessen aus [129]) und erlaubt ebenfalls eine Umnutzung zu Büroräumen. Die Bruttogrundfläche je Erschließungskern liegt unter 400 m<sup>2</sup>, sodass die Erschließungskerne genügend Kapazitäten für unterschiedliche Nutzungsarten bieten. Zu den Platzreserven in den Schächten und Technikräumen liegen keine Aussagen vor. Aus den Grundrissen des Untergeschosses lässt sich eine gute Zugänglichkeit der Technikräume durch die Fahrradrampe sowie auf eine mögliche Erweiterbarkeit der Technikräume zu Lasten der Gemeinschaftsflächen schließen [126, 128]. Die Lüftungsanlage befindet sich auf dem Dach des Gebäudes [128] und ist somit sowohl zugänglich als auch erweiterbar. Bei den Steigschächten sind gewisse Platzreserven zu vermuten. Da das Gebäude sowohl im Winter als auch im Sommer passive Heiz- beziehungsweise Kühlsysteme nutzt [126], kann der Technikbedarf für den Gebäudebetrieb reduziert werden. Dies wirkt sich auch auf den Flächenbedarf der Technikräume und Steigschächte aus.

Tabelle 6-27: Bikes & Rails - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart

Kriterium: Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Tragwerk	Nutzungsneutrales Tragwerk, größtenteils nicht tragende Innen- und Trennwände > 80 %	1/1
	Tragreserven, Nutzlast > 2 kN/m <sup>2</sup> auf 50 % der Bruttogrundfläche	0/0,5
	Fassade austauschbar, ermöglicht z. B.: Vergrößerung der Belichtungsfläche	0,5/0,5
Geometrie	a) Raumhöhe > 2,50 m b) Raumhöhe > 2,75 m c) Raumhöhe > 3,00 m	a) <b>0,5/0,5</b> b) 0/0,75 c) 0/1
	a) Gebäudetiefe: 10,00 m < Tiefe < 16,50 m b) Gebäudetiefe: 11,50 m < Tiefe < 13,50 m	a) <b>0,5/0,5</b> b) 0/1
Erschließung	a) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 600 m <sup>2</sup> b) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 400 m <sup>2</sup>	a) 0/0,5 b) <b>1/1</b>
	Versorgung	Möglichkeit zur Erweiterung Haustechnischer Anlagen, z. B.: Platzreserven in Technikräumen und Schächten
Gesamtbewertung		4/6

### Nutzungsvielfalt

Das Gebäude befindet sich in der Nähe des Wiener Hauptbahnhofs. Dieser kann zu Fuß oder per Rad erreicht werden und ist ein zentraler Knotenpunkt Wiens. Insbesondere die Anbindung per Fahrrad wird durch die großzügigen Fahrradstellplätze im Keller, die gute Erreichbarkeit der Stellplätze per vergrößertem Aufzug oder Rampe sowie eine Fahrradwerkstatt im Erdgeschoss gefördert [126]. Im unmittelbaren Projektumfeld lassen sich diverse Supermärkte, Geschäfte, Sport- und Freizeitangebote sowie Gastronomie finden. Darüber hinaus bietet das im Zuge derselben Stadtentwicklung entstandene Geschäftsviertel Quartier Belvedere zahlreiche Arbeitgeber im Umfeld [127]. Auch innerhalb des Projektes werden verschiedene Nutzungsarten angeboten. Neben der hauptsächlichen Wohnnutzung befinden sich im Erdgeschoss des Gebäudes Gastronomie- und Gewerbenutzungen [126]. Der Wohnungsspiegel des Gebäudes bildet eine große Bandbreite ab und bietet Wohnungen von zwei bis fünf Zimmern an [126, 129].

Im Projekt wurde die Grundstücksfläche effizient ausgenutzt, weshalb auch keine Möglichkeiten für eine spätere horizontale Erweiterung besteht. Die nach Bebauungsplan zulässige Gebäudehöhe wurde beim Projekt Bikes & Rails ausgenutzt [133]. Ebenso die nach OIB zulässige Geschossanzahl von 6 oberirdischen Geschossen, um ohne den Zusatz A2 bauen zu können [134]. Nach aktuellem Stand ist also eine vertikale Erweiterung nicht möglich.

Tabelle 6-28: Bikes & Rails - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit

<b>Kriterium:</b> Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Standortqualität	Bewertung der öffentlichen Verkehrsanbindung	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld, mind. Wohnen + Büro + Gewerbe + Gastro	1/1
Nutzungsvielfalt	Breiter Wohnungsspiegel mit Wohnungen von 1 bis 4 Zimmern	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Projekts, mind. Wohnen + Büro / Gewerbe / Gastro	1/1
Erweiterbarkeit	Horizontale Erweiterbarkeit durch Reserveflächen	0/1
	Vertikale Erweiterbarkeit	0/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4/6</b>

### *Langlebigkeit Holztragwerk*

Alle tragenden Bauteile aus Holz befinden sich innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Im Bereich der Außenwände bilden Tragwerk und Gebäudehülle ein Bauteil. Die Fassade besteht aus vorgefertigten Holztafelbauelementen. Der Außenwandaufbau ist grundsätzlich ähnlich wie beim Haus des Holzes. Eine beidseitig mit Gipskartonfeuerschutzplatten bekleidete Kernschicht beinhaltet die Dämmung sowie das Tragwerk. Innenseitig befindet sich eine Dampfbremse, außenseitig die Winddichtung. Danach folgen die Lattung für die Hinterlüftungsebene sowie die Schalung. Raumseitig wird eine Vorsatzschale bestehend aus Gipskartonfeuerschutzplatten auf Schwingbügel und Mineralwolle dämmung angebracht [128]. Hier ist eine konstruktive Trennung der Bauteilschichten anhand der voraussichtlichen Lebensdauer erkennbar, es ist jedoch nichts zu den verwendeten Verbindungsmitteln und deren Lösbarkeit bekannt. Auf Bildern des Gebäudes scheint die Schalung genagelt zu sein [128], was einen Austausch zumindest erschwert.

Es wird wieder davon ausgegangen, dass die bei der Bemessung des Holzbaus angewendeten Sicherheitszuschläge ausreichende Tragwerksreserven ausweisen, um zu vermeiden, dass die tragenden Holzbauteile an ihre Belastungsgrenze stoßen. Darüber hinaus sind jedoch keine Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit bekannt, die beim Projekt Bikes & Rails angewandt wurden, wie beispielsweise Maßnahmen, um Setzungen und daraus resultierende Belastungen zu minimieren. Die vertikalen Bauelemente des Holztragwerks lassen sich nicht optisch kontrollieren, da sie im Ausbauzustand von der Wandverkleidung verdeckt werden. Die horizontalen Bauelemente des Holztragwerks sind allerdings auch im Ausbauzustand sichtbar. So können Beschädigungen an den Decken mittels optischer Kontrolle frühzeitig entdeckt werden.

Tabelle 6-29: Bikes & Rails – Bewertung der Langlebigkeit des Tragwerks

<b>Kriterium:</b> Langlebigkeit des Tragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Witterungsschutz	Keine freie Bewitterung tragender Holzbauteile	1/1
	Alle tragenden Holzbauteile innerhalb der thermischen Gebäudehülle	1/1
Trennung Tragwerk und Gebäudehülle	a) Trennbare Bauteilschichten b) Getrennte Bauteile	a) 0,5/1 b) 0/2
Robustheit	Tragwerksreserven, Maßnahmen zur Verringerung von Setzungen, etc.	0,5/1
Zugänglichkeit	Einfache optische Kontrollmöglichkeit tragender Bauteile	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

### *Austausch und Reparatur*

Aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen scheint der Zugang zu den vertikalen Steigschächten geschossweise möglich zu sein. Die Steigschächte befinden sich im Bereich der Mittelwand und schließen mit der kurzen Schachtseite an diese an. Die übrigen Wände der Steigschächte werden in Trockenbauweise hergestellt und befinden sich entlang der Wohnungstrennwände; es ist jedoch zumindest immer eine der langen Schachtseite von der entsprechenden Wohnung aus zugänglich [126, 128].

Durch die zentrale Lage der Steigschächte kann die horizontale Leitungsführung innerhalb der Wohnungen reduziert werden. Hinzu kommt, dass die Sanitärräume und Küchen stets in Schachtnähe angeordnet sind, sodass die horizontalen Leitungswege zu den besonders versorgungsintensiven Bereichen kurz gehalten werden können [128]. Die Elektroleitungen werden von den Steigschächten aus über die Installationsebenen der Wände innerhalb der Nutzungseinheit verteilt [128].

Die Zugänglichkeit zur horizontalen Leitungsführung ist teilweise gegeben. Aus Baustellenfotos wird erkenntlich, dass Teile der horizontalen Leitungen direkt auf der Rohdecke geführt werden und dementsprechend vom Fußbodenaufbau verdeckt und nicht zugänglich sind [128]. Dies scheint sich jedoch auf einzelne Elektroleitungen zu beschränken. Ein Großteil der Leitungsführung findet in den nicht tragenden Innenwänden um den Steigschacht sowie teilweise in abgehängten Decken statt und ist somit für Reparaturen zugänglich [128].

Die Austauschbarkeit einzelner Bauteilschichten der Fassade wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt angeschnitten. Grundsätzlich unterstützt der Schichtaufbau der Holztafelbauwand einen Austausch von Schichten mit kürzerer Lebensdauer, wie beispielsweise der Fassadenschalung, allerdings erschweren die als Verbindungsmittel gewählten Nägel den Austausch der Schalung. Zudem sind die Stahlbetonaußenwände im Bereich des Treppenhauses sowie im südwestlichen Gebäudeeck gedämmt und verputzt [126], sodass auch hier kein einfacher Austausch ohne Beschädigung möglich ist. Auch lassen sich keine ganzen Fassadenelemente aus der Holztafelbauwand demontieren und austauschen.

Die nicht tragenden Innenwände lassen sich relativ einfach zurückbauen. Da sie jedoch den Fußbodenaufbau mit dem Heizestrich durchstoßen, ist ein Rückbau ohne Beschädigung des Fußbodenaufbaus nicht möglich. Im Bereich des Deckenanschlusses sollten bei einem

Rückbau einer Innenwand keine nennenswerten Beschädigungen an der benachbarten Decke auftreten, da die Metallprofile lediglich punktuell verschraubt sind [128]. Aufgrund des Heizestrichs lässt sich der Bodenaufbau nur unter Beschädigung derselben und der darin verlegten Heizleitungen zurückbauen, da der Estrich herausgeschnitten werden muss [21]. Die raumseitigen Oberflächen sind einfach zu erneuern. Die Wandverkleidung kann bei leichten Abnutzungserscheinungen gestrichen und bei größeren Schäden sogar ausgetauscht werden, da es sich um eine nachträglich montierte Vorsatzschale handelt [128]. Da im Projekt größtenteils Holzparkett verlegt wurde [126], können die Böden bei Abnutzung geschliffen und bei Beschädigung punktuell ausgetauscht werden.

Tabelle 6-30: Bikes & Rails – Bewertung von Austausch und Reparatur der Haustechnik, der Gebäudehülle und des Ausbaus

<b>Kriterium:</b> Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Haustechnik	Zugänglichkeit der vertikalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Minimierung der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Zugänglichkeit der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
Gebäudehülle und Sekundärstruktur	Austausch einzelner Komponenten der Fassade durch schadensfreie Lösbarkeit und Zugänglichkeit	0,5/1
	Schadensfreie Lösbarkeit ganzer Fassadenelemente	0/0,5
	Rückbaubare Innenwandaufbauten (nicht tragend) ohne Beschädigung benachbarter Bauteile	0,5/1
	a) Schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten b) Punktuell schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten	a) 0/0,5 b) 0/1
Oberflächen	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Wand), z. B.: durch Anstrich	0,5/0,5
	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Bodenbelag), z. B.: durch trocken verlegtes Parkett	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

#### 6.3.4. Analyse- Re-Use & Recycle

##### *Wiederverwendungspotenzial*

Die im Projekt Bikes & Rails verwendeten, tragenden Bauteiltypen sind der Stahlbetonkern und -laubengang, die tragende Holztafelbaufassade, die tragende Mittelwand aus BSP sowie die BSP-Deckenelemente [126]. Da sich die Bauteile geschossweise und teilweise auch innerhalb eines Geschosses wiederholen [126], kann man von einer Reduktion der tragenden Bauteile und Bauteiltypen ausgehen. Eine Trennung zwischen Tragwerk und Sekundärstruktur ist bei dem vorliegenden Projekt in Teilen vorgenommen worden. Dies ist vor allem im Bereich des Wintergartens zu beobachten, wo sowohl die Vorhangfassade als auch die Außenwand der



Wohnungen vom Stahlbetontragwerk getrennte Bauteile sind [126, 128]. Im Bereich der nördlichen Fassade mit tragenden Holztafelbauelementen kann die Trennung zwischen Tragwerk (Primärstruktur) und Gebäudehülle (Sekundärstruktur) jedoch nicht vollzogen werden, da beide im selben Bauteil vereint sind [126].

Im Bereich der Fassaden erfolgt der Lastabtrag über die Holzstützen der Holztafelbauwand beziehungsweise die Stahlbetonstützen des Wintergartens. Diese liegen stets übereinander (siehe Abbildung 6-10) [126, 128]. Im Bereich der Mittelwand erfolgt der Lastabtrag über eine BSP-Wand. Diese liegt in jedem Geschoss auf derselben Achse (siehe Abbildung 6-10), die Öffnungen der BSP-Wände sind jedoch nicht ident [126, 128]. Lediglich im obersten Geschoss, welches als Staffelgeschoss ausgeführt ist, kommt es zu einem Sprung im Lastpfad (siehe Abbildung 6-10) [126].

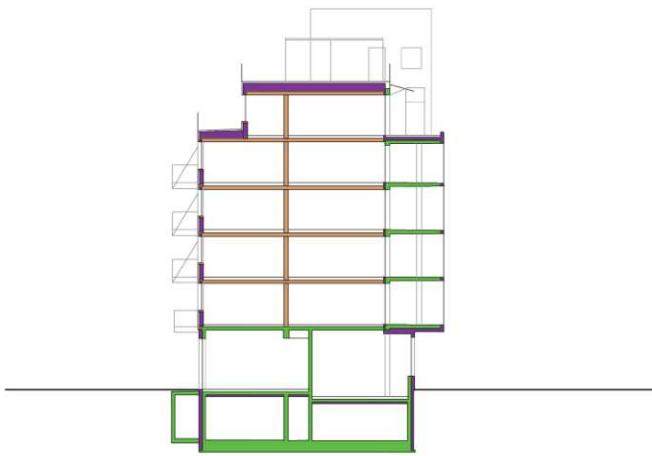


Abbildung 6-10: Bikes & Rails - Querschnitt Tragwerk (aus [126])

Die tragenden Bauteile aus Holz in Holztafelbauweise und aus BSP sind modular und bestehen aus flächigen, vorgefertigten Elementen [126]. Die Anlieferung der Fertigteile erfolgte per LKW und die Montage mittels herkömmlichem Hochbaukran [126, 128]. Die in Ortbeton gefertigten Bauteile weisen weder Modularität noch Vorfertigung auf.

Neben der Modularität ist auch die Nutzungsneutralität der Bauteile aus Holz gegeben. Die tragenden Holztafelbauwände lassen sich für denselben Zweck wiederverwenden und können nach einem Rückbau unter Beachtung des Stützrasters umgebaut werden, indem Öffnungen verändert, hinzugefügt oder geschlossen werden beziehungsweise die Fassadenbekleidung verändert wird. Die Mittelwand und die Decke bestehen aus BSP, welches sich universell wiederverwenden lässt [95], insbesondere da die beiden Bauteile jeweils wenige Durchbrüche beziehungsweise Öffnungen aufweisen [126]. Demgegenüber kann Stahlbeton insbesondere in Ortbetonbauweise nicht als nutzungsneutral oder wiederverwendbar eingestuft werden [98].

Der Holzbau verfügt über ein regelmäßiges Raster in Quer- und Längsrichtung des Gebäudes. Dementsprechend weisen die Decken und Holztafelbauwände regelmäßige Abmessungen auf [126, 128]. Positiv fallen auch das regelmäßige Fensterraster in der Holztafelbaufassade sowie die standardisierten und angehängten Balkone auf [126, 128]. Hinzu kommt die bereits beschriebene geschossweise Wiederholung der Bauteile. Im Gegensatz zu den Holzbauteilen können die Bauteile aus Ortbeton nicht als standardisiert angesehen werden [98].

Tabelle 6-31: Bikes & Rails – Bewertung Wiederverwendungspotenzial

Kriterium: Wiederverwendungspotenzial		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Einfachheit der Konstruktion	Reduktion tragender Bauteile und Bauteiltypen	1/1
	Klare Trennung des Tragwerks von Sekundär- und Tertiärstruktur	0,5/1
	Nachvollziehbarkeit der Belastung tragender Bauteile	1/1
Modularität und Standardisierung	Modulare Bauweise, Vorfertigung und Leichtigkeit der Elemente	0,5/1
	Nutzungsneutrale tragende Bauteile	0,5/1
	Standardisierte Raster und Bauteile	0,5/1
Gesamtbewertung		4/6

#### *Demontierbare Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauteilen*

Die Rückbaubarkeit der raumseitigen Wandbekleidung ist gegeben. Diese bestehen aus Gipskartonfeuerschutzplatten und scheinen nach der Beurteilung der zur Verfügung stehenden Bilder vor Ort verschraubt worden zu sein [128]. Da die Schraubenköpfe durch das Verspachteln abgedeckt werden, kann der Rückbau möglicherweise nur unter Beschädigung der Bekleidung erfolgen. Sämtliche nicht tragenden Innenwände lassen sich zurückbauen. Hier erfolgt eine Verschraubung auf Metallprofilen [128]. Auch hier kann es im Zuge des Rückbaus aufgrund verdeckter Schraubenköpfe zu Beschädigungen an der Bekleidung kommen. Der Fußbodenaufbau ist aufgrund des Heizestrichs zeitaufwändig im Rückbau, da der Estrich stückweise herausgeschnitten werden muss [21]. Die darunterliegenden Schichten inklusive der Schüttung sind jedoch trocken verlegt und daher einfach im Rückbau. Zum Dachaufbau liegen keine Informationen vor, außer, dass bei dem Gebäude ein sortenreiner Rückbau möglich ist [130]. Somit sollte auch die Rückbaubarkeit des Dachaufbaus gewährleistet sein. Da die Bauteilstöße im Bereich der Außenwand, Mittelwand und zum Wintergarten jeweils zwischen zwei flächigen Bauteilen bestehen, kann die Position der Verbindungsmittel gegenüber den Planpositionen abweichen. Da in diesem Bereich jedoch große Winkel und Stahlbauteile eingebaut werden [126, 128, 130], ist die Auffindbarkeit beim Rückbau gewährleistet. Die Deckenelemente werden mithilfe eines Stoßbrettes und einzelnen stiftförmigen Verbindungsmitteln verbunden [128]. Hier ist die Position der einzelnen Verbindungsmittel aufgrund ihrer Größe nicht auf Anrieb ersichtlich. Dementsprechend ist ein zeitaufwändiger Rückbau zu erwarten.

Bei der Beurteilung der Trennbarkeit der Verbindungsmittel zwischen den Bauteilen fällt zunächst positiv auf, dass auf Verklebungen oder vergossene Verbindungen verzichtet wird und die gewählten Verbindungsmittel rein mechanisch sind. Im Wandsockel der Außenwand werden Winkel zur Lagesicherung eingesetzt. Diese lassen sich wahrscheinlich mit geringer Beschädigung und moderatem Aufwand lösen. Im Bereich der Mittelwand übernehmen die Winkel neben der Lagesicherung auch die Aufnahme der Schubkräfte. Hier ist ein schadensfreier Ausbau der Winkel aufgrund der lateralen Belastung der Verbindung nicht gegeben. Im Bauteilstoß zum Wintergarten liegt die Decke auf einem Stahlwinkel auf. Der

Stahlwinkel ist mittels mehrerer Iso-Körbe am Betonbau mit Gewindestangen befestigt und kann schadensfrei davon getrennt werden. Die darauf aufliegende BSP-Decke ist im Bereich der Iso-Körbe mit Nagelplatten verbunden. Der Rückbau ist aufgrund der lateralen Belastung der Nagelplatte nur unter Beschädigung möglich und zeitaufwändig. Im Bereich der Mittelwand werden Zugkräfte stockwerkübergreifend mittels Stahlbauteilen übertragen. Diese sind wahrscheinlich schadensfrei trennbar. Im Bereich der Elementstöße der Decke werden verschraubte Passbretter eingesetzt. Aufgrund der lateralen Belastung sind diese möglicherweise nicht schadensfrei lösbar. Im Randbereich der Deckenstöße befinden sich ausgegaltete Stahlbauteile zur Momenten- und Schubkraftübertragung. Die Trennbarkeit ist aufgrund der lateralen Belastung wahrscheinlich nur unter Beschädigung möglich. In Verbindung mit der hohen Anzahl der Verbindungsmittel bedeutet dies einen erheblichen Aufwand.

Insgesamt wird die Trennbarkeit der Bauteilverbindung als teilweise schadensfrei lösbar bewertet. Es kommen viele stiftförmige, lateral belastete Verbindungsmittel zum Einsatz, deren schadensfreie Trennbarkeit nach 50 oder mehr Jahren zu hinterfragen ist und mit großem zeitlichen Aufwand verbunden ist. Dennoch wird positiv beurteilt, dass auf geklebte oder gegossene Verbindungen verzichtet wird.

Aus der Analyse der verwendeten Verbindungsmittel geht deren hohe Anzahl hervor. Es wird folglich keine Reduktion von Verbindungsmitteln festgestellt. Der Rückbau der verwendeten Verbindungsmittel ist mit handelsüblichen Geräten möglich und die Bauteile können beim Rückbau mit marktüblichen Hebegeräten und Transportmitteln bewegt werden.

Table 6-32: Bikes & Rails – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Demontierbarkeit der Bauteile		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Erreichbarkeit der Verbindungen	Rückbaubarkeit des Ausbaus und der der Sekundärstruktur	1/1
	Positionierung der Verbindungsmittel	0,5/1
Trennbarkeit der Verbindungsmittel	a) Teilweise schadensfrei lösbare Verbindungen b) Größtenteils schadensfrei lösbare und wiederverwendbare Verbindungen	a) 1/1 b) 0/2,5
Reduktion des Rückbauaufwands	Reduktion der Verbindungsmittelanzahl	0/1
	Rückbau mit einfachen Geräten möglich	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3/6</b>

#### *Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils*

Zwischen den Komponenten der tragenden Bauteile wurde auf Verklebungen verzichtet. Die Komponenten der Außenwand werden mittels mechanischer Verbindungsmittel gefügt. Hier werden teilweise Klammern und Nägel verwendet, welche bei der Fassadenverkleidung oder der Brandschutzbekleidung zu Beschädigungen beim Trennen führen können. Die Lagesicherung des Ständerwerks erfolgt mittels weniger Verbindungsmittel [128]. Somit können die einzelnen Komponenten wie Ständer, Schwelle und Rähm schadensfrei

voneinander getrennt werden. Die Mittelwand ist mit verschraubten Brandschutzplatten bekleidet. Diese lassen sich schadensfrei von der BSP-Wand trennen. Im Bodenaufbau wird ein gegossener Heizestrich verwendet. Dieser wird jedoch mittels Folien von den benachbarten Bauteilschichten getrennt, sodass ein Rückbau des Fußbodenaufbaus möglich ist. Zudem wurde bei der Errichtung des Gebäudes auf eine Verklebung eines temporären Witterungsschutzes auf der Rohdecke verzichtet [128]. Die gewählten Bauteilaufbauten sind also aufgrund des Verzichts auf Verklebungen sortenrein trennbar. Da jedoch teilweise genagelte oder geklammerte Verbindungen im Wandaufbau sowie ein Zementestrich im Bodenaufbau verwendet werden, ist eine schadensfreie Trennung nicht zwischen allen Bauteilschichten möglich.

Sowohl der Außenwand- als auch der Deckenaufbau kommen mit einer geringen Anzahl an Bauteilschichten aus. Durch die Verwendung nicht tragender Wände als Wohnungstrennwand können die Schichten in dieser minimiert werden, da so kein zweischaliges Tragwerk ausgeführt werden muss. Die tragende Mittelwand ist jeweils nur innerhalb einer Wohneinheit raumtrennend ausgeführt. So kann auf aufwändigen Schallschutz verzichtet werden.

Die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel innerhalb der Bauteile lässt sich nicht abschließend beurteilen. Aus den gesichteten Aufnahmen [126, 128] kann festgestellt werden, dass die Befestigung der Fassadenschalung mit gut sichtbaren Nägeln erfolgt, während die Schrauben der raumseitigen Wandbekleidungen mit Spachtelmasse verdeckt werden und nicht mehr einfach aufzufinden sind. Der Fußbodenaufbau kann schichtweise rückgebaut werden. Über die Anzahl der Verbindungsmittel kann keine Aussage getroffen werden. Es sind jedoch keine Maßnahmen bekannt oder erkennbar, um die Anzahl der Verbindungsmittel zwischen den einzelnen Komponenten zu reduzieren. Da größtenteils mechanische Verbindungsmittel wie Schrauben, Klammern und Nägel verwendet werden und es keine Steck- oder Holz-Holz-Verbindungen in den Bauteilaufbauten gibt, wird von einer gewöhnlichen Anzahl an Verbindungsmitteln ausgegangen.

Die tragenden Bauelemente beziehungsweise Komponenten des Gebäudes sind größtenteils nutzungsneutral. Die Komponenten des Rahmentragwerks (Ständer, Schwelle, Rähm) lassen sich für die Herstellung anderer Holztafelbauteile wiederverwenden, während die BSP-Elemente aus der Mittelwand und der Decke nur wenige Durchbrüche aufweisen und so jeweils wieder für ein anderes tragendes Bauteil wiederverwendet werden können.

Tabelle 6-33: Bikes & Rails – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile

<b>Kriterium:</b>		
Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Verbindungen zwischen Komponenten	Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen	1/2
	Reduktion der Bauteilschichten	1/1
	Gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel	0,5/1
	Geringe Anzahl der Verbindungsmittel	0/1
Wiederverwendungspotenzial	Nutzungsneutrale Bauelemente und Komponenten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

### Informationsverfügbarkeit

Für das Projekt Bikes & Rails wurde ein digitales Gebäudemodell erstellt (siehe Abbildung 6-11) [126]. Zudem wurden weitere Teilmodelle, wie beispielsweise ein Tragwerksmodell (siehe Abbildung 6-7) und ein bauphysikalisches Analysemodell [128], im Zuge der Planung erstellt. Eine Erfassung des Gebäudes in einer Bauteildatenbank ist nicht bekannt.



Abbildung 6-11: Bikes & Rails - 3D-Modell (aus [126])

Der Entwurf der Konstruktion und Bauteilaufbauten erfolgte im Hinblick auf eine sortenreine Rückbaubarkeit [130]. Weitergehende Konzepte wie ein Demontagekonzept zur Wiederverwendung sind nicht bekannt. Ebenso ist nicht bekannt, ob Prüfkörper oder Ähnliches für die Validierung der sortenreinen Trennbarkeit erstellt wurden.

Tabelle 6-34: Bikes & Rails – Bewertung der Informationsverfügbarkeit

Kriterium: Informationsverfügbarkeit		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Digitales Gebäudemodell	BIM-Modell – Digitaler Zwilling	2/2
	Erfassung in Bauteildatenbank zur Wiederverwendung	0/1
Rückbaukonzept	Rückbau- und Demontagekonzept	1/2
	Mock-Up / Prüfkörper zur Erprobung von Rückbauszenarien	0/1
Gesamtbewertung		3/6

### Materialrecycling

Das Holztragwerk besteht aus den Holztafelbauwänden, den BSP-Wänden der Mittelachse, sowie den BSP-Decken. Darüber hinaus sind das Treppenhaus und der Wintergarten in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Die Holzbauteile sollten primär wiederverwendet werden und erst nach der Wiederverwendung einer Kaskadennutzung oder Kompostierung zugeführt werden. Insbesondere die Wandstützen der Holztafelbauwände sind aufgrund ihrer Klebstofffreiheit besonders für eine Kaskadennutzung und Kompostierung oder energetische Nutzung geeignet [21]. Sollte eine Wiederverwendung nicht mehr möglich sein. Die Bauelemente aus BSP weisen einen Klebstoffanteil auf. Dieser kann eine Kompostierung erschweren, dennoch ist auch BSP zur Kaskadennutzung geeignet und kann, sollte es nicht mehr als tragendes Bauelement wiederverwendet werden können, gehackt und zu Spanplatten verarbeitet werden, um so die CO<sub>2</sub>-speichernde Wirkung verlängern zu können [21]. Die in Ortbeton erstellten Teile des Tragwerks lassen sich nicht wiederverwenden, sie können lediglich weiterverwertet werden. Die sortenreine Trennung von Beton, insbesondere in den Bereichen mit aufgebrachtener Wärmedämmung, ist aufwändig [21]. Zudem ist Recycling von Beton mit gleichbleibender Qualität nicht möglich.

Die sortenreine Trennbarkeit der Außenwand ermöglicht es, das Recyclingpotenzial der verwendeten Materialien voll auszuschöpfen. So können die Komponenten aus Vollholz einer stofflichen Kaskadennutzung, Kompostierung oder energetischen Nutzung unterzogen werden. Die Kernschicht der Holztafelbauwand ist wie beim Haus des Holzes mit Gipskartonplatten verkleidet und mit Mineralwolle gedämmt. Hier ist wieder die theoretisch mögliche, jedoch nicht praktizierte Recyclingfähigkeit von Gipskartonplatten anzuführen [21, 26]. Grundsätzlich ist auch die Wiederverwertung der Mineralwollgedämmung möglich - wie auch bei den Gipskartonplatten wird diese jedoch zum heutigen Zeitpunkt noch wenig praktiziert [21]. Für den Dachaufbau ist lediglich dessen sortenreine Trennbarkeit, nicht jedoch die Materialität der einzelnen Bauteilschichten bekannt.

Für die Innenwände gilt, dass diese sortenreine trennbar sind. Bei den Materialien handelt es sich wieder um Mineralwollgedämmung, Gipskartonfeuerschutzplatten sowie Metallprofile. Die grundsätzliche Wiederverwertbarkeit ist für alle Materialien gegeben, wird jedoch größtenteils noch nicht praktiziert [21]. Der Deckenaufbau ist größtenteils sortenrein trennbar. Lediglich der Estrich ist möglicherweise nicht vollständig von den Rohren der Fußbodenheizung sowie der Trennfolie zu lösen. Die lose Schüttung kann wiederverwendet werden, während die Trittschalldämmung beim Ausbau des Estrichs wahrscheinlich Schaden

nimmt und nicht wiederverwendet werden kann. Im Fußbodenaufbau kommen bis auf den Fußbodenbelag aus Parkett keine biogenen und somit kompostierbaren Materialien zum Einsatz.

Tabella 6-35: Bikes & Rails – Bewertung des Materialrecyclings

<b>Kriterium:</b> Materialrecycling		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Recyclingfähigkeit Tragwerk	Tragende Bauteile und Bauteilelemente	1/2
Recyclingfähigkeit Gebäudehülle	Fassade	1/1
	Dachaufbau	0,5/1
Recyclingfähigkeit Ausbau	Innenwand	0,5/1
	Boden	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

#### 6.3.5. Auswertung Bikes & Rails

Die Auswertung der Kriterien ergibt, dass im Projekt Bikes & Rails viele Aspekte des kreislauffähigen Bauens umgesetzt werden. Besonders stechen die sehr gute Flächeneffizienz und Nutzungsdichte des Gebäudes sowie die gute Flexibilität hervor. Aufgrund der Holzhybridbauweise kann beim ressourceneffizienten Materialeinsatz keine sehr gute oder gute Bewertung erzielt werden. Bei der Wiederverwendung fällt vor allem auf, dass die gewählten Bauteile grundsätzlich ein gutes Wiederverwendungspotenzial aufweisen, dieses aber nicht abgerufen werden kann, da aufgrund der gewählten Bauteilverbindungen eine schadensfreie Demontage nicht gewährleistet ist. Dafür wurden die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilschichten auf deren sortenreine Trennbarkeit optimiert, sodass sich ein gutes Potenzial für das Materialrecycling ergibt. Betrachtet man die sehr engen finanziellen Rahmenbedingungen, um sozialen Wohnraum in Wien zu schaffen, ist ein hochwertiges und in vielen Aspekten der Kreislaufwirtschaft innovatives Projekt entstanden.

Tabelle 6-36: Bikes &amp; Rails - Auswertung

Bikes & Rails		
<b>1. Reduce</b>		
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	5
	1.1.2. Nutzungsdichte	5,5
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	0
	1.2.2. Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung	1
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	3
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	2
<b>2. Long-Use</b>		
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	4,5
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	4
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	4
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	3,5
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	3,5
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>		
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	4
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	3
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	3,5
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit	3
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling	3,5



## 6.4. Walden 48 (DE)

Neben dem Projekt Walden 48 stand im Rahmen der Suche nach geeigneten Referenzprojekten noch das Holzhaus „Die Linse“ von denselben Architekten zur Auswahl. Da das Tragwerk der Linse jedoch viele Ähnlichkeiten zu den Tragwerken der vorhergehenden Referenzgebäude aufweist, wurde stattdessen das Projekt Walden 48 gewählt, welches als einziges der Referenzgebäude eine Schottenbauweise aufweist. Das Projekt Walden 48 wird von einer Bauherrngemeinschaft finanziert und zeigt trotz der Schottenbauweise eine hohe Flexibilität in den Grundrissen und im Wohnungsspiegel. Es weist als einziges der drei Projekte eine Trennung zwischen Tragwerk und Fassade sowie eine Holz-Beton-Verbund-Decke auf.

### 6.4.1. Grundlagen

Das Bauprojekt Walden 48 wurde von einer Baugemeinschaft in Auftrag gegeben. Die Architektur stammt von einer Arge aus Scharabi Architekten und Anne Raupach. Die Planungsphase fand von 2013 bis 2017 statt, die Ausführung von Januar 2018 bis Mai 2020 [135]. Das Ziel war es, ein flexibles Wohngebäude in Holzbauweise zu errichten [135].

Das Gebäude befindet sich in Berlin Friedrichshain, zwischen der Landsberger Allee, einer viel befahrenen Straße und dem Georgenfriedhof [135]. Der Baugrund befindet sich innerhalb der historischen Friedhofsmauer, er wurde früher als Parkplatz für den Friedhof genutzt und war zuletzt eine brachliegende Fläche. Die Stadt Berlin versucht mit solchen Umwidmungen dem Mangel an innerstädtischem Baugrund entgegenzuwirken [136]. Folgende Kennzahlen werden zum Projekt angegeben [135, 137]:

Table 6-37: Walden 48 - Flächen und Volumen

Bezeichnung	Fläche/Volumen
Grundstücksfläche:	2.100 m <sup>2</sup>
Gebäudegrundfläche:	840 m <sup>2</sup>
Gebäudevolumen:	23.800 m <sup>3</sup>
Bruttogrundfläche:	Ca. 7.350 m <sup>2</sup>
Nutzfläche:	Ca. 4.800 m <sup>2</sup>
Gewerbe:	-
Wohnen:	Ca. 4.700 m <sup>2</sup>
Gemeinschaftsraum EG:	Ca. 100 m <sup>2</sup>
Dachterrasse gemeinschaftlich:	Ca. 80 m <sup>2</sup>
Untergeschoss:	unbekannt
Konstruktions-, Verkehrs- und Funktionsfläche:	unbekannt

Der Flächenaufstellung ist zu entnehmen, dass das Gebäude zu Wohnzwecken genutzt wird. Daneben sind Gemeinschaftsflächen für Bewohner und Anwohner vorhanden [135, 137, 138]. Ein Gemeinschaftsraum befindet sich im Erdgeschoss. Dort befindet sich ebenso der

gemeinschaftlich genutzte Garten (siehe Abbildung 6-12), während eine gemeinschaftliche Terrasse im Dachgeschoss zur Verfügung steht. Das Untergeschoss verfügt über eine Fahrradgarage [135]. Die Wohnungen befinden sich im südlichen Teil des Erdgeschosses sowie in den Obergeschossen als durchgesteckte Wohnungen (siehe Abbildung 6-12).



Abbildung 6-12: Walden 48 - Grundriss EG und RG (aus [137])

Das Gebäude ist in Holz-Beton-Hybridbauweise errichtet. Der Keller, die innenliegenden Wände der Erschließungskerne sowie die kurzen Gebäudeseiten sind aus Stahlbeton hergestellt (siehe Abbildung 6-13) [138, 139]. Das Gebäude ist in Schottenbauweise errichtet. Die tragenden Wände sind aus BSP und sind in einem Raster von 7,20 m in der kurzen Gebäuderichtung ausgerichtet [138, 139]. Die Holz-Beton-Verbunddecken werden einachsrig in Gebäudelängsrichtung über die Schotten gespannt [138, 140]. Die längsseitigen Gebäudefassaden bestehen aus nicht tragenden, vorgehängten Holztafelbauwänden [138, 140]. Die Aussteifung in Querrichtung erfolgt über die Schottenwände. In Längsrichtung erfolgt die Aussteifung über die Erschließungskerne. Die Holz-Beton-Verbunddecken bilden aussteifende Scheiben [138]. Das Gebäude erfüllt den KfW-55-Standard. Die Beheizung erfolgt mittels Wärmepumpe, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und ergänzender Gastherme [139, 140]. Die Wärmepumpe kann im Sommer auch zur passiven Kühlung verwendet werden [140].

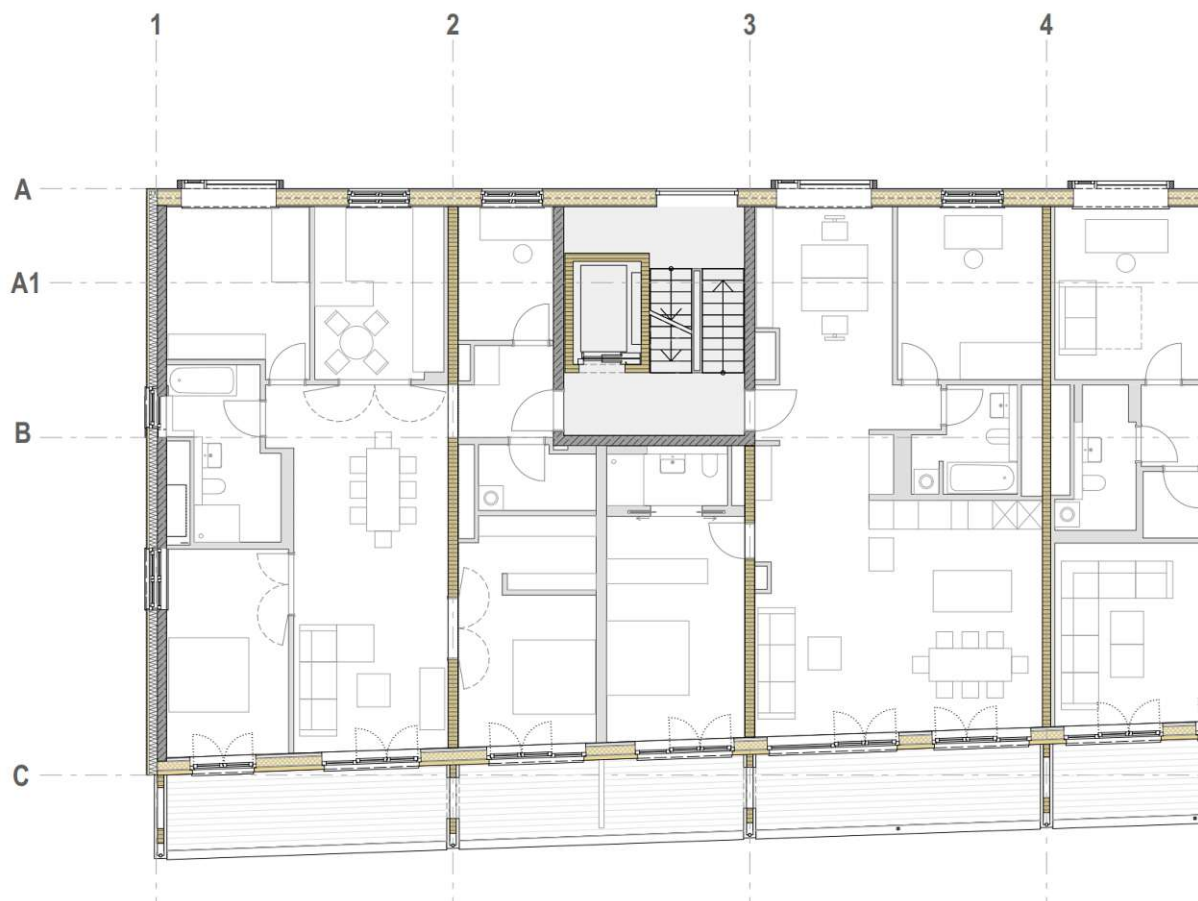


Abbildung 6-13: Walden 48 - Ausschnitt Tragwerk (aus [137])

## 6.4.2. Analyse – Reduce

### Flächeninanspruchnahme

Der Baugrund war früher Teil eines Friedhofgeländes, auf der Baufläche selbst wurde nicht bestattet, sie wurde zuvor als Parkplatz genutzt, war jedoch nicht vollständig versiegelt [136]. Daher wird die Fläche als Neubau auf einer vorgenutzten Fläche eingestuft. Das Gebäude ist teilunterkellert [138]. Ein Verzicht auf eine Unterkellerung stellt immer eine Minimierung des Eingriffs in den Boden dar. Es muss angemerkt werden, dass trotz Teilunterkellerung ein Großteil der Gebäudegrundfläche unterkellert ist. Auf der Südseite des Gebäudes befindet sich der Gemeinschaftsgarten. Dieser stellt einen Großteil der unbebauten Grundstücksfläche dar, sodass auf dem Baugrund große Flächen unversiegelt bleiben.

Tabelle 6-38: Walden 48 – Bewertung der Flächeninanspruchnahme

<b>Kriterium:</b> Flächeninanspruchnahme		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Bewertung des Standortes	a) Neubau auf unbebauter Außenentwicklungsfläche	a) 0/0
	b) Nachverdichtung auf unbebauter Innenentwicklungsfläche	b) 0/2
	c) Neubau auf vorgenutzter Fläche	<b>c) 3/3</b>
	d) Neubau auf vorgenutzter Fläche - Verbesserung des Versiegelungsgrades	d) 0/4
Minimierung des Eingriffs in den Boden	Gründungsmaßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden	0,5/1
Ausgleichsmaßnahmen	Zusätzliche Maßnahmen, die der Bodenversiegelung entgegenwirken	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4,5/6</b>

### Nutzungsdichte

Im Gebäude Walden 48 befinden sich 43 Wohneinheiten, im Erdgeschoss und 1. Obergeschoss befinden sich Maisonettwohnungen, im Dachgeschoss befindet sich ein zurückgesetztes Staffelgeschoss, die vier Stockwerke vom 2. bis zum 5. Obergeschoss werden über die gesamte Gebäudetiefe für Wohnungen genutzt. Die Grundrisse von Walden 48 liegen für das Erdgeschoss, das 3. Obergeschoss sowie das Dachgeschoss vor [107, 137]. Die Wohnungen in den vorliegenden Grundrissen reichen von 2-Zimmer- bis zu 5-Zimmer-Wohnungen, wobei der Großteil zwischen drei und vier Zimmer aufweist. Von den Architekten wurde ein Wohnungsspiegel mit den Wohnungsgrößen zur Verfügung gestellt, demnach befinden sich im Objekt sieben Wohnungen mit 155 m<sup>2</sup>, 16 Wohnungen mit 125 m<sup>2</sup>, 13 Wohnungen mit 95 m<sup>2</sup> und sieben Wohnungen mit 55 m<sup>2</sup> [141]<sup>4</sup>. Für die Abschätzung der Pro-Kopf-Wohnfläche mittels des SNBS-Excel-Tools wird angenommen, dass der Wohnungsspiegel entsprechend der Wohnungsgröße aus sieben 5-Zimmer-, 16 4-Zimmer-, 13 3-Zimmer- und sieben 2-Zimmer-Wohnungen besteht. Im SNBS-Excel-Tool ergibt sich eine geschätzte Pro-Kopf-Wohnfläche von

<sup>4</sup> [141] F. Scharabi, "Scharabi Architekten, persönliche Kommunikation," ist eine nicht öffentlich einsehbare Quelle

knapp unter 50 m<sup>2</sup>/Pers. [112]. Die Wohnflächen des Objektes werden daher gegenüber dem Durchschnitt als leicht reduziert eingestuft.

Es werden zwar keine 1- bis 1,5-Zimmer-Wohnungen angeboten, dafür existieren sieben Wohnungen mit circa 55 m<sup>2</sup>, welche sich als Paar-Wohnungen eignen. Auf Tiefgaragenstellplätze wurde zugunsten einer Fahrradgarage im Untergeschoss verzichtet, da sich die Baugemeinschaft gegen Autostellplätze entschieden hat [139]. Die Grundrisse der 4- oder 5-Zimmerwohnungen sind wohngemeinschaftstauglich. Größtenteils weisen diese Wohnungen zwei Badezimmer auf, sodass eine Belegung mit einer Wohngemeinschaft möglich ist [137]. Im Erdgeschoss verfügt das Projekt Walden 48 über einen Gemeinschaftsraum, der flexibel vom Foyer abgetrennt werden kann und für Veranstaltungen oder Feiern geeignet ist [135]. Neben den privaten Freiflächen, über die jede Wohneinheit verfügt, stehen den Bewohnern mit dem Gemeinschaftsgarten im südlichen Grundstücksbereich sowie der gemeinschaftlichen Dachterrasse auch hochwertige Freiflächen zur gemeinsamen Nutzung zur Verfügung [107, 135].

Tabelle 6-39: Walden 48 - Bewertung Nutzungsdichte

<b>Kriterium:</b> Nutzungsdichte		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Pro-Kopf-Wohnfläche	a) Größer als durchschnittliche Wohnfläche > 50 m <sup>2</sup>	a) 0/0
	b) Durchschnittliche Wohnfläche bis 15 % reduziert 42,5 m <sup>2</sup> - 50 m <sup>2</sup>	<b>b) 1/1</b>
	c) Durchschnittliche Wohnfläche 15 – 30 % reduziert 35 m <sup>2</sup> - 42,5 m <sup>2</sup>	c) 0/2
	d) Durchschnittliche Wohnfläche > 30 % reduziert < 35 m <sup>2</sup>	d) 0/3
Angebot kleiner Wohnungen	1 bis 1,5-Zimmer Wohnungen < 35 m <sup>2</sup> oder 2 bis 2,5-Zimmer Wohnungen < 70 m <sup>2</sup>	1/1
Mobilitätskonzept mit Gemeinschaftsnutzung	Car-Sharing Angebote, Förderung der Fahrradmobilität	0,5/0,5
Nutzungsmaximierende Wohnformen	Cluster-Wohnen oder Wohngemeinschaften im Wohnungsspiegel	0,5/0,5
Flächen zur Gemeinschaftsnutzung	Gemeinschaftsbüro, Waschräume, Werkstätten, Aufenthaltsräume, Spielräume etc.	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4/6</b>

### Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

Beim Projekt Walden 48 wurde keine nennenswerte Bauteilwiederverwendung oder Bestandsnutzung praktiziert.

Tabelle 6-40: Bikes & Rails - Bewertung Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

Kriterium: Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Einsatz wiederverwendeter Bauteile	a) Kein Einsatz	a) 0
	b) Vereinzelter Einsatz, z. B.: einzelne Stützen oder kleinere Teile der Fassadenbekleidung	b) 0/1
	c) Systematischer Einsatz in einzelnen, nicht tragenden Bauteilschichten, z. B.: Fassadenbekleidung oder Fußbodenbelag	c) 0/2
	d) Systematischer Einsatz in der Sekundärstruktur, z. B. nicht tragende Fassadenelemente oder Fenster	d) 0/3
	e) Systematischer Einsatz für einen wesentlichen Teil der Tragstruktur, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk oder Weiternutzung eines bestehenden Untergeschosses	e) 0/4
	f) Großteil der Primär- und Sekundärstruktur wiederverwendet, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk mit wiederverwendeten Fassadenelementen	f) 0/5
	g) Nahezu vollständiger Einsatz wiederverwendeter Bauteile, z. B.: Ortswechsel eines ganzen Gebäudes	g) 0/6
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>0/6</b>

### Reduktion des Stahlbetonteils

Ab dem Erdgeschoss werden die Giebelwände in Stahlbeton ausgeführt [138]. Der vertikale Lastabtrag erfolgt über BSP-Wände in Schottenbauweise. Um die große Spannweite von 7,20 m zu ermöglichen, werden die Decken in Holz-Beton-Verbundbauweise ausgeführt [138]. Die vertikalen Elemente des oberirdischen Tragwerks werden vollständig in Holzbauweise hergestellt, während die horizontalen Elemente aus Holz-Beton-Verbund-Decken bestehen.

Das Untergeschoss ist eine Teilunterkellerung aus Stahlbeton [138]. Da diese jedoch einen Großteil des Gebäudes unterkellert und somit nur eine kleine Einsparung an Stahlbeton vorliegt, wird die Messgröße „Verzicht auf Untergeschoss“ mit 0,5 Punkten bewertet.

Die drei innenliegenden Wände der Erschließungskerne sind jeweils aus Stahlbeton, während die Fassade im Bereich der Erschließungskerne in Holztafelbauweise erfolgt. Zudem konnten die Treppenläufe, Podeste sowie der Aufzugsschacht alle in Sichtholz ausgeführt werden [140]. So kann der Stahlbetonanteil in der Erschließung reduziert werden.

Tabelle 6-41: Walden 48 - Bewertung Reduktion des Stahlbetonteils

<b>Kriterium:</b> Reduktion des Stahlbetonteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk (oberirdisch exkl. Erschließung)	Tragstruktur ab 1. OG (exkl. Erschließungskerne) in Holzbauweise mit Verzicht auf Hybridbauteile	0/1
	Verzicht auf ein Stahlbeton-Erdgeschoss	1/1
Gründung	Verzicht auf Untergeschoss	0,5/2
	Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung	0/1
Erschließung	Verzicht auf Stahlbeton-Erschließungskerne	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>2/6</b>

#### *Ressourceneffizienz des Holztragwerks*

Die Decken werden alle in Holz-Beton-Verbundbauweise ausgeführt. Diese führen einerseits zu einem reduzierten Holzeinsatz. Durch den nicht lösbaren Verbund zwischen Holz und Beton werden die Decken im Kontext der Kreislauffähigkeit andererseits nicht als ressourceneffizient eingeordnet. Die Verbunddecken ermöglichen jedoch eine große Spannweite von 7,20 m zwischen den einzelnen BSP-Wänden, sodass es insgesamt zu einer Reduktion tragender Innenwände kommt. Die Fassade an den langen Gebäudeseiten besteht vollständig aus vorgehängten, nicht tragenden Holztafelbauelementen und ist sehr ressourceneffizient. Während die Gebäudeaussteifung über die Scheibenwirkung der Holz-Beton-Verbunddecke, die Schottenwänden aus BSP und die Erschließungskerne aus Stahlbeton erfolgt. Die Aussteifung wird als ressourceneffizient beurteilt, da die dazu herangezogenen Bauteile ohnehin für den vertikalen Lastabtrag (Schottenwände) beziehungsweise den Brandschutz (Stahlbetonkerne) notwendig sind.

Tabelle 6-42: Walden 48 - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Ressourceneffizienz des Holztragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Decken	a) Brettstapeldecken	a) 0/1
	b) Kasten- oder Rippendecken	b) 0/2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Innenwände	a) Reduktion tragender Innenwände	<b>a) 1/1</b>
	b) Skeletttragwerk ohne tragende Innenwände	b) 0/2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Fassade	Holztafelbauweise	1/1
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Aussteifung	Gebäudeaussteifung über Treppenhauswände und Teile der Außenwände	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3/6</b>

### Ökologische Baustoffwahl

Als Fußbodenbelag wird in den Wohnungen Parkett verwendet. Darunter folgt ein gegossener, mineralischer Estrich mit Fußbodenheizung mit darunterliegender Trennfolie. Darunter folgen eine nicht näher definierte Trittschalldämmung und Schüttung [135].

Die raumseitige Bekleidung wird im Bereich der Außenwände sowie bei sämtlichen Trockenbauwänden aus Gipskartonfeuerschutzplatten hergestellt [135, 142]. Im Bereich der tragenden Schottenwände konnte jedoch eine Sichtoberfläche der BSP-Elemente erhalten bleiben. Bei wohnungstrennenden Schottenwänden sind diese lediglich einseitig bekleidet. Bei Schottenwänden, die keine Einheiten trennen, wurden beide Seiten der BSP-Wand ohne Bekleidung geplant [135, 138, 140].

Da die Fassade nicht Teil des Tragwerks ist und daher geringere Anforderungen an den Brandschutz bestehen, kann diese mit Holzfaserdämmung ausgeführt werden [135]. Sogar im Bereich der Stahlbetongiebelwände wurde anstelle eines WDV-Systems eine Holzständerkonstruktion mit einer Gefachdämmung aus Holzweichfaser-Dämmstoff verwendet [143]. Außer auf den nördlichen und westlichen Gebäudeseiten zur Landsberger Allee, welche mit Schiefertafeln auf Rauspundschalung verkleidet sind, ist das Gebäude mit unbehandelter Holzschalung bekleidet [139]. Bei den Fenstern kommen hauptsächlich Holz-Alu-Fenster sowie reine Holzfenster zum Einsatz [139].

Table 6-43: Walden 48 – Bewertung der ökologische Baustoffwahl

<b>Kriterium: Ökologische Baustoffwahl</b>		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Fußbodenaufbau	Bodenbelag aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/0,5
	Alternativen zu mineralisch gebundener Schüttung	0/0,5
	Alternativen zu mineralischer Trittschalldämmung	0/0,5
	Alternativen zu Zementestrich	0/0,5
Raumseitige Bekleidung	Raumseitige Bekleidungen aus Holzwerkstoff oder Lehm	0,5/1
Dämmstoffe	Verwendung biogener Dämmstoffe	1/1
Fassadenbekleidung	Fassadenbekleidung aus nachwachsenden Rohstoffen	1/1
Fenster	Holzfenster	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4/6</b>



### 6.4.3. Analyse- Long-Use

#### *Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart*

Innerhalb der Nutzungseinheiten variiert der Anteil nicht tragender Innenwände, da in einigen Wohneinheiten die Schottenwände auch die Wohnungstrennwände bilden und andere Wohneinheiten sich über mehrere Gebäuderaster erstrecken, sodass die Schottenwände innerhalb der Wohneinheit liegen. Der Anteil nicht tragender Innenwände beträgt für den ersten Fall 100 % und liegt beispielsweise für das ganze Erdgeschoss, aber auch für mehrere Wohnungen in den Obergeschossen und im Dachgeschoss vor. Für die Wohnungen mit einer tragenden Schottenwand innerhalb der Nutzungseinheit wurde ein Anteil nicht tragender Wände von etwa 70 bis 75 % ermittelt [107] und variiert je nach Grundrissvariante. Die freien Flächen zwischen zwei BSP-Trennwänden betragen bis zu 90 m<sup>2</sup>.

Leichte, nicht tragende Innenwände werden in Trockenbauweise ausgeführt. Dafür werden die Metallständer an der Rohdecke befestigt. Im Sockelbereich durchstoßen die nicht tragenden Innenwände so den Fußbodenaufbau und lassen sich nicht ohne Beschädigung des Fußbodenaufbaus umbauen. Oberseitig wird die Wand an der Sichtdecke aus Holz befestigt und kann ohne beziehungsweise mit geringer optischer Beschädigung der Holzdecke demontiert werden. Die Innenwände können zwischen den Fenstern an beliebiger Stelle positioniert werden. Zwischen zwei Schottenwänden mit 7,2 m Abstand bietet sich aufgrund der Fensterkonfiguration ein Wandstück von etwa 1,0 m Länge in der Mitte des Rasters an, um eine Innenwand anzuschließen [107].

Die Erschließung ermöglicht es, pro Stiegenhaus zwei oder drei Wohnungen zu erschließen, sodass größere Nutzungseinheiten in den Stockwerken verkleinert werden können. Die Raumabmessungen ergeben sich aus dem Gebäuderaster von 7,2 m und der Gebäudetiefe von etwa 13 m. Die meisten Wohneinheiten haben den Sanitärbereich und den Gang in der Mitte der Gebäudetiefe angeordnet, sodass nordseitig Raumtiefen von etwa 4,0 m und südseitig Raumtiefen von etwa 5,0 bis 6,0 m entstehen. Durch das Raster von 7,2 m, das sich in der Mitte teilen lässt, ergeben sich größtenteils Räume mit einem nutzungsspezifischen Raster von 3,5 mal 4,0 m bis 6,0 mal 7,0 m.

Aufgrund der unterschiedlichen Wohnungsanzahl je Geschoss existieren innerhalb großer Wohneinheiten bereits Versorgungsschächte für darunter- oder darüberliegende kleinere Wohneinheiten. Diese werden in den großen Wohneinheiten auch genutzt, etwa um ein weiteres Badezimmer zu versorgen [107]. Alle Wohnungen weisen mehrere Versorgungsschächte auf, sodass eine Teilung in kleinere Einheiten später möglich ist.

[140]

Tabelle 6-44: Walden 48 - Bewertung Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Größtenteils nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit > 80 %	1/1
	Anschlüsse von leichten Innenwänden ohne Eingriff in Fußbodenaufbau und Decke	0,5/1
	Anschlussmöglichkeit von Innenwänden in geringen Abständen in der Fassade	1/1
Erschließung	Erschließung kleiner voneinander unabhängige Einheiten, z. B.: zwei Eingangsmöglichkeiten	0,5/1
Grundriss	Nutzungsneutrale Räume, circa 3 x 3m bis 5 x 5m	1/1
Versorgung	Mehrere Steigzonen je Einheit ermöglichen Teilung in kleinere Einheiten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5/6</b>

#### *Umnutzung für eine andere Nutzungsart*

Bis auf die tragenden Schottenwände können innerhalb der Wohneinheiten alle Wände zurückgebaut werden. Die Schottenwände selbst lassen sich nicht großflächig öffnen. Somit muss bei einer möglichen Umnutzung die neue Nutzung mit der maximalen bestehenden Raumgröße von etwa 7,0 auf 13,0 m funktionieren. Ein beliebiger Zusammenschluss von Nutzungseinheiten ist nicht möglich, da die Schottenwände teilweise als Wohnungstrennwände ausgebildet sind. Eine Ausnahme bilden Wohnungen, deren Wohnungstrennwand keine Schottenwand, sondern eine Trockenbauwand bildet. Diese ließen sich im Falle eines Umbaus zusammenlegen. Insgesamt machen die tragenden Innenwände je Geschoss mehr als 20 % aller Innenwände aus [107]. Zu möglichen Traglastreserven, um andere Nutzungen zu ermöglichen, ist nichts bekannt. Ein Austausch oder Umbau der Fassade scheint möglich zu sein. Die Fassadenelemente bestehen aus vorgehängten Holztafelbauelementen, welche keine lastabtragende Funktion übernehmen [138, 140]. Dadurch besteht sowohl bei Fenstergrößen als auch bei Fensterabständen eine große Gestaltungsfreiheit. Im Zuge einer vollständigen Umnutzung ist auch ein Austausch der Fassadenelemente mit minimalem Eingriff in das Tragwerk denkbar. Vereinfachend kommt hinzu, dass die südseitigen Balkone mit einem selbsttragendem Skeletttragsystem hergestellt werden, welches dem Gebäude vorgestellt ist [140].

Die lichte Raumhöhe von 2,80 m [141] ist ausreichend, um das Gebäude für einen anderen Nutzungszweck, wie etwa hochwertige Büroflächen, zu verwenden. Die vorhandene Gebäudetiefe von circa 13,0 bis 13,5 m liegt in dem Bereich, der nach dem DGNB-Kriterienkatalog eine ideale Gebäudetiefe sowohl für Wohnzwecke als auch für Büronutzung darstellt [20]. Bei einer Gebäudegrundfläche von circa 800 m<sup>2</sup> verfügt das Objekt über drei Erschließungskerne, sodass jeweils eine Bruttogrundfläche von weniger als 400 m<sup>2</sup> je Geschoss und je Erschließungskern bedient wird. Zu den Erweiterungsreserven in den Haustechnikschächten und -räumen liegen keine direkten Aussagen vor, sodass hier Annahmen getroffen werden. Zum Einen verfügt das Objekt Walden 48 über eine hohe Anzahl an Versorgungsschächten. Im Regelgeschoss konnten 19 Steigschächte gezählt werden [107],

sodass hier von ausreichend Platz für etwaige Erweiterungen in den Steigschächten auszugehen ist. Zum anderen ermöglicht die Holz-Beton-Verbunddecke relativ große Durchbrüche [140]. Die auf dem Dach positionierte Lüftungsanlage [140] ist erweiterbar und gut erreichbar. Aufgrund der Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist eine Wärmepumpe moderater Größe ausreichend [135]. Zudem trägt die sehr gute Wärmedämmung, welche auch aus Gründen des Schallschutzes gewählt wurde, zur Reduktion der Größe der notwendigen haustechnischen Anlagen bei [135].

Tabella 6-45: Walden 48 - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Nutzungsneutrales Tragwerk, größtenteils nicht tragende Innen- und Trennwände > 80 %	0,5/1
	Tragreserven, Nutzlast > 2 kN/m <sup>2</sup> auf 50 % der Bruttogrundfläche	0/0,5
	Fassade austauschbar, ermöglicht z. B.: Vergrößerung der Belichtungsfläche	0,5/0,5
Geometrie	a) Raumhöhe > 2,50 m b) Raumhöhe > 2,75 m c) Raumhöhe > 3,00 m	a) 0/0,5 <b>b) 0,75/0,75</b> c) 0/1
	a) Gebäudetiefe: 10,00 m < Tiefe < 16,50 m b) Gebäudetiefe: 11,50 m < Tiefe < 13,50 m	a) 0/0,5 b) 1/1
Erschließung	a) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 600 m <sup>2</sup> b) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 400 m <sup>2</sup>	a) 0/0,5 <b>b) 1/1</b>
	Versorgung	Möglichkeit zur Erweiterung Haustechnischer Anlagen, z. B.: Platzreserven in Technikräumen und Schächten
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4,75/6</b>

### *Nutzungsvielfalt*

Das Gebäude befindet sich in einer zentralen Lage in Berlin. Auf Höhe des Gebäudes Walden 48 befindet sich eine Straßenbahnhaltestelle, welche Verbindungen ins Stadtzentrum (ca. 10 Minuten), Anschlüsse an das U-Bahn-Netz (ca. 10 Minuten) circa sowie eine schnelle Verbindung ans Fernverkehrsnetz (ca. 25 Minuten zum Hauptbahnhof) ermöglicht.

Im direkten Projektumfeld befinden sich zu Fuß erreichbar unter anderem Einkaufsmöglichkeiten für Lebensmittel und Einzelhandel, Gastronomie, Freizeitangebote, Bildungseinrichtungen und Behörden sowie diverse Gewerbe- und Büroimmobilien.

Walden 48 bietet einen breiten Wohnungsspiegel von 2- bis 5-Zimmer-Wohnungen an. Innerhalb des Projektes befindet sich lediglich die Wohnnutzung.

Grundsätzlich wurden nur etwa 40 % der Grundstücksfläche bebaut. Da jedoch die gesamte Grundstücksbreite in Ost-West-Richtung für das Gebäude ausgenutzt wurde ist eine horizontale Erweiterung kaum möglich. Für die Attikakante des Dachgeschosses wurde eine Höhe von circa 22 m nachgemessen [107]. Eine Aufstockung würde daher eine Fußbodenoberkante von knapp unter 22 m einhalten und so keine zusätzlichen Maßnahmen bezüglich des Brandschutzes erfordern [26]. Dies bedeutet aber auch, dass das Potenzial der

vertikalen Erweiterung begrenzt ist. Ob das Tragwerk eine vertikale Erweiterung zulässt, kann nicht überprüft werden.

Tabella 6-46: Walden 48 - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit

<b>Kriterium:</b> Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Standortqualität	Bewertung der öffentlichen Verkehrsanbindung	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld, mind. Wohnen + Büro + Gewerbe + Gastro	1/1
Nutzungsvielfalt	Breiter Wohnungsspiegel mit Wohnungen von 1 bis 4 Zimmern	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Projekts, mind. Wohnen + Büro / Gewerbe / Gastro	0/1
Erweiterbarkeit	Horizontale Erweiterbarkeit durch Reserveflächen	0/1
	Vertikale Erweiterbarkeit	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

#### *Langlebigkeit Holztragwerk*

Alle tragenden Bauteile aus Holz befinden sich innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Während alle tragenden Bauteile des eigenständigen Balkontragwerks mit einer Holzschalung verkleidet sind, um diese vor freier Bewitterung zu schützen [140]. Die vorgehängte Fassade ist ein vom Tragwerk getrenntes Bauteil [138].

Bei der Robustheit des Tragwerks wird wie auch bei den vorhergehenden Projekten davon ausgegangen, dass bei üblicher Bemessung ausreichend Sicherheiten vorhanden sind, um eine lange Lebensdauer zu garantieren. Darüber hinaus sind keine Maßnahmen für zusätzliche Tragreserven bekannt um die Robustheit zu erhöhen, wobei davon auszugehen ist, dass aufgrund der HBV-Decken geringe Senkungen im Bereich der Wand-Decken-Stöße zu erwarten sind. Eine optische Kontrollmöglichkeit der tragenden Bauteile aus Holz ist beim Projekt Walden 48 möglich. So sind die tragenden BSP-Wände höchstens einseitig bekleidet und die Deckenuntersicht bildet stets das sichtbare Brettstapelelement der Holz-Beton-Verbund-Decke.

Tabelle 6-47: Walden 48 - Bewertung Langlebigkeit des Tragwerks

<b>Kriterium:</b> Langlebigkeit des Tragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Witterungsschutz	Keine freie Bewitterung tragender Holzbauteile	1/1
	Alle tragenden Holzbauteile innerhalb der thermischen Gebäudehülle	1/1
Trennung Tragwerk und Gebäudehülle	a) Trennbare Bauteilschichten b) Getrennte Bauteile	a) 0/1 <b>b) 2/2</b>
Robustheit	Tragwerksreserven, Maßnahmen zur Verringerung von Setzungen, etc.	0,5/1
Zugänglichkeit	Einfache optische Kontrollmöglichkeit tragender Bauteile	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

### *Austausch und Reparatur*

Die vertikalen Steigschächte werden aus Trockenbauwänden hergestellt und sind mit geringem Aufwand geschossweise zugänglich. Die bereits angesprochene hohe Anzahl an Steigschächten ermöglicht kurze horizontale Leitungsführungen innerhalb der Wohnung, da so die versorgungsintensiven Sanitär- und Küchenbereiche stets in der Nähe zu einem Versorgungsschacht liegen. Aus dem Grundriss [107] ist zu erkennen, dass die Badezimmer stets direkt an einem Steigschacht gelegen sind. Über die Zugänglichkeit der horizontalen Leitungsführung sind keine Informationen bekannt, außer dass eine Fußbodenheizung in Verbindung mit einem Zementestrich verwendet wird, sodass zumindest hier keine schadensfreie Zugänglichkeit zu Reparaturzwecken möglich ist. Vermutlich erfolgt ein Großteil der horizontalen Leitungsführung, insbesondere für die Elektroleitungen in den Trockenbauwänden beziehungsweise Vorsatzschalen.

Die Außenwandaufbauten der Holztafelbauelemente sind nach Aussage des Architekten größtenteils verschraubt, aber auch Klammern und Nägel kommen vor [141]. Nordseitig ist außenseitig eine Schieferbekleidung auf einer Rauspundschalung vernagelt. Darunter folgen eine Hinterlüftungsebene und eine an den Holzständern der Dämmebene punktuell befestigte Winddichtung [143]. Innenseitig ist eine OSB-Platte auf den Holzständern mechanisch befestigt. Zur Raumseite erfolgt eine Bekleidung mit zweilagigen, mechanisch befestigten Gipskartonfeuerschutzplatten [141, 143]. Die Fassade zur Südseite weist außenseitig eine hinterlüftete Holzschalung auf [139]. Darunter folgt im Gegensatz zur nordseitigen Fassade eine OSB-Platte. Eine weitere OSB-Platte schließt die Ebene der Dämmung und Holzständer innenseitig ab [143]. Auf der Raumseite erfolgt dann eine vor Ort montierte Vorsatzschale mit einer Bekleidung aus Gipskartonfeuerschutzplatten [143]. Diese sind wahrscheinlich verschraubt. Zusammenfassend scheint die Fassadenbekleidung jeweils gut austauschbar zu sein. Auf der Nordseite ist sogar ein sehr einfacher Zugang zur Dämmebene möglich. Von der Innenseite können die OSB-Platten unabhängig von ihrer Befestigung nicht vollständig entfernt werden, da diese teilweise von der Decke und teilweise vom Fußbodenaufbau verdeckt sind. Abhängig von der Konfiguration der Plattengrößen und deren Befestigung sind möglicherweise einzelne Platten herausnehmbar. Positiv muss hervorgehoben werden, dass die Giebelwände aus Stahlbeton nicht mit einem WDV-System verkleidet sind, sondern eine, mechanisch auf dem Beton befestigte Holztafelbaukonstruktion mit Gefachdämmung verwendet wird [143].

Grundsätzlich könnten bei großen Beschädigungen auch Fassadenelemente ausgetauscht werden, auch wenn dies nicht ohne Eingriff in die angrenzenden Sekundärstrukturen wie dem Fußbodenaufbau oder daran anschließenden Wänden möglich wäre. Da die Fassade jedoch nicht tragend ausgeführt ist und geschossweise vorgehängt ist, besteht diese Möglichkeit, anders als bei tragenden Holztafelbauaußenwänden.

Die nicht tragenden Innenwände können entfernt werden. Dabei ist der Rückbau ohne Beschädigung der angrenzenden Decken und Wände möglich. Da die Innenwände jedoch den Fußbodenaufbau durchstoßen und dieser nicht punktuell schadensfrei rückbaubar ist, wird im Falle des Rückbaus der nicht tragenden Innenwände der Fußbodenaufbau beschädigt.

Die Wandoberflächen, welche mit Gipskartonplatten hergestellt werden, können durch eine Erneuerung des Anstrichs leicht instandgehalten werden. Die Sichtholzoberflächen sind hingegen aufwändiger in der Erneuerung. Der Fußbodenbelag aus Parkett kann leicht instandgehalten oder repariert werden.

Tabelle 6-48: Walden 48 – Bewertung von Austausch und Reparatur der Haustechnik, der Gebäudehülle und des Ausbaus

<b>Kriterium:</b> Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Haustechnik	Zugänglichkeit der vertikalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Minimierung der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Zugänglichkeit der horizontalen Versorgungsleitungen	0,25/0,5
Gebäudehülle und Sekundärstruktur	Austausch einzelner Komponenten der Fassade durch schadensfreie Lösbarkeit und Zugänglichkeit	0,5/1
	Schadensfreie Lösbarkeit ganzer Fassadenelemente	0,5/0,5
	Rückbaubare Innenwandaufbauten (nicht tragend) ohne Beschädigung benachbarter Bauteile	0,5/1
	a) Schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten b) Punktuell schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten	a) 0/0,5 b) 0/1
Oberflächen	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Wand), z. B.: durch Anstrich	0,25/0,5
	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Bodenbelag), z. B.: durch trocken verlegtes Parkett	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

#### 6.4.4. Analyse- Re-Use & Recycle

##### *Wiederverwendungspotenzial*

Das Tragwerk von Walden 48 besteht oberirdisch aus den tragenden Schottenwänden aus BSP in einem Achsraster von 7,20 m, den einachsrig dazwischen gespannten Holz-Beton-

Verbunddecken, den Erschließungskernen sowie den beiden Giebelwänden aus Stahlbeton [140]. Im Erdgeschoss werden die Schottenwände nicht über die gesamte Gebäudetiefe geführt. Um im Erdgeschoss auf der nördlichen Gebäudeseite einen offenen Eingangsbereich zu schaffen, werden die Tragachsen hier durch Abfangträger aus Stahl auf Baubuche-Stützen ergänzt (siehe Abbildung 6-15) [140]. Da sich die Bauteile innerhalb des Geschosses wiederholen und auch in den Regelgeschossen fast ident sind (siehe Abbildung 6-14)[107], kann man von einer Reduktion der Bauteiltypen sprechen. In Verbindung mit den großen Spannweiten der Decken und der Reduktion tragender Innenwände kann man auch eine Reduktion der Anzahl tragender Bauteile erkennen [140].

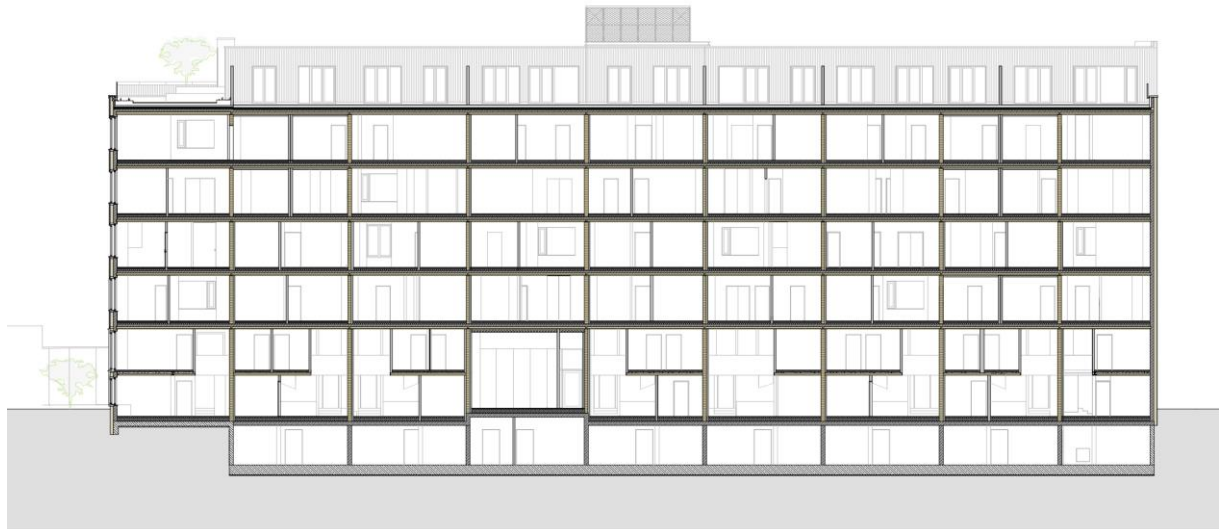


Abbildung 6-14: Walden 48 - Längsschnitt (aus [107])

Durch die Schottenbauweise mit einer nicht tragenden, vorgehängten Fassade ist die Tragstruktur im Projekt Walden 48 klar von der Gebäudehülle getrennt. Auch die größtenteils nicht tragenden und in trockenbauweise errichteten Innenwände sind klar vom Tragwerk getrennt [140].

Bei der Beurteilung der Nachvollziehbarkeit der Belastung werden Sprünge, Auskragungen, BSP-Elemente mit Öffnungen sowie Verbundbauteile kritisch gesehen, da sie die Beurteilung der Tragfähigkeit tragenden Bauteile im Falle einer potentiellen Wiederverwendung erschweren (siehe Kapitel 5.5.4). Obwohl beim Projekt Walden 48 die vertikale Lastableitung mittels stets übereinander liegender Bauteile erfolgt (siehe Abbildung 6-14), ergibt sich aus den verwendeten Bauteilen (BSP-Wände, Holz-Beton-Verbunddecken) und der Auskragung des Gebäudes (siehe Abbildung 6-15), dass die Nachvollziehbarkeit der Belastung zur Beurteilung der Tragfähigkeit erschwert wird.

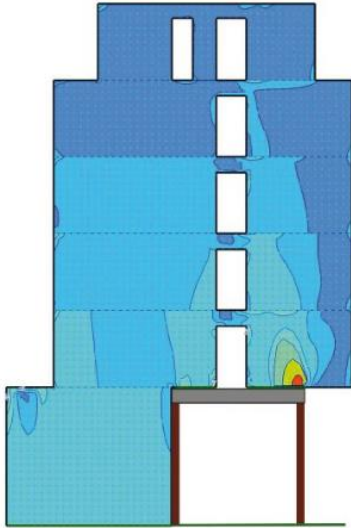


Abbildung 6-15: Walden 48 - Querschnitt Tragwerk (aus [144])

Die tragenden Wände sowie die vorgehängte Gebäudehülle bestehen aus modularen Fertigteilen in Holztafelbau- beziehungsweise Massivholzbauweise [135]. Diese können per LKW transportiert und mittels Hochbau- oder Autokran gehoben werden. Durch die Herstellung der Holz-Beton-Verbund-Decke mit einer Aufbetonschicht aus Ortbeton [140] liegt im Bereich der Decke keine Modularität vor, ebenso wie bei den Wänden des Erschließungskerns und den Giebelwänden aus Stahlbeton.

Die Nutzungsneutralität liegt für die nicht tragende Fassade vor, welche angepasst, umgebaut und wiederverwendet werden kann. Die mit wenigen oder gar keinen Durchbrüchen versehenen Schottenwände aus BSP weisen auch eine hohe Nutzungsneutralität auf und können vielfältig als tragendes Bauelement wiederverwendet werden [95]. Sämtliche Bauteile oder Verbundbauteile aus bewehrtem Ortbeton lassen sich nicht als nutzungsneutral einordnen [98].

Durch das regelmäßige Gebäuderaster von 7,2 m verfügt auch die Fassade über ein regelmäßiges Fensterraster [135] und kann mit standardisierten Elementen hergestellt werden. In diesem Zuge wird auch der Aufbau der vorgestellten Balkone als eigenständige und regelmäßige Konstruktion [140] positiv hervorgehoben. Auch die eingesetzten Schottenwände haben ähnliche Abmessungen und wiederholen sich geschossweise [107], sodass gleiche beziehungsweise ähnliche Bauteile häufig vorkommen. Wie auch bei der Nutzungsneutralität können jedoch Bauteile, die in Ortbetonbauweise gefertigt werden, wie die Holz-Beton-Verbunddecke [140], nicht als standardisiert angesehen werden [98].



Tabelle 6-49: Walden 48 – Bewertung des Wiederverwendungspotenzials

Kriterium: Wiederverwendungspotenzial		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Einfachheit der Konstruktion	Reduktion tragender Bauteile und Bauteiltypen	1/1
	Klare Trennung des Tragwerks von Sekundär- und Tertiärstruktur	1/1
	Nachvollziehbarkeit der Belastung tragender Bauteile	0/1
Modularität und Standardisierung	Modulare Bauweise, Vorfertigung und Leichtigkeit der Elemente	0,5/1
	Nutzungsneutrale tragende Bauteile	0,5/1
	Standardisierte Raster und Bauteile	0,5/1
Gesamtbewertung		3,5/6

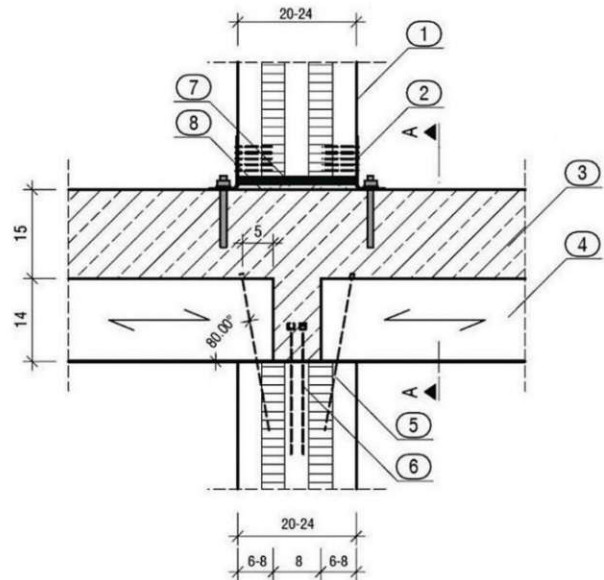
#### *Demontierbare Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauteilen*

Zum Erreichen der Bauteilverbindungen müssen die im Zuge des Ausbaus errichteten Schichten, welche die Verbindungsmittel verdecken, rückgebaut werden. Beim Projekt Walden 48 betrifft dies vor allem die Vorsatzschalen und Bekleidungen im Wandbereich sowie den Fußbodenaufbau beziehungsweise den Dachaufbau. Die Wandbekleidungen wurden bereits behandelt. Es handelt sich um vor Ort angebrachte Gipskartonbekleidungen, welche auf Profile geschraubt werden und prinzipiell wieder lösbar sind. Jedoch ist eine Beschädigung der Platten wahrscheinlich, da die Schraubenköpfe im Zuge des Ausmalens verdeckt werden [26]. Im Fußbodenaufbau ist ein gegossener Estrich mit Fußbodenheizung vorhanden. Dieser muss herausgeschnitten werden, sodass es zu einem zeit- und kostenintensiven Rückbau kommt [21]. Dennoch ist ein Rückbau des Fußbodenaufbaus möglich, ohne das tragende Bauelement zu beschädigen. Die beim Projekt Walden 48 eingesetzte Holz-Beton-Verbunddecke stellt einen Sonderfall dar, da für die Erreichbarkeit aller Verbindungsmittel auch der Rückbau der Aufbetonschicht gegeben sein muss. Dieser ist wahrscheinlich nicht ohne Beschädigung der angrenzenden Bauteile und Bauelemente möglich, sodass sämtliche Verbindungen im Decke-Wand-Stoß nicht erreichbar sind. Der Dachaufbau erfolgt im Bereich Dachgeschoss-Terrasse auf der Holzbetonverbunddecke und besteht aus einer Abdichtungsbahn, darüber Schaumglasdämmung und einer weiteren Abdichtungsbahn [143]. Im Dachbereich über dem Staffelgeschoss besteht dieses aus einer BSP-Decke mit einer Abdichtungsbahn, darüber eine Aufdachdämmung aus Mineralwolle, gefolgt von einer weiteren Abdichtungsbahn. Darüber erfolgt jeweils der entsprechende Dachbelag. Das Dachabdichtungssystem besteht aus FPO-Abdichtungsbahnen [107]. Zu den Verbindungen der einzelnen Schichten gibt es keine spezifischen Angaben. Da nach Aussage des Architekten jedoch innerhalb der Bauteilaufbauten keine verklebten Verbindungen vorkommen [141], wird davon ausgegangen, dass es sich um trocken verlegte und mechanisch oder durch Auflast befestigte Bauteilschichten handelt.

Die Positionierung der Verbindungsmittel im Sockelbereich der Wand wird als deutlich besser bewertet als die Positionierung der Verbindungsmittel am oberen Rand der Wand. Im Sockelbereich sind die Verbindungen nach dem Rückbau des Fußbodenaufbaus erreichbar, während sie am oberen Rand von der Aufbetonschicht der Verbunddecke verdeckt sind (siehe Abbildung 6-16). Dies gilt für die Knoten mit tragenden Wänden. Die Befestigung der Fassade erfolgt nach der Deckenbetonage, sodass auch die Verbindungsmittel am oberen Rand später zugänglich sind.



Abbildung 6-16: Walden 48 - Wand-Decke-Wand-Stoß (aus [140])



In Abbildung 6-16 ist der Wand-Decke-Wand-Stoß einer tragenden Schottenwand zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Wände im Sockelbereich mit Winkeln auf der Holzbetonverbunddecke befestigt sind. Dieser Winkel ist mit wenigen Verbindungsmitteln im Beton befestigt. Nach Abbildung 6-16 scheint es sich dabei um einen Bolzenanker oder Ähnliches zu handeln, welcher ein Gewinde besitzt. Die Verbindung zum Winkel wird mit einer Mutter hergestellt, sodass sich der ganze Winkel schadensfrei von der Betondecke lösen lässt. Am oberen Rand der Wand werden die Brettstapelelemente der Verbunddecke mit der BSP-Wand verschraubt (siehe Abbildung 6-16), die Lücke zwischen den Holzdeckenelementen wird mit Beton verfüllt, der Verbund zwischen Wand und Aufbeton wird über die Schrauben hergestellt (siehe Abbildung 6-16) [140]. Daraus ergibt sich, dass die Verschraubungen kaum zu erreichen sind und durch den vollständigen Umschluss des Betons nicht mehr herausdrehbar sind, sodass der obere Rand des Knotens nur unter Beschädigung der Bauteile demontierbar ist.

Für die Fassade wird angenommen, dass im Sockelbereich eine ähnliche Verbindung wie beim Innenwandknoten zur Anwendung kommt. Da die Fassadenelemente erst nach der Betonage angebracht werden, wird angenommen, dass am oberen Rand der Fassadenelemente eine mechanische Verbindung genutzt wird, sodass ein schadensfreier Rückbau möglich ist.

Der Aufzugsschacht aus BSP wird schadensfrei lösbar an den Stahlbetonwänden des Erschließungskerns befestigt. Hier kommen einbetonierte Ankerschienen mit einem Aufsatz für ein Stahlprofil zum Einsatz. Das Stahlprofil ist in die BSP-Elemente eingelassen und mit selbigen verschraubt. Die Verbindung zwischen Stahlprofil und Ankerschiene erfolgt mittels Gewindestange und Mutter [140]. Ebenso wird die eigenständig tragende und punktuell zur Aussteifung befestigte Balkonstruktur als schadensfrei rückbaubar angesehen.

Zusammenfassend ist die Trennbarkeit der Bauteilverbindungen im Bereich der Fassade und des Treppenhauses gut gelöst und eine größtenteils schadensfreie Demontage wahrscheinlich möglich. Die Verbindungen zwischen den tragenden Bauteilen sind aufgrund des formschlüssigen, aus Beton hergestellten Wand-Decken-Knotens nicht schadensfrei lösbar. Die Stahlbetonwände im Bereich der Giebel und der Kerne können auch nicht demontiert werden. Die Trennbarkeit der gewählten Verbindungen wird insgesamt als teilweise schadensfrei lösbar eingestuft.

Durch die vollständig formschlüssige Verbindung zwischen der Holzbetonverbunddecke und den tragenden Schottenwänden sowie die für gewöhnlich hohe Anzahl an Verbindungsmitteln zur Schubkraftübertragung im Sockelbereich der aussteifenden Wände wird keine Reduktion von Verbindungsmitteln festgestellt. Hinzu kommt, dass durch den Einsatz von Verbunddecken der Rückbau nicht mehr mit einfachen Geräten möglich ist, sondern schwere Geräte zum Abbruch der Aufbetonschicht notwendig sind.

Tabelle 6-50: Walden 48 – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Demontierbarkeit der Bauteile		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Erreichbarkeit der Verbindungen	Rückbaubarkeit des Ausbaus und der der Sekundärstruktur	0,5/1
	Positionierung der Verbindungsmittel	0,5/1
Trennbarkeit der Verbindungsmittel	a) Teilweise schadensfrei lösbare Verbindungen b) Größtenteils schadensfrei lösbare und wiederverwendbare Verbindungen	a) 1/1 b) 0/2,5
Reduktion des Rückbauaufwands	Reduktion der Verbindungsmittelanzahl	0/1
	Rückbau mit einfachen Geräten möglich	0/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>2/6</b>

#### *Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils*

Bis auf die Holz-Beton-Verbunddecke wurden die Verbindungen zwischen den Komponenten der Bauteile stets mechanisch ausgeführt, wobei hier teilweise Klammern und Nägel verwendet werden [141]. Diese können beim Zerlegen des Bauteils zu Beschädigungen an den Komponenten führen. Die verschraubten Bekleidungen der Vorsatzschalen und leichten Innenwände können häufig aufgrund der verdeckten Schraubköpfe nicht schadensfrei gelöst werden. Innerhalb des Bodenaufbaus ist zunächst der Heizstrich nur unter Beschädigung auszubauen, wobei auch die Trittschalldämmung beschädigt wird. Aufgrund des Verbundes zwischen dem Beton und den Brettstapelelementen mit Kerven und teilweise eingedrehten Tellerkopfschrauben [140] sind die Brettstapelelemente nicht ohne Beschädigung vom Aufbeton zu trennen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verbindungen zwischen den Komponenten häufig nicht schadensfrei lösbar sind. Hier macht die Verbunddecke einen Großteil aus, doch auch genagelte und geklammerte Verbindungen in anderen Bauteilen können die Zerlegbarkeit der Bauteile deutlich erschweren. Positiv sticht hervor, dass die Wärmedämmung der Giebelwände aus Stahlbeton nicht mit WDV-System

erfolgt, sondern mit einer mechanisch befestigten, vorgesetzten Holzständerkonstruktion [143].

Im Bereich der tragenden Innenwände können die Bauteilschichten stark reduziert werden. So werden diese innerhalb einer Nutzungseinheit gar nicht und zwischen zwei Nutzungseinheiten lediglich einseitig bekleidet [135, 138, 140]. Auch die Dachaufbauten weisen einfache Aufbauten auf. So kommt das Dach über dem Staffelgeschoss mit vier Bauteilschichten aus [143]. Demgegenüber steht ein vielschichtiger Aufbau der Verbunddecke.

Die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel im Bereich der Außenwände sollte insbesondere bei der südseitigen Fassade mit innenliegender Vorsatzschale und außen angebrachter Holzschalung gut sein. Die Fußboden- und Dachaufbauten sind größtenteils lose verlegt und ermöglichen so einen schichtweisen Rückbau von Oben. Die Verbindungsmittel zwischen dem Brettstapelelement und der Betonschicht der Decken sind vollständig vom Beton verdeckt [140] und somit nicht zu erreichen. Die Tellerkopfschrauben in der Holz-Beton-Verbunddecke sind in hoher Anzahl vorhanden. Bei den sonstigen Verbindungsmitteln zwischen den Bauteilschichten handelt es sich um gewöhnliche mechanische Verbindungsmittel wie Nägel, Klammern und Schrauben. Dafür wird von einer gewöhnlichen Anzahl ausgegangen.

Grundsätzlich gelten BSP-Elemente als nutzungsneutrale Bauelemente, die Schottenwände werden aufgrund des, nicht schadensfrei lösbaren Knotendetails am oberen Rand, unter Abstrichen als nutzungsneutrales Bauelement bewertet. Die Bauelemente des Balkontragwerks sind grundsätzlich auch nutzungsneutral. Hier muss jedoch die Wiederverwendung unter dem Gesichtspunkt der Verwitterung kritisch betrachtet werden. Im Bereich der Fassade sind wenige nutzungsneutrale, hochwertige Komponenten verbaut, da die Fassade keine Tragfunktion besitzt. Hier ist im Falle einer Zerlegung eher mit einer Kaskadennutzung als mit einer Wiederverwendung auf Komponentenebene zu rechnen. Die Bauelemente der Verbunddecke eignen sich nicht zur Wiederverwendung, da sie nur unter großem Schaden getrennt werden können.

*Tabelle 6-51: Walden 48 – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile*

<b>Kriterium:</b>		
Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Verbindungen zwischen Komponenten	Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen	0,5/2
	Reduktion der Bauteilschichten	0,5/1
	Gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel	0,5/1
	Geringe Anzahl der Verbindungsmittel	0/1
Wiederverwendungspotenzial	Nutzungsneutrale Bauelemente und Komponenten	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>2/6</b>

### *Informationsverfügbarkeit*

Für das Projekt Walden 48 wurde nach Aussage des Architekten kein digitaler Zwilling erstellt beziehungsweise keine BIM-Dokumentation des Ist-Zustandes durchgeführt. Folglich besteht auch kein materieller Gebäudepass [141]. In der Planung wurde auf die Trennbarkeit der

Verbindungen geachtet. Durch einen Fokus auf die Optimierung der Bauzeit wurde jedoch die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel nachrangig betrachtet [141], sodass kein vollständiges Demontagekonzept besteht. Es wurden keine Prüfkörper zur Validierung der Rückbaubarkeit erstellt [141].

Tabelle 6-52: Bikes & Rails – Bewertung Informationsverfügbarkeit

Kriterium: Informationsverfügbarkeit		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Digitales Gebäudemodell	BIM-Modell – Digitaler Zwilling	0/2
	Erfassung in Bauteildatenbank zur Wiederverwendung	0/1
Rückbaukonzept	Rückbau- und Demontagekonzept	1/2
	Mock-Up / Prüfkörper zur Erprobung von Rückbauszenarien	0/1
Gesamtbewertung		1/6

### Materialrecycling

Das Holztragwerk besteht aus den BSP-Schottenwänden sowie den Holz-Beton-Verbund-Decken mit Brettstapelelementen. Die BSP-Elemente der Schottenwände weisen ein gutes Wiederverwendungspotenzial auf, allerdings ist die schadensfreie Demontierbarkeit nicht gegeben. Dennoch sollte für dieses Bauteil primär eine Wiederverwendung angestrebt werden und ein Materialrecycling erst nachrangig in Betracht gezogen werden. Da die Brettstapelelemente der Verbunddecke nur unter großer Beschädigung vom Beton getrennt werden können, ist hier ein hochwertiges Materialrecycling in Form einer Kaskadennutzung anzustreben. Beide Bauelemente weisen einen Klebstoffanteil auf. Dieser ist zunächst für die Kaskadennutzung nicht hinderlich und ermöglicht die Herstellung von Spanplatten oder Ähnlichem [21]. Im Falle einer Kompostierung ist der Klebstoffanteil jedoch nachteilig, somit bleibt eine thermische Verwertung [21]. Aufgrund des flächigen Verbunds mit dem Aufbeton und der hohen Anzahl eingedrehter Schrauben ist die sortenreine Trennung der Brettstapelelemente vom Beton aufwändig. Der Betonabbruch muss weiter von sämtlichen Stahlkomponenten getrennt werden. Da innerhalb des Fußbodenaufbaus keine Schichten mit dem Beton verklebt werden, kann dieser größtenteils sortenrein zurückgewonnen werden und eignet sich für einen Einsatz als Altbetonbruch in der Herstellung von Recyclingbeton [50]. Der Bewehrungsstahl lässt sich in einem geschlossenen Kreislauf mit gleichbleibender Qualität wiederverwerten [50].

Im Aufbau der Außenwände wird auf vollflächige Verklebungen verzichtet [141], sodass eine sortenreine Zerlegung möglich ist. Die raumseitige Gipskartonbekleidung weist ein hohes Recyclingpotenzial auf, dieses wird jedoch noch nicht praktiziert [26]. Die darunterliegenden OSB-Platten können für die Herstellung anderer Holzwerkstoffplatten [145] sowie für die thermische Verwertung genutzt werden. Aufgrund des Klebstoffanteils ist eine Kompostierung nicht möglich. Die Komponenten des Holzständerwerkes sind aus Vollholz und können sowohl einer Kaskadennutzung mit anschließender thermischer Verwertung als auch einer Kompostierung zugeführt werden. Die eingesetzte Holzweichfaserdämmung lässt im Gegensatz zu mineralischen Dämmstoffen eine Kompostierung oder thermische Verwertung

zu [21]. Außenseitig befindet sich auf der Südseite eine weitere Bekleidung aus OSB-Platten, gefolgt von einer Hinterlüftungsebene und einer Schalung aus unbehandeltem Lärchenholz [139]. Für die Konstruktionen der Hinterlüftungsebene und der Schalung sind aufgrund der Klebstofffreiheit eine direkte Kompostierung oder eine Kaskadennutzung mit anschließender thermischer Verwertung möglich. Auf der Nordseite folgt außenseitig auf die Dämmebene eine punktuell befestigte Winddichtungsbahn, sodass eine sortenreine Trennung möglich ist, darüber eine belüftete Ebene und eine Rauspundschalung als Unterkonstruktion für die Schieferbekleidung. Während sich die Unterkonstruktion aus unbehandeltem, klebstofffreiem Holz kompostieren oder nach einer Kaskadennutzung thermisch verwerten lässt, ist die Natursteinbekleidung, sofern diese schadensfrei rückgebaut wird, für eine Wiederverwendung geeignet [21]. Treten beim Rückbau Beschädigungen an den Natursteinen auf, so bleiben lediglich minderwertige Verwertungsszenarien [21].

Das Tragwerk des Dachaufbaus im Bereich der Dachterrassen entspricht dem der Verbunddecke [143]. Darüber befinden sich eine Abdichtung, eine Schaumglasdämmung und eine weitere Abdichtung [143]. Die Schaumglasdämmung ist sehr robust und lässt sich wiederverwenden. Der Dachaufbau über dem Dachgeschoss besteht aus einer reinen Holzdecke. Darauf folgen eine Abdichtungsbahn, eine Mineralwolle dämmung und eine weitere Abdichtungsbahn [143]. Bei der angenommenen Befestigung der Abdichtungsbahnen ohne Verklebung [141] lässt sich insbesondere die Schaumglasdämmung wiederverwenden [21]. Die Mineralwolle dämmung kann theoretisch wiederverwertet werden, dies wird zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht praktiziert [21].

Die Innenwandaufbauten sind sortenrein trennbar. Hier kommen Gipskartonplatten und Metallprofile sowie im Bereich der Wohnungstrennwände Mineralwolle dämmungen zum Einsatz. Es gilt, wie auch bei dem Projekt Bikes & Rails, dass ein Recycling möglich ist, aber nicht praktiziert wird. Der Fußbodenaufbau entspricht im Prinzip dem im Projekt Bikes & Rails. Beim Estrich treten Probleme bei der Trennbarkeit der Heizungsrohre und der Trennfolie auf, sodass dieser nicht sortenrein rückgebaut werden kann. Die Trittschalldämmung wird beim Ausbau beschädigt, liegt jedoch sortenrein vor. Die Schüttung ist sortenrein und kann wiederverwendet werden.

*Tabelle 6-53: Walden 48 – Bewertung Materialrecycling*

<b>Kriterium:</b>		
Materialrecycling		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Recyclingfähigkeit Tragwerk	Tragende Bauteile und Bauteilelemente	1/2
Recyclingfähigkeit Gebäudehülle	Fassade	1/1
	Dachaufbau	1/1
Recyclingfähigkeit Ausbau	Innenwand	0,5/1
	Boden	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4/6</b>

#### 6.4.5. Auswertung Walden 48

Die Referenzanalyse zeigt, dass das Gebäude Walden 48 im Themenfeld Reduce besonders gut beim Flächenverbrauch sowie bei der Verwendung ökologischer Baustoffe außerhalb des Tragwerks abschneidet. Durch die nicht tragend ausgeführte Fassade kann dort eine Holzfaserdämmung eingesetzt werden. Zudem sind die tragenden Bauteile auf Abbrand bemessen, sodass teilweise auf Brandschutzbekleidungen verzichtet werden kann. Durch den Einsatz von Hybriddecken sowie Giebelwänden und Kernen aus Stahlbeton kann das Gebäude bei der Reduktion des Stahlbetonteils keine gute oder sehr gute Bewertung erzielen. Durch die Schottenbauweise aus BSP werden auch bei der Ressourceneffizienz des Holztragwerks keine sehr guten Bewertungen erzielt.

Im Themenfeld Long-Use erzielt Walden 48 gute bis sehr gute Bewertungen. Durch flexible Grundrisse innerhalb der Einheiten und die Möglichkeit, Einheiten zu verkleinern oder zu vergrößern, sowie die lichte Raumhöhe von 2,80 m ist das Gebäude für Umnutzungen innerhalb derselben, als auch einer anderen Nutzung geeignet. Darüber hinaus wird die Langlebigkeit des Holztragwerks durch die strikte Trennung des Tragwerks von der Gebäudehülle und die Sichtoberflächen der tragenden Holzbauteile als sehr positiv bewertet. Im Themenfeld Re-Use und Recycle fällt auf, dass die Hybriddecke mit den nicht schadensfrei trennbaren Bauteilverbindungen im Wand-Decken-Knoten die Bewertungen in den Kriterien zur Wiederverwendung negativ beeinflusst. Positiv hervorgehoben werden die schadensfreie Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Fassade. Der Einsatz alternativer ökologischer Baustoffe macht sich auch in der Bewertung der Recyclingfähigkeit positiv bemerkbar.

Table 6-54: Walden 48 - Auswertung

Walden 48		
<b>1. Reduce</b>		
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	4,5
	1.1.2. Nutzungsdichte	4
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	0
	1.2.2. Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung	2
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	3
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	4
<b>2. Long-Use</b>		
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	5
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	4,75
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	3,5
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	5,5
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	3,5
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>		
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	3,5
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	2
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	2
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit	1
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling	4

#### 6.5. Lessons-Learned

Im folgenden Abschnitt findet eine Auswertung und Einordnung der Referenzgebäude statt. Dafür werden die Ergebnisse der Referenzgebäude in den drei Themenfeldern „Reduce“, „Long-Use“ und „Re-Use & Recycle“ jeweils miteinander verglichen. In Tabelle 6-55 sind die Bewertungen der Referenzgebäude gegenübergestellt.

Tabelle 6-55: Gegenüberstellung der Referenzgebäude

Themenfelder / Kriteriengruppen	Kriterien	Haus des Holzes	Bikes & Rails	Walden 48
<b>1. Reduce</b>				
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	3,5	5	4,5
	1.1.2. Nutzungsdichte	2	5,5	4
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	0	0	0
	1.2.2. Reduktion des Stahlbetonteils in Tragwerk und Gründung	3	1	2
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	5,5	3	3
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	4,75	2	4
<b>2. Long-Use</b>				
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	5	4,5	5
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	5,5	4	4,75
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	3,5	4	3,5
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	4,5	3,5	5,5
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	5,25	3,5	3,5
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>				
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	5,5	4	3,5
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	5,5	3	2
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	5	3,5	2
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit	5	3	1
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling	4	3,5	4

### 6.5.1. Gegenüberstellung Reduce

In der Kriteriengruppe 1.1 Flächenverbrauch (siehe Tabelle 6-55) ist zu erkennen, dass das Haus des Holzes im Vergleich zu den anderen Referenzgebäuden deutlich schlechter abschneidet. Dies liegt vor allem an der teilweise fehlenden baulichen Vornutzung und dem Bestandsabbruch, wobei eine Weiternutzung nicht möglich gewesen zu sein scheint. Bei der Nutzungsdichte spielen insbesondere die Wohnungsgröße sowie das Angebot kleiner Wohnungen eine entscheidende Rolle, sodass das Projekt Bikes & Rails mit dem Ziel des leistbaren Wohnraums hier besonders gut abschneiden kann.

In der Kriteriengruppe 1.2 Ressourcenschonender Materialeinsatz (siehe Tabelle 6-55) fällt zunächst auf, dass bei keinem der Referenzgebäude Bestandsnutzung- oder eine Bauteilwiederverwendung stattgefunden hat. In Anbetracht der in Kapitel 4.5.7 besprochenen rechtlichen Unsicherheiten bezüglich der Bauteilwiederverwendung und des Mangels an wiederverwendbaren Bauteilen aus dem Bestandsabbruch ist dies erwartbar. Das Vorhandensein eines nutzbaren Bestandes an den Bauplätzen hätte diese Bewertung positiv beeinflussen können.

Bei der Reduktion des Stahlbetonteils fallen große Unterschiede zwischen dem Haus des Holzes und den anderen Referenzgebäuden auf. Dies ist auf die Bestrebung der Bauherren des Haus des Holzes zurückzuführen, das gesamte oberirdische Tragwerk ohne Stahlbeton zu bauen, während Bikes & Rails ein Stahlbeton-Erdgeschoss und -Treppenhaus nutzt und beim Projekt Walden 48 Holz-Beton-Verbunddecken sowie Giebelwände und Treppenhauswände aus Stahlbeton verwendet werden. Hier sind vor allem Kosten sowie unterschiedliche Schwerpunktsetzungen entscheidend. So wurden beim Haus des Holzes trotz großer Spannweiten reine Holzdecken verwendet, während beim Projekt Walden 48 bei ähnlichen Spannweiten unter anderem aus Kostengründen Holz-Beton-Verbunddecken verwendet werden [146]. Beim Projekt Bikes & Rails wird der Beton im Erdgeschoss sowie in der Erschließung des Gebäudes eingesetzt. Der Beton bringt neben den brandschützenden Eigenschaften auch Speichermasse für die passive Solarnutzung und Kühlung mit sich.

Bei der Ressourceneffizienz des Holztragwerks schneidet das Haus des Holzes mit einem Skelettragwerk in der Mittelachse, Holztafelbauwänden im Fassadenbereich und



Rippendecken besonders gut ab, während der Einsatz von BSP-Wänden und BSP-Decken beziehungsweise Holz-Beton-Verbund-Decken in den Projekten Bikes & Rails und Walden 48 für die schlechtere Bewertung der Ressourceneffizienz im Holztragwerk verantwortlich ist.

Beim Einsatz ökologischer Baustoffe fallen beim Haus des Holzes besonders die vollständig aus Holz gefertigten Fußbodenaufbauten sowie die Wandbekleidungen aus Holz auf, während beim Projekt Walden 48 die Sichtholzoberflächen der tragenden Wände und Decken sowie die Holzfaserdämmung der nicht tragenden Fassade einen besonders positiven Einfluss haben. Beim Einsatz ökologischer Baustoffe fallen besonders die Brandschutzanforderungen auf, welche im Bereich der Gebäudeklasse 4 und 5 den Einsatz biogener, brennbarer Werkstoffe erschweren und den Einsatz von Gipsbekleidungen und Mineralwollgedämmstoffen erfordern.

#### 6.5.2. Gegenüberstellung Long-Use

In der Kriteriengruppe 2.1 Flexibilität (siehe Tabelle 6-55) schneiden alle drei Referenzgebäude gut bis sehr gut ab, wobei das Haus des Holzes bei der Umnutzung aufgrund des Skeletttragwerks und des Verzichts auf tragende Innenwände sowie des punktuell rückbaubaren Bodenaufbaus leicht besser bewertet wird. Dennoch weisen auch die Projekte mit tragenden Innenwänden große Flexibilität auf. Besonders bemerkenswert ist dabei, dass im Projekt Walden 48 die Flexibilität mit einer Schottenbauweise erreicht wird. Bei der Nutzungsvielfalt schneidet das Projekt Bikes & Rails aufgrund der vielseitigen Gemeinschaftsflächen sehr gut ab.

Bei der Kriteriengruppe 2.2 Langlebigkeit (siehe Tabelle 6-55) ist das gute Abschneiden von Walden 48 unter anderem darauf zurückzuführen, dass eine vollständige Trennung zwischen Hülle und Tragwerk stattfindet, während bei den anderen Projekten tragende Holztafelbaufassaden genutzt werden. Zudem ist durch die zumindest einseitige Sichtholzoberfläche der tragenden Bauteile beim Projekt Walden 48 eine einfache Sichtkontrolle aller tragenden Bauteile möglich. Im Haus des Holzes ist diese Kontrollmöglichkeit zumindest für das Skeletttragwerk der Mittelachse gegeben, während eine Sichtkontrolle tragender Bauteile beim Projekt Bikes & Rails nur im Bereich der Deckenunterseite möglich ist.

Bei der Reparaturfähigkeit schneidet das Haus des Holzes besonders gut ab. Dafür sind vor allem der punktuell rückbaubare Fußbodenaufbau sowie die Wandkonstruktion mit einer Kernschicht und beidseitig austauschbaren, geschraubten Bekleidungen verantwortlich. In den Projekten Bikes & Rails und Walden 48 wird zwar auf Verklebungen verzichtet, nicht jedoch auf Klammern und Nägel. Zudem wird jeweils ein Heizestrich Fußbodenaufbau verwendet. Bei allen Projekten scheint die Haustechnik größtenteils gut zugänglich zu sein. Die Technischächte werden stets in Trockenbauweise hergestellt und sind geschossweise zugänglich. Die Projekte Walden 48 und Haus des Holzes verkürzen die horizontalen Leitungswege durch die Anordnung mehrerer Schächte pro Einheit.

#### 6.5.3. Gegenüberstellung Re-Use & Recycle

Besonders im Themenfeld „Long-Use“ haben alle Referenzgebäude ähnlich gut abgeschnitten. Bei der Betrachtung des Themenfeldes „Re-Use & Recycle“ hingegen fällt auf, dass hier die größten Unterschiede zwischen den Gebäuden auftreten. Zunächst ist zu erkennen, dass das Wiederverwendungspotenzial aller drei Gebäude gut bis sehr gut ausfällt. Die Messgrößen dazu sollen das in Kapitel 4.5.5 beschriebene simple Gebäudedesign bewerten, wobei es vor allem um die Reduktion der Bauteile und Bauteiltypen, nachvollziehbare Belastungen und Lastpfade, den Vorfertigungsgrad, die Modularität und Standardisierung geht. Das bessere

Abschneiden des Haus des Holzes ist dabei auf den Verzicht auf Ortbetonbauteile in den Obergeschossen zurückzuführen. Die Holzbauteile aller drei Gebäude spiegeln die Prinzipien des simplen Gebäudedesigns sehr gut wider, jedoch kann der eingesetzte Ortbeton bei den Projekten Walden 48 und Bikes & Rails nicht als modular, standardisiert, vorgefertigt und nutzungsneutral beurteilt werden.

Bei den folgenden Kriterien der Demontierbarkeit der Bauteile und der Zerlegbarkeit der Bauteile kann das Haus des Holzes durch die Wahl lösbarer Knotendetails im Bereich der Aussteifung mittels Kontaktverzahnung der BSP-Elemente oder Schubverbindern aus Hartholz positiv hervorstechen. Verschraubungen finden größtenteils nur zur Lagesicherung statt und sind somit als lösbar anzusehen. Auf ausgenagelte Winkelverbindungen oder Ähnliches wird verzichtet. Auch die Zerlegbarkeit ist aufgrund des Verzichts auf Nägel und Klammern sehr gut zu bewerten. Hier fällt der Unterschied in der Herangehensweise an die Planung der Gebäude besonders ins Gewicht. Während beim Haus des Holzes zum Teil neue Bauteilverbindungen mit dem Ziel der Rückbaubarkeit entwickelt wurden, sind bei den anderen Referenzobjekten keine lösbaren Bauteilknoten eingesetzt worden. Beim Projekt Bikes & Rails erschweren vor allem der Einsatz von Nagelverbindungen und die hohe Anzahl an Verbindungsmitteln die Demontage. Das Projekt Walden 48 hat einige Punkte lösbar geplant, so etwa die nachträglich vorgehängten Fassaden, welche positiv auffallen. Auch der Sockelanschluss der tragenden Wände ist lösbar ausgeführt. Am oberen Rand wird die Wand jedoch nicht schadensfrei lösbar mit der Ortbetondecke verbunden, sodass das gesamte Tragwerk aufgrund eines Knotendetails nicht mehr schadensfrei rückbaubar ist.

Bei der Informationsverfügbarkeit sind beim Haus des Holzes die konsequente BIM-Planung sowie die Erstellung von Prüfkörpern zur Validierung des Rückbaukonzepts sehr positiv zu bewerten. Auch hier ist wieder zu erkennen, dass bei der Planung ein großer Fokus auf der Rückbaubarkeit lag und Entwicklungsarbeit und Kosten in Kauf genommen wurden, um diese umzusetzen.

Aufgrund der sortenreinen Trennbarkeit, die alle Gebäude durch den Verzicht auf Verklebungen gewährleisten, fällt die Bewertung des Materialrecyclings aller drei Gebäude relativ ähnlich aus. Das Haus des Holzes kann hier leichte Vorteile aufgrund des Fußbodenaufbaus erzielen, welcher den Zementestrich durch Buchenholzriemen ersetzt. Im Projekt Walden 48 gelten durch die nicht tragende Ausführung der Fassade geringere Brandschutzanforderungen an diese, sodass hier Holzfaserdämmstoffe verwendet werden können. Auch positiv hervorzuheben ist, dass bei der Wärmedämmung der Stahlbetongiebelwände von Walden 48 kein WDV-System zum Einsatz kommt und stattdessen eine Dämmebene aus einem Holzrahmen verwendet wird. Hier fällt auch auf, dass für viele der eingesetzten Werkstoffe noch kein flächendeckendes Recycling verfügbar ist und dass geschlossene Materialkreisläufe noch nicht marktreif sind.

#### 6.5.4. Fazit

Die Ressourceneffizienz hängt unabhängig von der Konstruktions- und Materialwahl stark vom gewählten Baugrund ab. Innerstädtische Nachverdichtungen werden dabei sehr positiv bewertet. Alle analysierten Referenzprojekte stehen auf solchen Grundstücken. Die Unterschiede in der Bewertung stammen aus den unterschiedlichen Vornutzungen. Zu allen Projekten werden Aussagen getätigt, dass die schnelle Montagezeit mit Fertigteilen aus Holz ein positiver Faktor bei der Errichtung des Gebäudes in einem urbanen Umfeld war.

Der ressourcenschonende Materialeinsatz hängt einerseits stark von der Wahl des Tragwerks und der Verringerung der Betonmenge ab. Die Wahl des Tragwerks beeinflusst die verwendete Menge des Holzes. Die Menge an Stahlbeton lässt sich einerseits durch Substitution durch

Holzprodukte verringern, zum Beispiel durch die Verwendung eines BSP-Erschließungskerns oder eines BSP-Aufzugsschachts anstelle eines Äquivalents aus Stahlbeton. Andererseits kann die Menge an Stahlbeton durch Suffizienz verringert werden. Ein riesiges Einsparpotenzial bei der benötigten Menge an Stahlbeton liegt dabei in der Gründung und dem Verzicht auf Untergeschosse. Die Untergeschosse werden bei allen drei Gebäuden nur noch in geringem Ausmaß oder gar nicht für Autostellplätze genutzt. Es finden Haustechnikräume sowie Fahrradgaragen Platz. Hier liegt ein großes Potenzial bei der Senkung der grauen Energie und der Kosten, wenn beispielsweise auf unterirdische Fahrradgaragen verzichtet wird und die Gebäude nur teil- oder gar nicht unterkellert werden.

Daneben ist zu erkennen, dass die Materialwahl an vielen Stellen dem Brandschutz geschuldet ist und ökologische Alternativen nur mit hohem Aufwand oder in Ausnahmefällen möglich sind. Das Haus des Holzes und Walden 48 zeigen jedoch, dass bei entsprechenden Bauordnungen mit einer Bemessung auf Abbrand große Teile des Tragwerks sichtbar belassen werden können.

Besonders auffällig ist die sehr gute Umnutzbarkeit aller drei Gebäude trotz unterschiedlicher Tragsysteme. Dies ist vor allem auf den geringen Anteil tragender Innenwände zurückzuführen, sodass sich innerhalb einer Einheit relativ einfache Änderungen umsetzen lassen, aber auch Einheiten zusammenschließen oder unterteilen lassen. Eine Holztafelbaufassade wirkt sich ebenfalls positiv auf die Umnutzbarkeit aus, da sie einen gewissen Spielraum für Umbauarbeiten und Änderungen zulässt. Auffällig dabei ist, dass die Wahl des Fußbodenaufbaus eine entscheidende Rolle bei der Rückbaubarkeit von nicht tragenden Innenwänden spielt. Hier existieren noch keine standardisierten Lösungen, die sowohl die Rückbaubarkeit als auch die Wiederverwendbarkeit, aber auch sämtliche Anforderungen an Schall- und Brandschutz erfüllen. Eine gute Reparaturfähigkeit der Fassade hingegen ist mit relativ einfachen Mitteln zu erreichen, indem ein additiver Wandaufbau um einen dauerhaften Kern gewählt wird und mit lösbaren und zugänglichen Verbindungsmitteln befestigt wird.

Bei der Wiederverwendung kann festgestellt werden, dass im Holzbau grundsätzlich ein gutes Wiederverwendungspotenzial möglich ist. Dieses lässt sich aus der modularen Bauweise mit vorgefertigten Elementen ableiten. Häufig weisen die tragenden Bauelemente auch noch eine Nutzungsneutralität auf. Aufgrund der Leichtigkeit des Werkstoffs sind diese auch noch sehr gut für den Transport geeignet und lassen sich mit gängigen Hochbau- oder Autokränen auf der Baustelle bewegen. Um dieses Wiederverwendungspotenzial ausschöpfen zu können, sind jedoch zum heutigen Zeitpunkt sehr aufwändige Planungsprozesse notwendig, um Bauteilfügungen neu zu entwickeln, sodass diese schadensfrei rückbaubar und wiederverwendbar sind. Hinzu kommen die Planung von Rückbaukonzepten und möglicherweise eine Validierung des Rückbaukonzepts anhand Versuchsaufbauten. Die Zerlegbarkeit der Bauteile hingegen lässt sich weniger aufwändig bewerkstelligen. Dabei ist häufig eine Umstellung von Klammern und Nägeln auf Schrauben ausreichend, um die Zerlegbarkeit des Bauteils in seine Komponenten zu ermöglichen. Nicht zu unterschätzen ist auch der Aufwand, den eine BIM-Planung mit sich bringt. Hier ist die mangelnde Erfahrung möglicherweise ein hinderlicher Faktor. Die digitale Planung ist jedoch Grundlage für eine dauerhafte Informationsverfügbarkeit.

Beim Recyclingpotenzial ist zu erkennen, dass die Erkenntnis, auf Verklebungen größtenteils zu verzichten und somit eine sortenreine Trennung der Materialien zu ermöglichen, schon häufig umgesetzt wird. Um das Recyclingpotenzial voll auszuschöpfen, bedarf es jedoch Anstrengungen in der Entwicklung entsprechender Verfahrensprozesse, der dazugehörigen Infrastruktur sowie gesetzlicher Vorschriften für Quoten und Qualität des Recyclings.

## 7. Entwurf Holzriegelhof Wooden City

Im folgenden Abschnitt wird ein eigener Entwurf für ein mehrgeschossiges Holzwohngebäude vorgestellt. Die Bearbeitung des Entwurfs erfolgt zunächst im Rahmen einer Projektarbeit [147]<sup>5</sup> sowie darauf aufbauend im Rahmen der Wettbewerbsteilnahme an der proHolz Student Trophy 2024 Woodencity [148-150]<sup>6</sup>.

### 7.1. Vorstellung des Entwurfs

#### 7.1.1. Aufgabenstellung

Der Bauplatz befindet sich in der Inzersdorferstraße 100 im 10. Wiener Gemeindebezirk. Dort soll eine Blockrandergänzung erfolgen. In diesem Zug soll leistbarer Wohnraum und eine vitale Sockelzone entstehen, die einen Mehrwert für An- und Bewohner bietet [151]. Weitere Randbedingungen an den Entwurf waren eine Nutzfläche von mindestens 6.000 m<sup>2</sup>, mindestens vier oberirdische Geschosse sowie der Anschluss an die Brandwand des Nachbargebäudes in der Gussriegelstraße [151]. Zudem wurde von Seiten des Teams beschlossen, den Entwurf in den zulässigen Grenzen des bestehenden Bebauungsplans der Stadt Wien umzusetzen.

#### 7.1.2. Grundkonzept zur Lösung der Aufgabenstellung

Neben der Erfüllung der Anforderungen aus der Aufgabenstellung war ein Hauptziel, ein ressourcenschonendes und kreislauffähiges Gebäude zu entwerfen. Dafür wurde im Sinne der Ressourceneffizienz eine Bestandsnutzung angestrebt. Durch Nutzungsoffenheit und Flexibilität sollen Grundrisse entstehen, die eine möglichst lange Nutzung des Gebäudes sicherstellen. Zuletzt soll die Demontierbarkeit des Gebäudes am Ende des Lebenszyklus eine Wiederverwendung ermöglichen.

#### *Bestandsnutzung*

Auf dem Bauplatz befindet sich aktuell ein einstöckiges Gebäude, welches Teilunterkellert ist (siehe Abbildung 7-1, Teilunterkellerung unter weißem Gebäudebereich). Nach einer Ortsbegehung und der Sichtung der Bestandspläne wurde es als schwierig erachtet, mit der bestehenden oberirdischen Struktur das Ziel einer vitalen Sockelzone mit einem Mehrwert für die Nachbarschaft umzusetzen [149]. Eine mehrstöckige Bebauung der gesamten Grundstückstiefe ist ohnehin laut Bebauungsplan unzulässig. Zusätzlich entsteht durch den Abriss des oberirdischen Bestandsgebäudes Platz für begrünte Erholungsflächen auf dem Grundstück.

---

<sup>5</sup> [147] G. Bauer, R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Holzriegelhof", in *Projektarbeit Tragwerke - Ressourceneffiziente Tragwerksplanung und Holzbau*, Wien, 2024. ist eine nicht öffentlich einsehbare Quelle

<sup>6</sup> [148] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Präsentationsvideo Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024., [149] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Projektbeschreibung Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024. und [150] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Projektplakate Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024. sind nicht öffentlich einsehbare Quellen



Abbildung 7-1: Holzriegelhof - Bestandsbebauung (aus [148])

Die bestehende Tiefgarage und Bodenplatte wurden als wertvolle und erhaltenswerte Strukturen erkannt und sollen in den Entwurf integriert werden [149]. Dabei ist insbesondere das Einsparpotenzial bei der Grauen Energie für die Gründung ein entscheidender Faktor gewesen. Zunächst erfolgt der Rückbau des bestehenden Erdgeschosses (siehe Abbildung 7-2). Die freigelegte Bodenplatte weist einen Niveauunterschied zum Innenhof des Nachbargebäudes auf. Um das Gebäude mit dem Innenhofniveau zu verbinden, wird ein Teil der Tiefgarage zum benachbarten Innenhof geöffnet, während die bestehende Zufahrtsrampe auf der Straßenseite geschlossen wird (siehe Abbildung 7-3) [149]. Für die Verbindung der beiden Niveaus werden eine Treppe und eine Rampe installiert. Zusätzlich werden Teile der Bestandsbodenplatte des nicht unterkellerten Bereichs rückgebaut, um so eine entsiegelte Innenhoffläche zu schaffen (siehe Abbildung 7-3) [149]. Die ehemalige Tiefgarage wird nach dem Neubau nicht mehr für Autos genutzt. In ihr werden die Haustechnikanlagen, ein Fahrradkeller sowie Abstell- und Gemeinschaftsräume untergebracht [149].

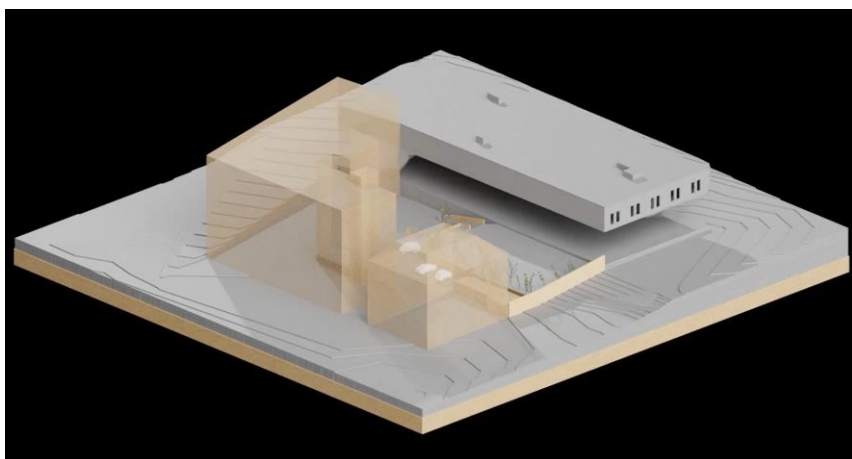


Abbildung 7-2: Holzriegelhof - Rückbau des Bestands im Erdgeschoss (aus [148])

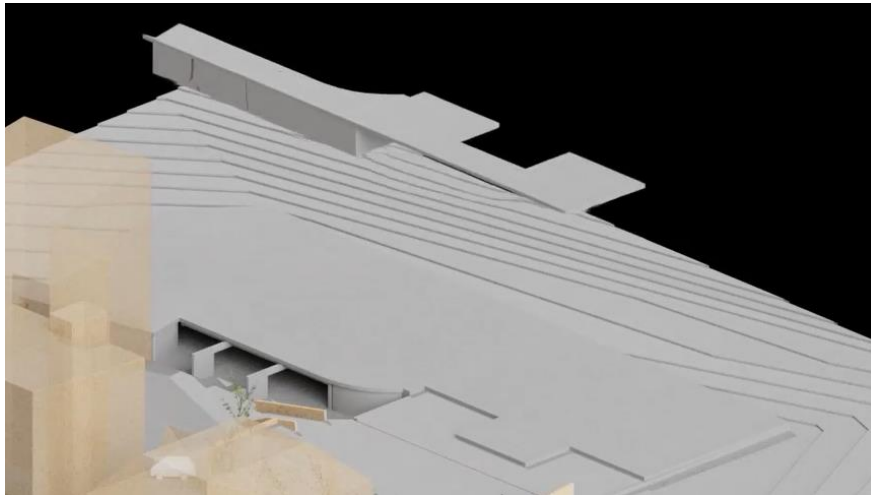


Abbildung 7-3: Holzriegelhof - Öffnen bestehender Tiefgarage zum Hofniveau (aus [148])

### Nutzungsoffenheit & Flexibilität

Die Analyse der potenziellen Mieterschaft und deren Entwicklung im Stadtteil hat ergeben, dass im Wohnungsspiegel hauptsächlich auf circa 80 m<sup>2</sup> große Nutzungseinheiten gesetzt wird. Diese werden in unterschiedlichen Konfigurationen als 3- und 4-Zimmer-Wohnungen angeboten und lassen sich auch während eines aktiven Mietverhältnisses ineinander wandeln (siehe Abbildung 7-4) [149]. Daneben bietet der Wohnungsspiegel weitere, kleinere Wohneinheiten zwischen 40 und 70 m<sup>2</sup> an (siehe Abbildung 7-5). Mit dem Angebot soll insbesondere auf den Bedarf an bezahlbarem Wohnraum für alleinerziehende Eltern, junge Kleinfamilien sowie Singles und Paare eingegangen werden.

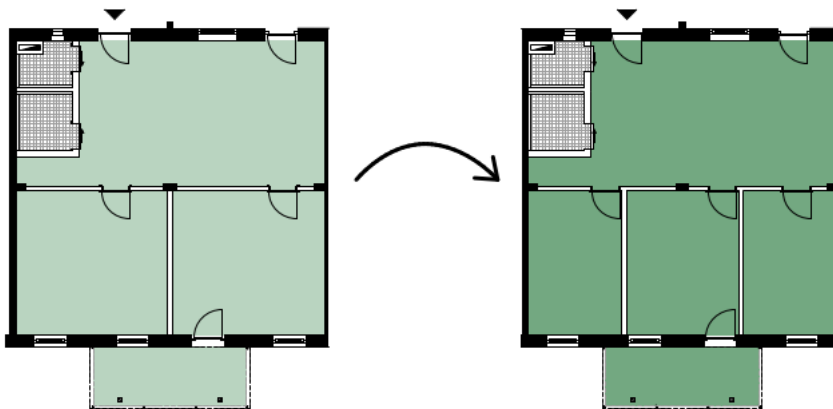


Abbildung 7-4: Holzriegelhof - Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart (aus [149])



Abbildung 7-5: Holzriegelhof - Wohnungsvarianten (aus [149])

Neben dem diversen Wohnungsangebot an kleinen bis mittleren Wohnungen besteht in den oberen zwei Etagen des Gebäudes die Möglichkeit, einen Teil einer Wohnungstrennwand zu entfernen und so eine doppelte Wohneinheit mit zwei Badezimmern und sechs Schlafzimmern zu schaffen (siehe Abbildung 7-6) [149]. Daneben werden auch Flächen zur Büronutzung sowie Gewerbeflächen angeboten [149]. Durch die Flexibilität und die Nutzungsvielfalt soll eine

dauerhafte Auslastung der Mieteinheiten auch bei zukünftigen Veränderungen sichergestellt werden.

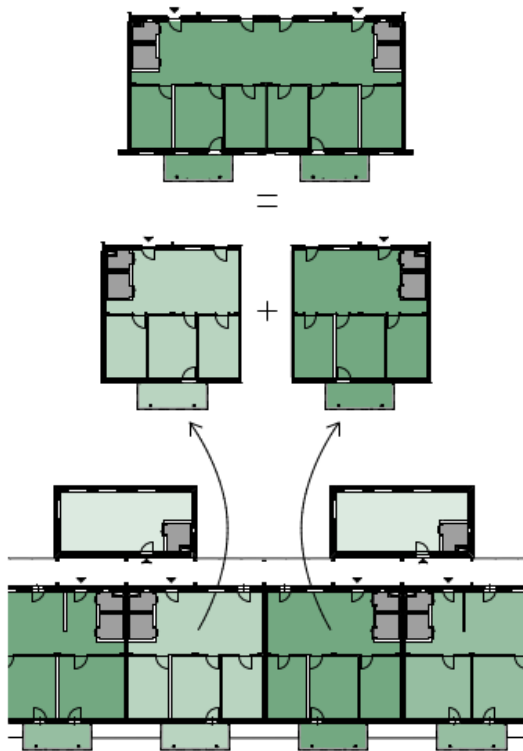


Abbildung 7-6: Holzriegelhof - Zusammenschluss zu Cluster-Wohnungen (aus [149])

### Demontierbarkeit

Der Tragwerksentwurf folgt dem Grundgedanken der Zirkularität, das bedeutet, dass zunächst versucht wurde, eine klare und verständliche Tragstruktur mit wenigen unterschiedlichen Bauteiltypen zu schaffen [149]. Zudem sollen die verwendeten Bauteiltypen möglichst einfach aufgebaut sein, einen nachvollziehbaren Lastpfad aufweisen, modular vorzufertigen sein und ein geringes Gewicht aufweisen [149]. Darüber hinaus spielt die Entwicklung schadensfrei lösbarer Bauteilknoten eine entscheidende Rolle bei dem Entwurf. Hier werden bei den aussteifenden Bauteilen auf mechanisch verzahnte BSP-Elemente (siehe Abbildung 7-7, mittig) und Holz-Holz-Schubverbinder gesetzt [149]. Bei der Lagesicherung der tragenden Holztafelbauelemente (siehe Abbildung 7-7, links) werden wieder lösbar in der Decke verschraubte Winkel verwendet [149]. Zudem kommen wieder lösbare Stützenknoten mit Stahlverbindern zum Einsatz (siehe Abbildung 7-7, rechts) [149].

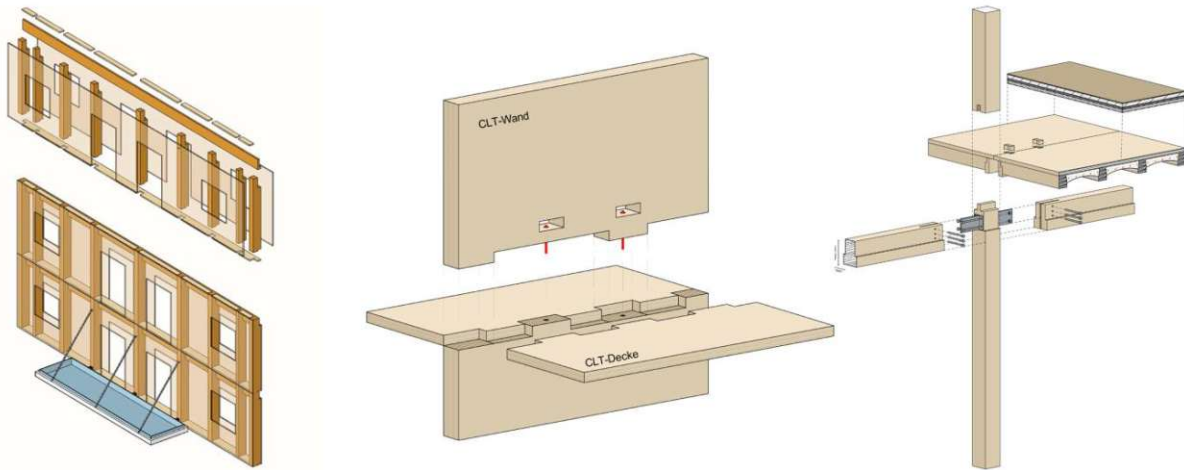


Abbildung 7-7: Holzriegelhof - Bauteilstöße (aus [149])

### 7.1.3. Grundrisse und Nutzungen

#### Erschließung

Die Erschließung des Erdgeschosses erfolgt über einen sich über die vollständige Gebäudelängsrichtung erstreckenden arkadenähnlichen Gang, welcher teilweise zum Innenhof hin geöffnet ist und einen direkten Zugang zu den Terrassen bietet (siehe Abbildung 7-8 und Abbildung 7-11) [148]. Der Arkadengang wird an den übrigen drei Gebäudeseiten durch großzügige und helle Durchgänge mit den öffentlichen Straßen verbunden (siehe Abbildung 7-8 und Abbildung 7-11) [148]. So sollen die Besucher der Geschäftslokale hin zum belebten Innenhof und weg von der Straße gelenkt werden [148]. Über den Arkadengang sind die beiden Erschließungskerne des Gebäudes erreichbar, welche jeweils am östlichen beziehungsweise westlichen Gebäudeende positioniert sind (siehe Abbildung 7-9 und Abbildung 7-11), wobei der Erschließungskern im östlichen Gebäudeteil bis in das aus dem Bestand übernommene Untergeschoss reicht [148]. Die beiden Erschließungskerne sind in den Regelgeschossen mit einem Laubengang verbunden, welcher sich über die gesamte Länge des Gebäudes erstreckt und nach Norden zum Innenhof teilweise geöffnet ist (siehe Abbildung 7-9) [148]. Die Erschließung der Wohnungen durch den durchgängigen Laubengang ermöglicht stets zwei Fluchtwege von jeder Nutzungseinheit [148].

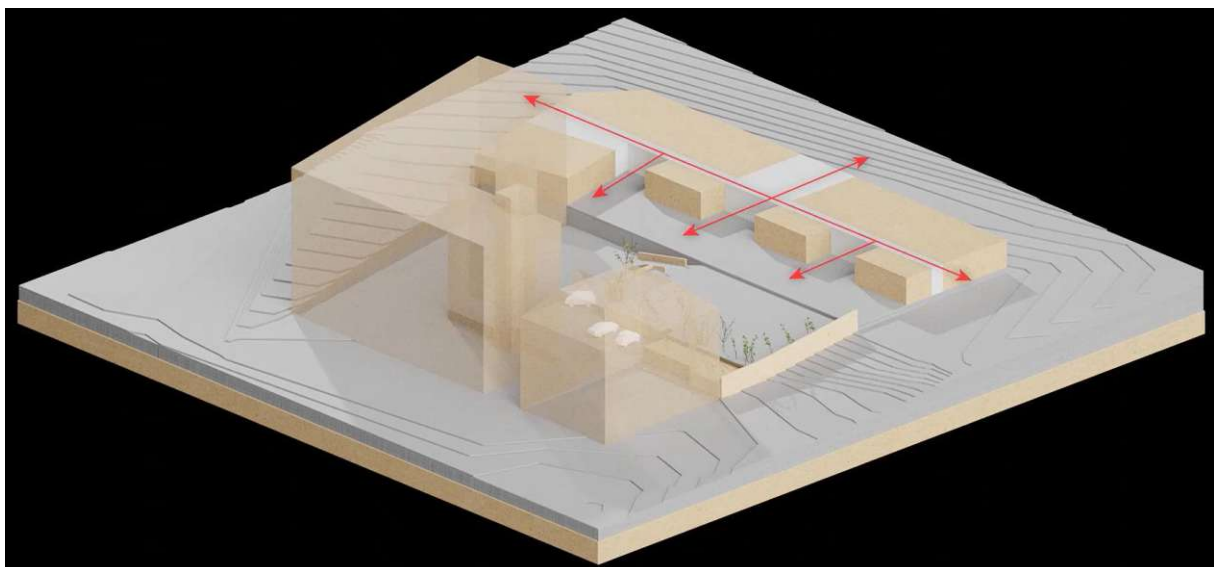


Abbildung 7-8: Holzriegelhof - Erschließung Erdgeschoss (aus [148])



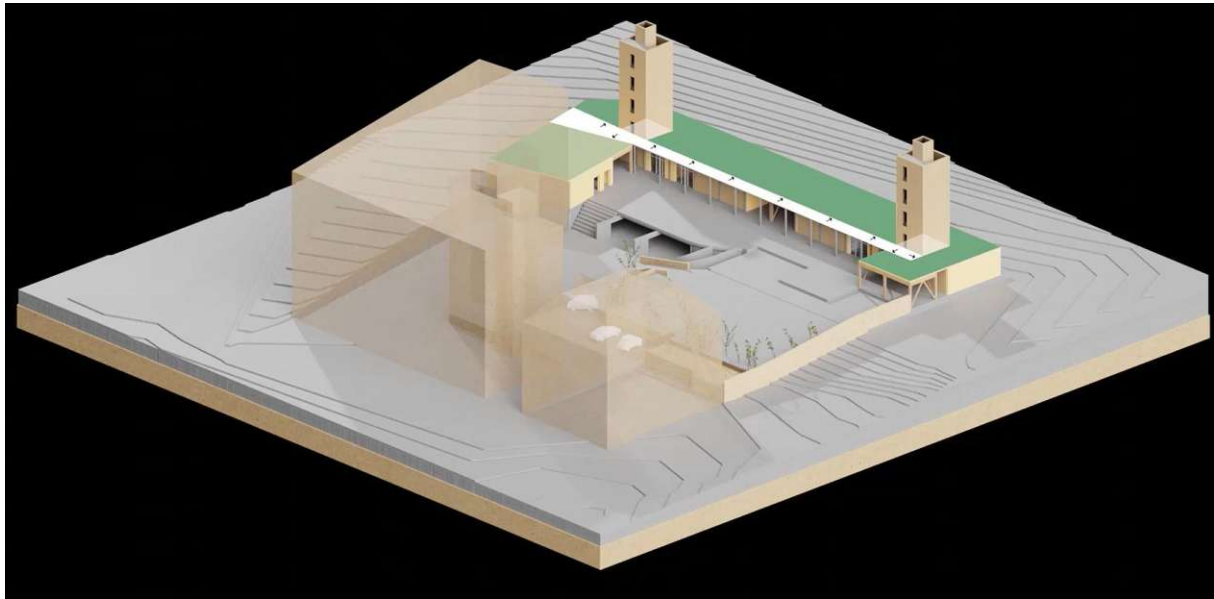


Abbildung 7-9: Holzriegelhof - Erschließung Regelgeschoss (aus [148])

### Nutzung

In Abbildung 7-10 ist eine Aufschlüsselung der Flächen nach Nutzung sowie der Anteil der Nutzflächen dargestellt. Von den circa 6.300 m<sup>2</sup> Nutzfläche entfällt der Großteil auf Wohnen und Gemeinschaftsflächen. Um einen Mehrwert für Bewohner und Anwohner zu bieten, werden die Laubengängerschließungen breiter ausgeführt um im Sommer als Begegnungszone zu dienen, zudem werden gemeinschaftliche Terrassen auf dem Dach und im neu geschaffenen Innenhof angelegt sowie verschiedene Angebote wie Co-Working-Spaces, Gemeinschaftswohnzimmer, Veranstaltungsräume oder eine Fahrradwerkstatt zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 7-11) [150]. Die Erdgeschosszone dient hauptsächlich als Geschäftszone, in der sich diverse Gewerbe- oder Gastronomiebetriebe einmieten können (siehe Abbildung 7-11). Dabei ist das Erdgeschoss so konzipiert, dass sich die Gewerbeflächen auf maximal zehn und minimal zwei Nutzungseinheiten aufteilen lassen [150].

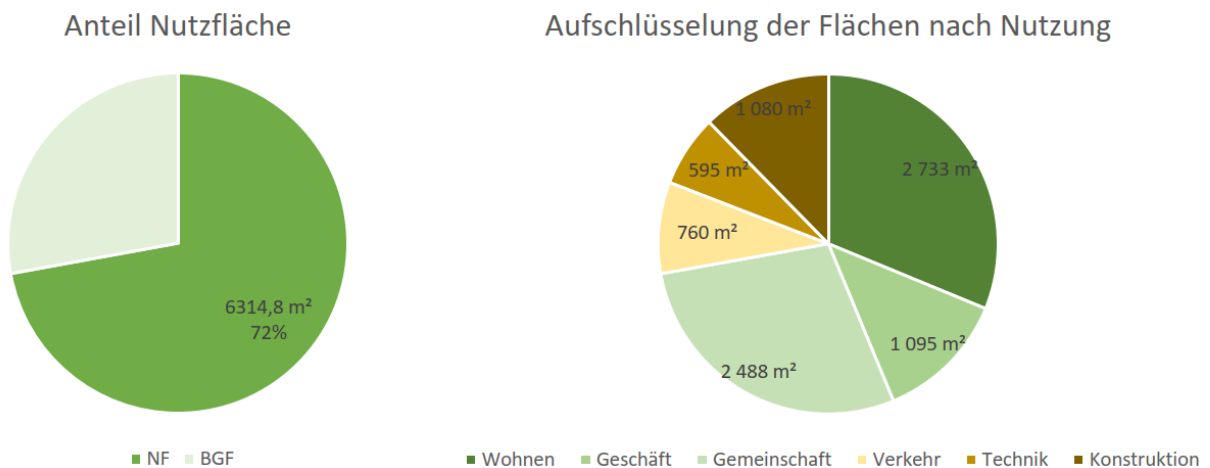


Abbildung 7-10: Holzriegelhof - Aufschlüsselung der Flächen (aus [150])

### Grundrisse

Das Erdgeschoss wird durch den Arkadengang in Nord-Süd-Richtung und durch den Zugang der Inzersdorferstraße in Ost-West-Richtung unterbrochen (siehe Abbildung 7-11). Die beiden südseitigen, der Straße zugewandten Teile beinhalten die Erschließungskerne und werden für die Gewerbeflächen genutzt (siehe Abbildung 7-11) [150]. Eine Pfosten-Riegel-Fassade zur

Straße und in den nordseitigen Bereichen, in denen der Arkadengang zum Innenhof offen ist, sollen für die Besucher der Geschäftslokale eine einladende Atmosphäre schaffen [148]. Nordseitig der Arkade befinden sich drei kleinere Baukörper, die die Arkade zum Innenhof verschließen (siehe Abbildung 7-11) [150]. In diesen Räumen sind im Erdgeschoss Gemeinschaftsräume untergebracht. Durch eine faltbare Fassade können diese Räume zum Innenhof hin fast vollständig geöffnet werden [150]. Im Nordosten des Gebäudes befindet sich der Anschluss an das Nachbargebäude. Dieser erfolgt über einen Gebäudestummel, welcher die kurze Seite des L-förmigen Grundrisses bildet. Der Winkel des Gebäudeknicks orientiert sich dabei an der Inzersdorferstraße und der Gussriegelstraße (siehe Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12) [150].



Abbildung 7-11: Holzriegelhof - Grundriss Erdgeschoss (aus [150])

In den Regelgeschossen werden alle Flächen bis auf den nordöstlichen Gebäudestummel für Wohnzwecke genutzt. Dabei kommen vier unterschiedliche Wohnungstypen zum Einsatz (siehe Abbildung 7-12) [150]. Die Wohnungen südlich des Laubengangs sind durchgesteckte Wohnungen. Wohnzimmer, Küche und Bad sind dem Laubengang zugewandt, die Schlafräume befinden sich südseitig und sind der ruhigen Inzersdorferstraße zugewandt (siehe Abbildung 7-12) [150]. Nördlich des Laubengangs befinden sich pro Geschoss jeweils drei kleinere 2-Zimmer-Wohnungen, welche nach Norden hin zum Innenhof ausgerichtet sind (siehe Abbildung 7-12) [150]. Der abgeknickte Gebäudestummel auf der Nordseite der Erschließung wird aufgrund seiner deutlich größeren Grundfläche als Bürofläche vermietet und kann entweder von einem Mieter oder als Co-Working-Büro genutzt werden (siehe Abbildung 7-12) [150].



Abbildung 7-12: Holzriegelhof - Grundriss Regelgeschoss (aus [150])

#### 7.1.4. Technische Ausführung

##### Tragwerk

Der vertikale Lastabtrag erfolgt über die beiden Fassaden der Gebäudelängsseite sowie die Mittelachse des Gebäudes (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Um eine möglichst ressourceneffiziente Konstruktion zu gewährleisten, wird versucht, einen Großteil der Fassade in Holztafelbauweise zu fertigen. Auf der südseitigen Fassade mit vielen Fensteröffnungen erfolgt der Lastabtrag ausschließlich über Holztafelbauwände (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Auf der nordseitigen Fassade zum Laubengang werden abwechselnd Wandelemente in Holztafelbauweise (Abschnitte mit vielen Fensteröffnungen) und Massivholzbauweise (Abschnitte mit Wohnungseingangstüre & ohne Fenster) eingesetzt (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Die Massivholzwände mit einem tragenden BSP-Kern dienen neben dem vertikalen Lastabtrag auch der Gebäudeaussteifung. In der Mittelachse des Gebäudes werden die vertikalen Lasten über Träger und Stützen abgetragen (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Die Deckenelemente spannen immer von der Außenwand zur Mittelachse (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Im Erdgeschoss wird das Tragwerk zur Straßenseite in einen Skelettbau aus Stützen und Trägern aufgelöst. So entsteht mit einer Pfosten-Riegel-Fassade eine großflächig verglaste Straßenfront (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt über Massivholzwände. Dafür werden Teile der nordseitigen Laubengangfassade, die Wohnungstrennwände sowie schubsteif miteinander verbundene Deckenscheiben aus BSP-Elementen verwendet (siehe Abbildung 7-13) [148, 149]. Der Laubengang wird aus Stahlbetonfertigteilen hergestellt und ist selbsttragend. Die Aussteifung erfolgt über punktuelle Befestigungen am Gebäude [149]. Die turmförmigen Anbauten nordseitig des Laubengangs sind selbsttragend und selbstaussteifend [150]. Sie besitzen nordseitig eine Holztafelbaufassade, während die restlichen Außenwände in Massivholzbauweise gefertigt werden. Die Spannrichtung der Decken sowie die Auflösung in ein Skelettragwerk im Erdgeschoss sind analog zum Hauptbaukörper des Gebäudes (siehe Abbildung 7-13) [150].

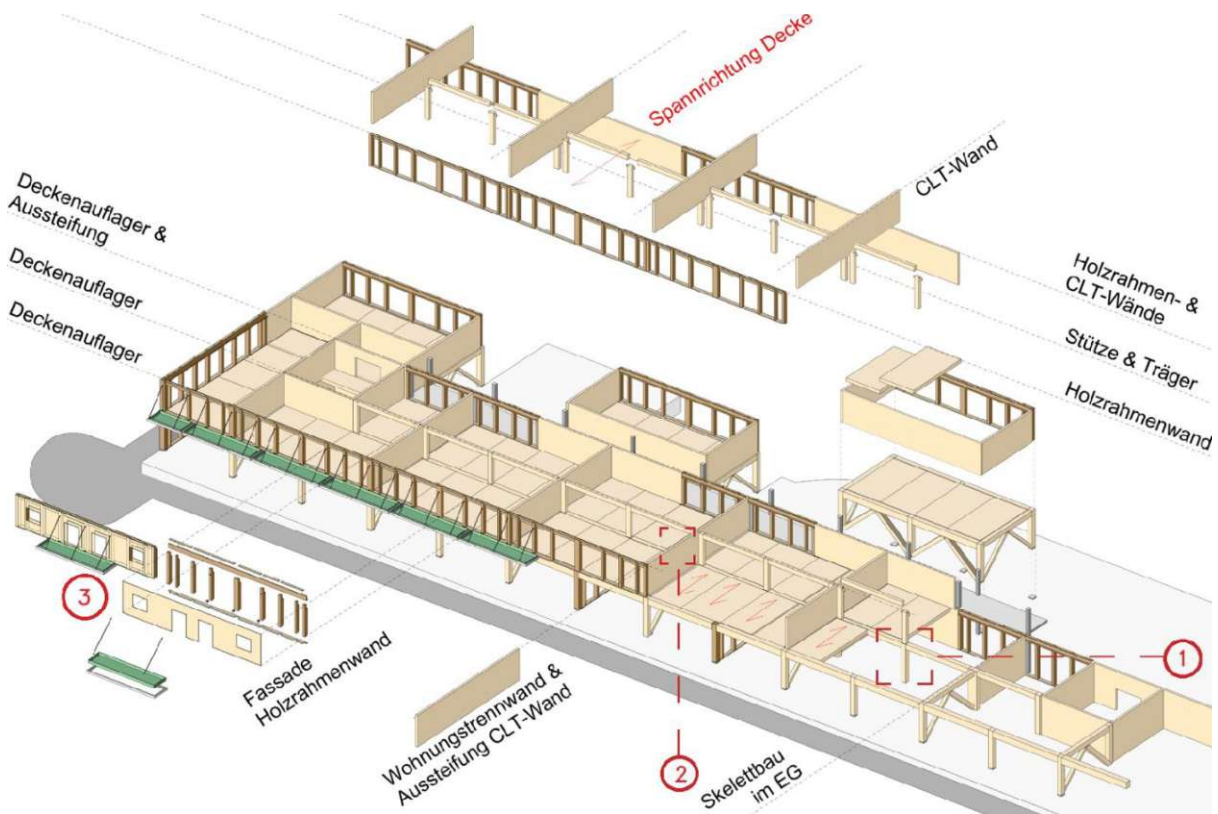


Abbildung 7-13: Holzriegelhof - Tragwerk Isometrie (aus [150])

### Bauteilknoten

Ein Hauptaugenmerk der Tragwerksplanung lag auf der Entwicklung demontierbarer Bauteilverbindungen. Im Folgenden werden drei wesentliche Bauteilknoten des Tragwerks vorgestellt: das Anschlussdetail des Stützen-Träger-Knotens in der Gebäudemittelachse (siehe Abbildung 7-13, Detail 1 und Abbildung 7-14), der Wand-Decken-Stoß der aussteifenden Wohnungstrennwände (siehe Abbildung 7-13, Detail 2 und Abbildung 7-15) und der Wand-Decken-Stoß der Holztafelbauaußenwand (siehe Abbildung 7-13, Detail 3 und Abbildung 7-16). In Abbildung 7-14 ist das Knotendetail einer Stütze der Mittelachse des Gebäudes dargestellt. Die Verbindung zwischen Stütze und Träger ist eine Stahlblech-Holz-Verbindung mit Passbolzen. Der Knoten ist so konzipiert, dass die Stützen aufeinander stehen und die Lagesicherung mittels Verzahnung erfolgt. Eine zusätzliche Sicherung der Stütze erfolgt mit Passbolzen zwischen den beiden Stützen. Die Deckenelemente liegen auf den T-förmigen Trägern auf. Hier ist lediglich eine Lagesicherung notwendig. Diese kann zum Beispiel durch punktuelle Verschraubungen geschehen. Im Erdgeschoss werden Holzrippendecken mit Ausfachungen aus Stampflehm verwendet (System Rematter [85, 86]), in den Regelgeschossen werden BSP-Deckenelemente eingesetzt. Die Scheibenausbildung zwischen den Deckenelementen erfolgt mittels schmetterlingsförmigen Schubverbindern aus Hartholz (System X-Fix [152]).

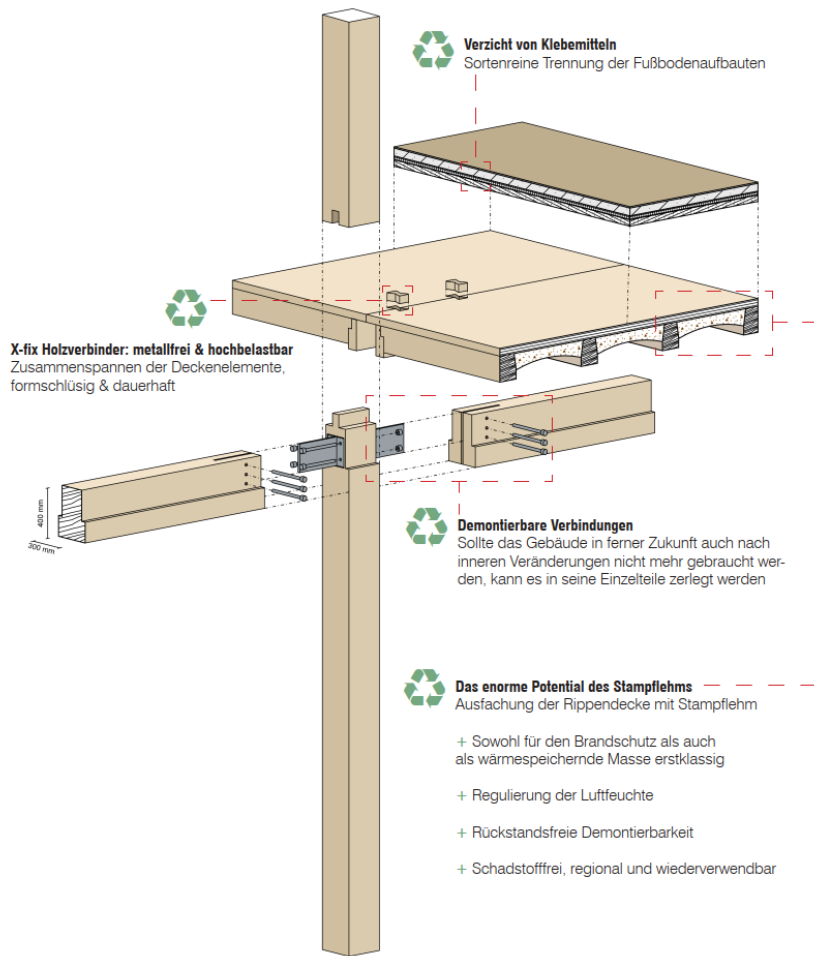


Abbildung 7-14: Holzriegelhof - Stützenknoten (aus [150])

In Abbildung 7-15 ist der Wand-Decke-Stoß einer aussteifenden Wand zu sehen. Eine Verzahnung mittels Fingerzinken sorgt für eine Schubkraftübertragung aus der Deckenscheibe in die Wandelemente, während die Verzahnung der Wandelemente die Schubkräfte vom oberen in das untere Wandelement einleitet [95]. Zudem kann durch die Verzahnung erreicht werden, dass die Wandelemente direkt aufeinander stehen und so keine Querdruckkraft durch die Deckenelemente geleitet werden muss [95]. Eingelassene Gewindemuffen im unteren Wandelement ermöglichen eine Verschraubung der beiden Wandelemente. Diese dient der Lagesicherung und Zugkraftübertragung dient und lässt sich wieder lösen [95].

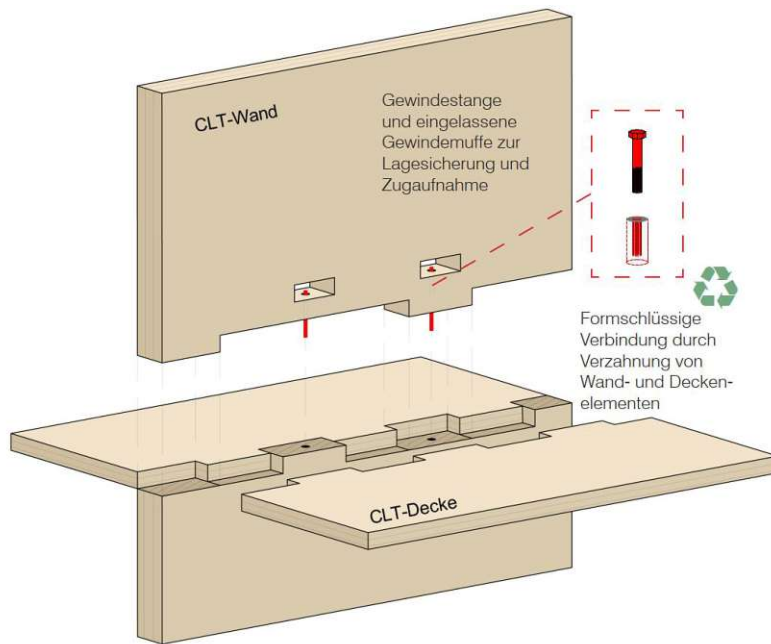


Abbildung 7-15: Holzriegelhof - Wandstoß aussteifend (aus [150])

Abbildung 7-16 zeigt den Wand-Decken-Stoß der Holztafelbauwand im Bereich der Fassade. Hier wird grundsätzlich die von Jung [116] beschriebene Skelett-Rahmen-Bauweise verwendet. Diese bestehen aus einem durchlaufenden Kerto-Auflager und BSH-Stützen in einem Abstand von bis zu circa 2,0 m. Um eine Querkraftbeanspruchung der Schwelle und des Rähm zu vermeiden, werden die Stützen stets durch Schwelle und Rähm hindurchgeführt, sodass der Stützenfuß direkt auf dem Stützenkopf steht. Die Schwelle übernimmt nur die Funktion der Lagesicherung der Stützen. Das Rähm aus Kerto dient neben der Lagesicherung der Stützen auch als Deckenaufleger [116]. Für die Lagesicherung der Decke erfolgt eine schräge Verschraubung in das Auflager (siehe Abbildung 7-16). Die Lagesicherung der Wand wird durch Winkel hergestellt. Die Winkel sollen werksseitig mit den Stützen der Rahmenwand verschraubt werden. Da die Position der Stützen bekannt ist, können auf der Baustelle oder im Werk Gewindeaufnahmen aus Stahl (System Sihga IdeFix [153]) in die Deckenelemente eingelassen und verschraubt werden, sodass die Verschraubung zwischen dem Winkel und der Decke mit metrischen Vollgewindeschrauben (Passbolzen) erfolgen kann [91]. Das gleiche System wird für die Befestigung der vorgehängten Balkone und Pflanzentröge aus Stahl verwendet. Die Gewindemuffen werden dabei in den Holzstützen der Holztafelbauwand eingelassen, sodass an ihnen die Stahlaufnahmen für die Abhängung und die Stahlkonsolen für die Auflager der Balkone befestigt werden können.

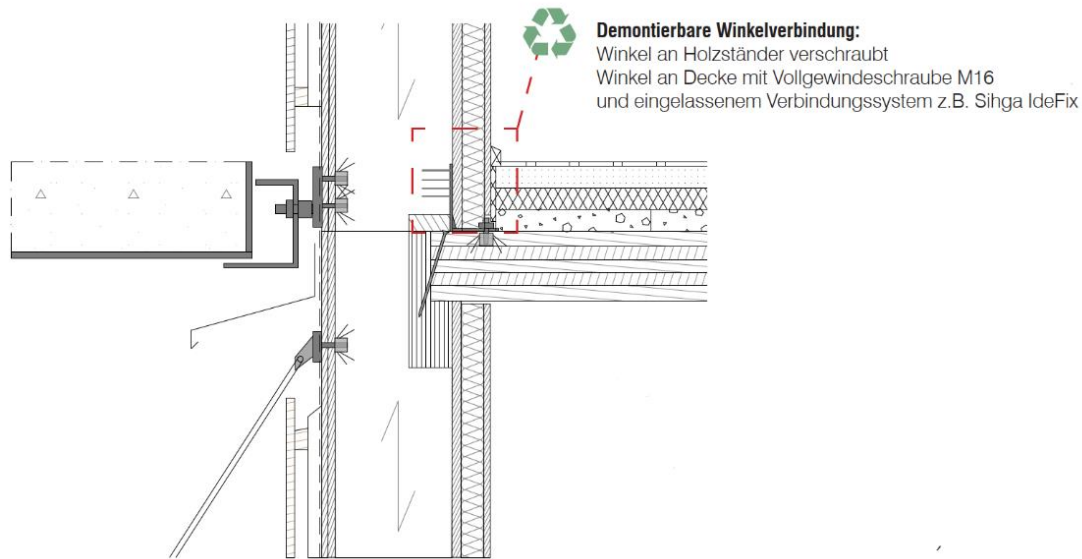


Abbildung 7-16: Holzriegelhof - Wandstoß Fassade (aus [150])

### Haustechnik

Um den Energiebedarf zu senken werden geringe U-Werte (Dach:  $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  und Außenwand:  $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) angestrebt. Die Beheizung der Wohnräume erfolgt über eine Fußbodenheizung. Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels Erdsonde-Wärmepumpe und kann im Sommer zur Kühlung verwendet werden [149]. Zusätzlich kommt eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz. Als bauliche Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz werden auf der südseitigen Fassade Pflanzentröge angebracht. Diese bieten für einen Teil der Fenster eine Verschattung. Zusätzlich wurden an sämtlichen Fenstern Schiebelelemente zur Verschattung vorgesehen [149].

Die Technikräume für die Heizung, die Lüftung sowie sämtliche Netzanschlüsse befinden sich im Untergeschoss. Von dort werden die Leitungen horizontal über einen Versorgungsgang im Untergeschoss verteilt (siehe Abbildung 7-17) [149]. Dieser befindet sich zwischen der tragenden Mittelachse und der nordseitigen Laubengangwand und wird vom Bestandsuntergeschoss auf die gesamte Gebäudelänge geführt. Der Versorgungsgang soll hoch- und breit genug sein, um begehbar zu sein und Wartungs-, Instandhaltungs- und Austauscharbeiten zu ermöglichen. Die Versorgung der einzelnen Nutzungseinheiten erfolgt mittels vertikaler Steigschächte (siehe Abbildung 7-17) [149]. Dabei werden kleinere Einheiten von einem und größere Einheiten von zwei Steigschächten versorgt, um die Leitungswege innerhalb der Einheiten kurz zu halten. Die Steigschächte sind zudem so positioniert, dass sie direkt an einem Badezimmer oder einer Küche liegen. Auf dem Dach befindet sich eine PV-Anlage zur Stromerzeugung in den Dachbereichen, welche nicht als Terrassenfläche genutzt werden, und ist in Ost-West-Richtung ausgerichtet [149].

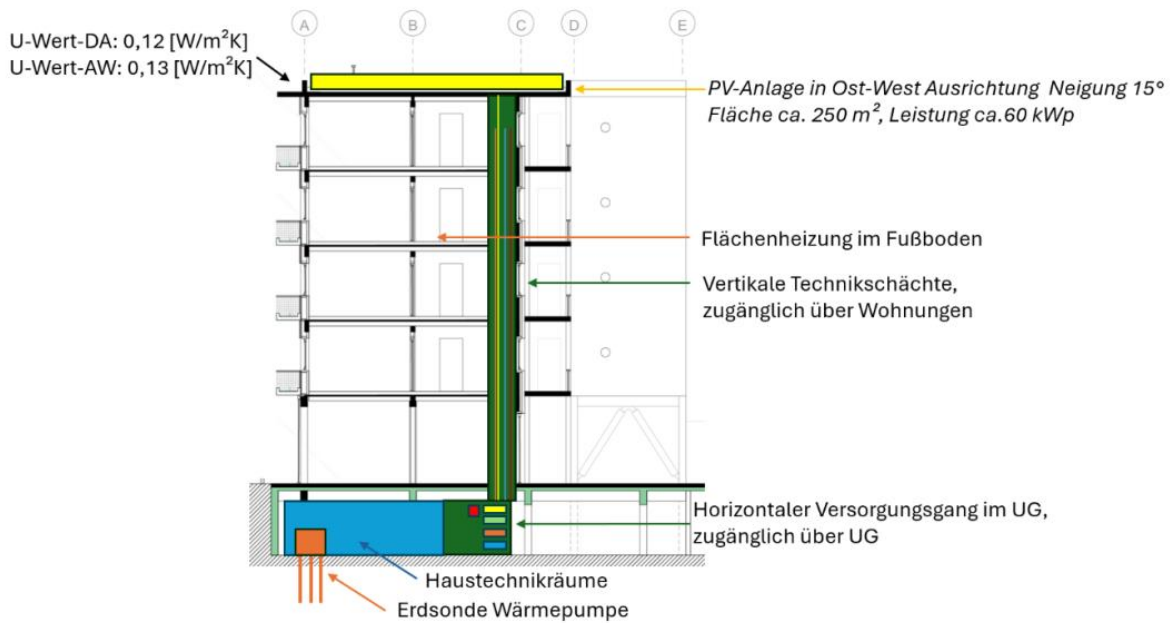


Abbildung 7-17: Holzriegelhof - Haustechnisches Konzept (aus [149])

### 7.1.5. Gestalterische Aspekte

#### Städtebauliche Einbindung

Die Entwicklung des Gebäudevolumens wird im folgenden Abschnitt erläutert und ist in Abbildung 7-18 schrittweise dargestellt. Zunächst erfolgen eine Bestandsprüfung und städtebauliche Analyse der Umgebung [149]. Nach dem Entschieden für den Teilabriss und den Erhalt des Untergeschosses samt Bodenplatte wird zunächst das maximale Bauvolumen laut Bebauungsplan ermittelt [149]. Auf Grundlage dieses Volumens wird Blockrandbebauung unter Anschluss an das Nachbargebäude im Osten und Süden des Bauplatzes geschlossen [149]. Um eine gute Belichtung zu gewährleisten, wird die Gebäudetiefe des maximalen Bauvolumens reduziert, indem hofseitige Einschnitte in das Volumen vorgenommen werden. So entstehen Wohnungstiefen von etwa 10,0 m [149]. Durch straßenseitige Zugänge auf drei Seiten wird eine Belebung der Sockelzone hergestellt und der Hof öffentlich zugänglich gemacht [149]. Die Wohnungen werden über zwei durch Laubengänge miteinander verbundene Erschließungskerne zugänglich gemacht [149].

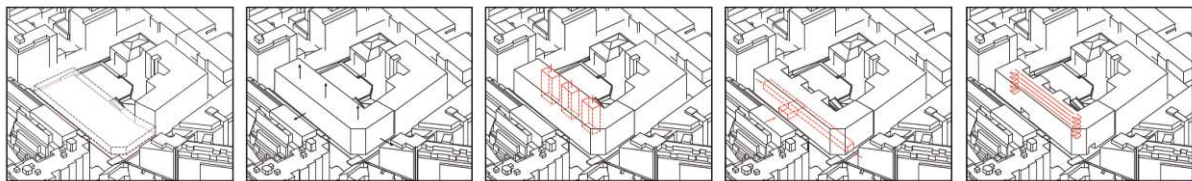


Abbildung 7-18: Holzriegelhof - Städtebauliche Einbindung v.li.n.re. Bestandsprüfung und Teilabriss, maximales Bauvolumen und Blockrandschluss, Freischneiden des Volumens, Schaffen der Zugänge, Erschließung über Kerne und Laubengänge (aus [149])

#### Einbindung des Innenhofs

Zusätzlich zu den entsiegelten Flächen auf dem Baugrundstück werden Teile des benachbarten Innenhofs entsiegelt und begrünt. Die ehemaligen Parkplätze, die sich dort befanden, werden durch ein Car-Sharing-Angebot ersetzt, welches weitaus weniger Platzbedarf erfordert [149]. Die neu entstandene Grünfläche soll bepflanzt und von den Anwohnern als Erholungsfläche



genutzt werden können. Der grüne Innenhof steigert die Biodiversität, sorgt bei Hitze für eine Abkühlung des Innenhofs und bei Regen für einen verbesserten Abfluss des Oberflächenwassers [149]. Hinzu kommen Grünflächen auf dem Dach und an Teilen der Fassade (siehe Abbildung 7-19), welche die genannten Effekte verstärken sollen. Neben dem sozialen Mehrwert für die Anwohner wird auch ein Mehrwert für das lokale Mikroklima erzeugt.



Abbildung 7-19: Holzriegelhof - Innenhofkonzept (aus [149])

### *Fassadengestaltung*

Die Fassade im Innenhof greift im Bereich der Büronutzung in der Farbwahl das anschließende Bestandsgebäude aus Ziegel auf und setzt diese mit einer Holzschalung fort (siehe Abbildung 7-20) [149]. Im Knick beim Übergang zwischen Büronutzung und Wohnnutzung wird eine Begrünung angeordnet (siehe Abbildung 7-20). Diese soll einen Übergang für den Farb- und Materialwechsel zum Laubengang schaffen [149]. Die Laubengangelemente werden in Sichtbeton belassen. Während die Fassade zum Laubengang aus brandschutztechnischen Gründen nicht in Holz ausgeführt wurde und daher verputzt ist, konnte die Bekleidung der nördlich des Laubengangs vorgestellten Türme mit einer grünen Holzschalung ausgeführt werden [149]. Die Fassade dieser Türme wird im Erdgeschoss aufgelöst, sodass die Gemeinschaftsräume im Sommer durch das Öffnen von Faltelementen vollständig zum Innenhof geöffnet werden können (siehe Abbildung 7-20) [149].



Abbildung 7-20: Holzriegelhof - Visualisierung Innenhof (aus [149])

Auf der Straßenseite wird farblich wieder auf das Nachbargebäude aus Ziegel eingegangen. Die Fassade aus Holz ist im Bereich der Stockwerkstöße horizontal und im Bereich der raumhohen Fenster vertikal ausgeführt. Holzelemente in Sichtholz sollen die Stockwerkstöße sichtbar machen und für einen Kontrast in der Fassadengestaltung sorgen. Sie dienen zudem als Führungsschiene für die Schiebelemente zur Verschattung (siehe Abbildung 7-21) [149]. Die abgehängten Balkone und Pflanzentröge sorgen im Übergang zwischen Erdgeschoss und dem 1. Obergeschoss für eine durchgängige optische Trennung und ermöglichen auch zur Straßenseite eine Art Arkadengang (siehe Abbildung 7-21) [149]. In den darüberliegenden Geschossen werden die Balkone und Pflanzentröge versetzt angeordnet, sodass eine abwechslungsreiche Fassadengestaltung entsteht (siehe Abbildung 7-21) [149]. Im Erdgeschoss soll durch das aufgelöste Skeletttragwerk mit einer Pfosten-Riegel-Fassade mit großen Glasflächen eine helle und einladende Atmosphäre entstehen (siehe Abbildung 7-21).



Abbildung 7-21: Holzriegelhof - Visualisierung Straßenecke (aus [149])

## 7.2. Analyse Holzriegelhof

### 7.2.1. Analyse – Reduce

#### Flächeninanspruchnahme

Der Neubau wird auf einer baulich vorgenutzten Fläche erstellt. Dabei kommt es durch den teilweisen Rückbau der Bodenplatte und der Begrünung dieser Fläche zu einer Verbesserung der Versiegelungsfläche. Das Bestandsgebäude ist bereits teilunterkellert. Dieser Bereich wird weitergenutzt. Im nicht unterkellerten Bereich wird lediglich ein Versorgungsgang für die Haustechnik ergänzt. Durch einen Rückbau von Teilen der Bestandsbodenplatte wird bereits eine Bodenversiegelungsmaßnahme ergriffen. Hinzu kommen die geplante Entsiegelung der angrenzenden Hoffläche des Nachbargebäudes sowie eine Begrünung eines Großteils der Dachfläche.

Tabelle 7-1: Holzriegelhof - Bewertung der Flächeninanspruchnahme

<b>Kriterium:</b> Flächeninanspruchnahme		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Bewertung des Standortes	a) Neubau auf unbebauter Außenentwicklungsfläche	a) 0/0
	b) Nachverdichtung auf unbebauter Innenentwicklungsfläche	b) 0/2
	c) Neubau auf vorgenutzter Fläche	c) 0/3
	d) Neubau auf vorgenutzter Fläche - Verbesserung des Versiegelungsgrades	<b>d) 4/4</b>
Minimierung des Eingriffs in den Boden	Gründungsmaßnahmen zur Minimierung des Eingriffs in den Boden	0,5/1
Ausgleichsmaßnahmen	Zusätzliche Maßnahmen, die der Bodenversiegelung entgegenwirken	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

#### Nutzungsdichte

Der Wohnungsspiegel mit der entsprechenden Zimmeranzahl wurde in das SNBS-Berechnungstool [112] eingegeben (siehe Abbildung 7-22). Dabei ergibt sich eine Nutzungsdichte von knapp 36 m<sup>2</sup> pro Kopf. Im Angebot befinden sich kleine 1,5-Zimmer- bis 2-Zimmer-Wohnungen mit einer Größe von 40 bis 60 m<sup>2</sup>. Diese machen knapp über die Hälfte der angebotenen Wohnungen aus. Im Zuge der Entsiegelung der Parkplatzfläche des Nachbarinnenhofs werden anstelle der entfernten Parkplätze Car-Sharing-Angebote geschaffen. Der Grundriss ist so gestaltet, dass die Umnutzung von zwei 3- oder 4-Zimmer-Wohnungen in eine Wohngemeinschaft mit bis zu sechs Schlafzimmern möglich ist. Im Erdgeschoss und Keller sowie auf der Dachterrasse und im Innenhof befinden sich weitreichende Angebote an Gemeinschaftsflächen.

Annahme für noch nicht vermietete / verkaufte Wohnungen:				Bewertung	
Wohnungsspiegel (Zimmerzahl)	Annahme für Belegung (Personen)	Stückzahl (Wohnungen)	Annahme Belegung	Referenzwert	Punkte
1	1,3	4	5,2	Nutzungsichte ≤ 50.0 m <sup>2</sup> /Pers	6
1,5	1,4	12	16,8	50.0 < Nutzungsichte ≤ 52.5 m <sup>2</sup> /Pers	5,5
2	1,4	12	16,8	52.5 < Nutzungsichte ≤ 55.0 m <sup>2</sup> /Pers	5
2,5	1,7		0,0	55.0 < Nutzungsichte ≤ 58.8 m <sup>2</sup> /Pers	4,5
3	1,9	8	15,2	58.8 < Nutzungsichte ≤ 62.5 m <sup>2</sup> /Pers	4
3,5	2,2		0,0	62.5 < Nutzungsichte ≤ 65.0 m <sup>2</sup> /Pers	3,5
4	2,5	8	20,0	65.0 < Nutzungsichte ≤ 67.5 m <sup>2</sup> /Pers	3
4,5	2,7		0,0	67.5 < Nutzungsichte ≤ 72.5 m <sup>2</sup> /Pers	2,5
5	2,8		0,0	72.5 < Nutzungsichte ≤ 77.5 m <sup>2</sup> /Pers	2
5,5	2,8		0,0	77.5 < Nutzungsichte ≤ 82.5 m <sup>2</sup> /Pers	1,5
6	2,8		0,0	82.5 < Nutzungsichte ≤ 87.5 m <sup>2</sup> /Pers	1
>6	2,8		0,0	Nutzungsichte > 87.5 m <sup>2</sup> /Pers	0
Total		44	74,0		

Reale Belegungen in vermieteten / verkauften Wohnungen:	
Anzahl Personen in vermieteten / verkauften Wohnungen	
EBF total gem. Bauprojekt	2700 m <sup>2</sup>
Anzahl Personen (Annahme + reale Belegung)	74,0
Anzahl Zimmer (Zu übertragen ins Hilfstool 335 "Mobilitätsmassnahmen", Messgrösse 2)	96
<b>Nutzungsichte</b>	<b>36,5 m<sup>2</sup>/Pers</b>
	<b>6 Punkte</b>

Abbildung 7-22: Holzriegelhof - Eingabe des Wohnungsspiegels in SNBS-Hilfstool (aus [112])

Tabelle 7-2: Holzriegelhof – Bewertung der Nutzungsichte

Kriterium: Nutzungsichte		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Pro-Kopf-Wohnfläche	a) Größer als durchschnittliche Wohnfläche > 50 m <sup>2</sup>	a) 0/0
	b) Durchschnittliche Wohnfläche bis 15 % reduziert 42,5 m <sup>2</sup> - 50 m <sup>2</sup>	b) 0/1
	c) Durchschnittliche Wohnfläche 15 – 30 % reduziert 35 m <sup>2</sup> - 42,5 m <sup>2</sup>	c) 2/2
	d) Durchschnittliche Wohnfläche > 30 % reduziert < 35 m <sup>2</sup>	d) 0/3
Angebot kleiner Wohnungen	1 bis 1,5-Zimmer Wohnungen < 35 m <sup>2</sup> oder 2 bis 2,5-Zimmer Wohnungen < 70 m <sup>2</sup>	1/1
Mobilitätskonzept mit Gemeinschaftsnutzung	Car-Sharing Angebote, Förderung der Fahrradmobilität	0,5/0,5
Nutzungsmaximierende Wohnformen	Cluster-Wohnen oder Wohngemeinschaften im Wohnungsspiegel	0,5/0,5
Flächen zur Gemeinschaftsnutzung	Gemeinschaftsbüro, Waschräume, Werkstätten, Aufenthaltsräume, Spielräume etc.	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5/6</b>

### Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

Durch die Wiederverwendung des bestehenden Untergeschosses und der bestehenden Bodenplatte konnte beim Projekt Holzriegelhof auf einen Neubau der Gründung verzichtet werden.

Tabelle 7-3: Holzriegelhof – Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung

<b>Kriterium:</b> Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Einsatz wiederverwendeter Bauteile	a) Kein Einsatz	a) 0
	b) Vereinzelter Einsatz, z. B.: einzelne Stützen oder kleinere Teile der Fassadenbekleidung	b) 0/1
	c) Systematischer Einsatz in einzelnen, nicht tragenden Bauteilschichten, z. B.: Fassadenbekleidung oder Fußbodenbelag	c) 0/2
	d) Systematischer Einsatz in der Sekundärstruktur, z. B. nicht tragende Fassadenelemente oder Fenster	d) 0/3
	e) Systematischer Einsatz für einen wesentlichen Teil der Tragstruktur, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk oder Weiternutzung eines bestehenden Untergeschosses	<b>e) 3,5/4</b>
	f) Großteil der Primär- und Sekundärstruktur wiederverwendet, z. B.: wiederverwendetes Skeletttragwerk mit wiederverwendeten Fassadenelementen	f) 0/5
	g) Nahezu vollständiger Einsatz wiederverwendeter Bauteile, z. B.: Ortswechsel eines ganzen Gebäudes	g) 0/6
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>0/6</b>

### Reduktion des Stahlbetonanteils

Das Tragwerk exklusive Erschließung wird ab dem Erdgeschoss vollständig in Holz ausgeführt. Durch die Weiternutzung konnte der Einsatz von Stahlbeton im Untergeschoss auf die Erweiterung des Haustechnikganges und punktuelle Ergänzungen von Stützen und Fundamenten beschränkt werden. Die Bodenplatte wird um eine Aufbetonschicht ergänzt, um der Belastung des Neubaus standzuhalten. Die Errichtung der Erschließungskerne erfolgt mit bekleideten BSP-Elementen und Fertigteiltreppen und -podesten aus Stahlbeton. Da der Laubengang frei bewittert ist und die Brandschutzanforderungen an einen Fluchtweg erfüllen muss, wird dieser aus Stahlbetonfertigteilen gefertigt.

Tabelle 7-4: Holzriegelhof - Bewertung der Reduktion des Stahlbetonteils

<b>Kriterium:</b> Reduktion des Stahlbetonteils		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk (oberirdisch exkl. Erschließung)	Tragstruktur ab 1. OG (exkl. Erschließungskerne) in Holzbauweise mit Verzicht auf Hybridbauteile	1/1
	Verzicht auf ein Stahlbeton-Erdgeschoss	1/1
Gründung	Verzicht auf Untergeschoss	1,5/2
	Maßnahmen zur Reduktion des Stahlbetonteils in der Gründung	0,5/1
Erschließung	Verzicht auf Stahlbeton-Erschließungskerne	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4,5/6</b>

#### *Ressourceneffizienz des Holztragwerks*

Die Decken werden in den Regelgeschossen aus BSP-Elementen gefertigt. Im Erdgeschoss werden sehr effiziente Holzrippendecken mit Stampflehmausfachung eingesetzt. Es wurde versucht, die Anzahl tragender Innenwände zu reduzieren. Der vertikale Lastabtrag erfolgt in der Mittelachse mittels Skelettragwerk und der Bürotrakt des Gebäudes weist ein Skelettragwerk auf. Die zur Aussteifung notwendigen Wohnungstrennwände werden in BSP-Bauweise ausgeführt. Die Fassade besteht zum Großteil aus Holztafelbauelementen. Bei der Wahl der aussteifenden Bauteile werden Teile der nordseitigen Fassade zur Aussteifung der Gebäudelängsrichtung verwendet, da die Erschließungskerne bei der Länge des Gebäudes nicht als ausreichend angesehen wurden. Um die Queraussteifung des Gebäudes sicherzustellen, werden dafür Wohnungstrennwände in Massivholzbauweise angeordnet.

Tabelle 7-5: Holzriegelhof - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks

<b>Kriterium:</b> Ressourceneffizienz des Holztragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Decken	a) Brettstapeldecken	a) 0/1
	b) Kasten- oder Rippendecken	<b>b) 0,5/2</b>
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Innenwände	a) Reduktion tragender Innenwände	<b>a) 1/1</b>
	b) Skelettragwerk ohne tragende Innenwände	b) 0/2
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Fassade	Holztafelbauweise	1/1
Ressourceneffizienter Holzeinsatz Aussteifung	Gebäudeaussteifung über Treppenhauswände und Teile der Außenwände	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3/6</b>

#### *Ökologische Baustoffwahl*

Der Bodenbelag in den Regelgeschossen mit BSP-Decken besteht aus Parkett. Darunter folgt ein Zementestrich über einer mineralischen Trittschalldämmung. Auf eine Schüttung wird

verzichtet. Dafür werden Lehmbausteine zur Beschwerung verwendet. Diese stellen zwar keine biogene Alternative zu mineralischer Schüttung dar, werden dennoch als ressourcenschonender Baustoff bewertet. Der Fußbodenaufbau über dem Erdgeschoss mit einer Holz-Lehm-Rippendecke lässt sich mit Estrichelementen aus Gips, einer mineralischen Trittschalldämmung und einer Blähtonfüllung trocken herstellen. Im Aufbau wurden jedoch keine biogenen Baustoffe verwendet.

Die raumseitige Bekleidung der Wände erfolgt im Bereich der Vorsatzschalen mit Lehmbauplatten. Diese gelten in der Herstellung als ökologische Alternative zu Gipswerkstoffen. Die Bekleidung der nicht tragenden Innenwände erfolgt mit Gipskartonplatten. Die Wahl des Dämmstoffs fällt für die Vorsatzschalen und nicht tragenden Innenwände auf Zellulosedämmung. Im Bereich der Außenwände wird das Holzständerwerk der Dämmebene mit Steinwolle ausgefacht. Zum Laubengang werden aufgrund der Brandschutzbestimmungen an dem Fluchtweg mineralische Putzträgerplatten verwendet. Die Aufdachdämmung besteht aus mineralischen Schaumglas-Dämmplatten. Die Fassadenbekleidung ist größtenteils aus unbehandelter Holzschalung. Für die Fenster werden Holzfenster gewählt.

Tabella 7-6: Holzriegelhof - Bewertung der ökologischen Baustoffwahl

<b>Kriterium: Ökologische Baustoffwahl</b>		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Fußbodenaufbau	Bodenbelag aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/0,5
	Alternativen zu mineralisch gebundener Schüttung	0,25/0,5
	Alternativen zu mineralischer Trittschalldämmung	0/0,5
	Alternativen zu Zementestrich	0/0,5
Raumseitige Bekleidung	Raumseitige Bekleidungen aus Holzwerkstoff oder Lehm	0,5/1
Dämmstoffe	Verwendung biogener Dämmstoffe	0,5/1
Fassadenbekleidung	Fassadenbekleidung aus nachwachsenden Rohstoffen	0,5/1
Fenster	Holzfenster	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,25/6</b>

### 7.2.2. Analyse- Long-Use

#### *Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart*

Innerhalb der Nutzungseinheiten befinden sich keine tragenden Innenwände. Die tragende Mittelachse besteht aus Einfeldträgern. Diese überspannen jeweils ein Rasterfeld. Der Anschluss der nicht tragenden Innenwände in Trockenbauweise erfolgt problemlos an der Decke, aber mit den bereits bekannten Herausforderungen im Sockelbereich, da die Anschlüsse durch den Fußbodenaufbau gehen. Hier ist jedoch angedacht, nicht tragende Innenwände auf dem Estrich zu platzieren, um eine Beschädigung des Fußbodenaufbaus bei

einem Umbau des Wohnungsgrundrisses zu vermeiden. Möglicherweise können hier Positionen vordefiniert werden, an denen ein Wandanschluss auf dem Estrich möglich ist. In einer 80 m<sup>2</sup> großen Wohneinheit im Bereich der südseitigen Fassade sind Anschlussmöglichkeiten vorhanden, um Platz für zwei oder drei Schlafzimmer zu schaffen. Die Erschließung der Wohneinheiten über den langen Laubengang erlaubt auch eine Unterteilung in kleinere Wohneinheiten. Aus dem Gebäuderaster von knapp 5,0 mal 5,0 m ergibt sich auch, dass die entstehenden Räume in etwa dieses Raster aufweisen und für unterschiedliche Nutzungen geeignet sind. Zudem sind die Grundrisse so konzipiert, dass der nordseitige Wohnungsbereich als Wohnküche mit Badzugang fungiert und alle Räume südlich der Mittelachse separate Zugänge haben, sodass außer dem Wohnzimmer keine Durchgangszimmer entstehen. Die großen Einheiten mit 80m<sup>2</sup> Wohnfläche weisen alle zwei Steigzonen auf, sodass eine Unterteilung in kleinere Einheiten theoretisch möglich ist.

Tabelle 7-7: Holzriegelhof - Bewertung Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Größtenteils nicht tragende Innenwände innerhalb einer Nutzungseinheit > 80 %	1/1
	Anschlüsse von leichten Innenwänden ohne Eingriff in Fußbodenaufbau und Decke	0,5/1
	Anschlussmöglichkeit von Innenwänden in geringen Abständen in der Fassade	1/1
Erschließung	Erschließung kleiner voneinander unabhängige Einheiten, z. B.: zwei Eingangsmöglichkeiten	1/1
Grundriss	Nutzungsneutrale Räume, circa 3 x 3m bis 5 x 5m	1/1
Versorgung	Mehrere Steigzonen je Einheit ermöglichen Teilung in kleinere Einheiten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

#### *Umnutzung für eine andere Nutzungsart*

Innerhalb der aktuellen Nutzungseinheiten können alle Wände zurückgebaut werden, jedoch ist es aufgrund ihrer Funktion als Aussteifung nicht möglich, die Wohnungstrennwände umfangreich zu öffnen. Hier ist geplant, in den oberen beiden Geschossen in bestimmten Wohnungstrennwänden bereits zu Beginn Öffnungen auszuschneiden, die später als Durchgangstüre dienen und so den Zusammenschluss zweier Nutzungseinheiten ermöglichen. Da die Wohnungstrennwand beidseitig verkleidet ist, entsteht kein Schallschutz- oder Brandschutzproblem. So werden die zusammenschließbaren Clusterwohnungen ermöglicht. In den anderen Geschossen muss eine mögliche Umnutzung innerhalb der bestehenden Größen der Nutzungseinheiten stattfinden. Das Gebäude wurde im Rahmen einer Vorstatik bemessen, sodass eine Umnutzung von Wohnen zu Büronutzung in allen Einheiten möglich ist. Die Holztafelbaufassade hat einen Stützabstand von bis zu 2,0 m, sodass innerhalb dieses Abstandes ein Umbau der Belichtungsflächen möglich ist. Die demontierbaren Balkone und Pflanzenkästen an der Fassade bieten zusätzliche Umgestaltungsmöglichkeiten.



Die lichte Raumhöhe beträgt in den Regelgeschossen 2,92 m, sodass eine Büronutzung der Räume möglich ist. Die Gebäudetiefe beträgt 9,60 m und liegt damit knapp unterhalb des definierten Bewertungsbereichs. Die Bruttogeschossfläche je Erschließungskern und Stockwerk liegt bei circa 500 m<sup>2</sup>. Bei der Planung des Gebäudes wurde auf die Lage der Schächte geachtet, sodass diese geschossweise zugänglich sind. Zudem wird der Versorgungsgang im Keller mit ausreichend Platzreserven und guter Zugänglichkeit geplant. In den vom Innenhof aus ebenerdig zugänglichen Technikräumen im Untergeschoss sind auch Platzreserven eingeplant. Diese Maßnahmen ermöglichen im Zuge einer Umnutzung Erweiterungen, Anpassungen oder Umbauten der Haustechnikanlagen.

Tabelle 7-8: Holzriegelhof - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart

<b>Kriterium:</b> Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Tragwerk	Nutzungsneutrales Tragwerk, größtenteils nicht tragende Innen- und Trennwände > 80 %	0,5/1
	Tragreserven, Nutzlast > 2 kN/m <sup>2</sup> auf 50 % der Bruttogrundfläche	0,5/0,5
	Fassade austauschbar, ermöglicht z. B.: Vergrößerung der Belichtungsfläche	0,5/0,5
Geometrie	a) Raumhöhe > 2,50 m b) Raumhöhe > 2,75 m c) Raumhöhe > 3,00 m	a) 0/0,5 <b>b) 0,75/0,75</b> c) 0/1
	a) Gebäudetiefe: 10,00 m < Tiefe < 16,50 m b) Gebäudetiefe: 11,50 m < Tiefe < 13,50 m	a) 0/0,5 b) 0/1
Erschließung	a) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 600 m <sup>2</sup> b) Bruttogrundfläche je Erschließungskern < 400 m <sup>2</sup>	<b>a) 0,5/0,5</b> b) 0/1
	Versorgung	Möglichkeit zur Erweiterung Haustechnischer Anlagen, z. B.: Platzreserven in Technikräumen und Schächten
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,75/6</b>

### Nutzungsvielfalt

Der Holzriegelhof befindet sich in einer belebten Gegend. Direkt vor dem Gebäude befindet sich eine Bushaltestelle. Des Weiteren befindet sich eine Straßenbahnhaltestelle in der Nähe. Das Umfeld bietet neben einer guten öffentlichen Verkehrsanbindung zahlreiche Nutzungsarten. Es befinden sich neben Wohngebäuden viele Geschäftslokale, Gewerbe- und Büroflächen sowie Lebensmittelgeschäfte und Gastronomie in unmittelbarer Nähe zum Projekt. Darüber hinaus gibt es ein gutes Angebot an Bildungseinrichtungen. Der Wohnungsspiegel beinhaltet 1-Zimmer- bis 4-Zimmer-Wohnungen und bei einem Umbau zu den Wohngemeinschaften sogar 6- oder 7-Zimmer-Wohnungen. Neben einem breiten Wohnungsspiegel bietet das Gebäude mit der Gastronomie- und Gewerbenutzung in der Sockelzone und der Büronutzung im kurzen Gebäudeknick ein breites Spektrum an Nutzungsarten an. Das Baufeld ist in der Fläche größtenteils ausgenutzt, sodass keine nennenswerten Reserven vorhanden sind, um das Gebäude horizontal zu erweitern. Laut Bebauungsplan kann auf dem Grundstück bis zu 21 m Höhe gebaut werden. Aktuell weist die Oberkante der Rohdecke im Obergeschoss eine Höhe von 17 m auf, sodass die Erweiterung um ein Stockwerk nach aktuellem Bebauungsplan möglich ist. Auch die

Brandschutzbestimmungen würden sich bei der Erweiterung um ein Stockwerk und bei einer neuen Höhe von 21 m nicht ändern.

Tabelle 7-9: Holzriegelhof - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit

<b>Kriterium:</b> Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Standortqualität	Bewertung der öffentlichen Verkehrsanbindung	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten im Projektumfeld, mind. Wohnen + Büro + Gewerbe + Gastro	1/1
Nutzungsvielfalt	Breiter Wohnungsspiegel mit Wohnungen von 1 bis 4 Zimmern	1/1
	Verschiedene Nutzungsarten innerhalb des Projekts, mind. Wohnen + Büro / Gewerbe / Gastro	1/1
Erweiterbarkeit	Horizontale Erweiterbarkeit durch Reserveflächen	0/1
	Vertikale Erweiterbarkeit	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4,5/6</b>

#### Langlebigkeit Holztragwerk

Alle tragenden Bauteile aus Holz sind vor freier Bewitterung geschützt. Im Bereich der beiden Durchgänge im Erdgeschoss befinden sich jedoch Holzstützen, die überdacht und somit vor Bewitterung geschützt sind, sich jedoch nicht innerhalb der thermischen Gebäudehülle befinden. Im Bereich der Fassade bilden Tragwerk und Gebäudehülle einen Bauteil. Durch einen additiven Aufbau und geschraubte Verbindungen lassen sich einzelne Bauteilschichten austauschen. Bei der Robustheit des Tragwerks wurde darauf geachtet, Verformungen zu minimieren, indem die vertikale Lastweiterleitung von Bauteil zu Bauteil immer direkt in der Faserrichtung geschieht. Zudem wurde bei der Bemessung eine erhöhte Nutzlast angenommen. Eine Sichtkontrolle des Tragwerks ist in der Mittelachse des Gebäudes, im Erdgeschoss sowie bei sämtlichen Decken möglich. Im Bereich der Außenwände und Wohnungstrennwände kann aufgrund der Bekleidung keine direkte Sichtkontrolle erfolgen.

Tabelle 7-10: Holzriegelhof - Bewertung Langlebigkeit des Tragwerks

<b>Kriterium:</b> Langlebigkeit des Tragwerks		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Witterungsschutz	Keine freie Bewitterung tragender Holzbauteile	1/1
	Alle tragenden Holzbauteile innerhalb der thermischen Gebäudehülle	0,5/1
Trennung Tragwerk und Gebäudehülle	a) Trennbare Bauteilschichten b) Getrennte Bauteile	a) 1/1 b) 0/2
Robustheit	Tragwerksreserven, Maßnahmen zur Verringerung von Setzungen, etc.	1/1
Zugänglichkeit	Einfache optische Kontrollmöglichkeit tragender Bauteile	0,5/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,5/6</b>

### *Austausch und Reparatur*

Im Bereich der Haustechnik ist eine durchgängige Zugänglichkeit der Leitungen, sowohl im Untergeschoss als auch geschossweise, gegeben. Die Platzierung der Steigschächte in Bad- und Küchennähe sorgt für eine Minimierung der horizontalen Leitungswege. Somit müssen Frisch- und Abwasserleitungen innerhalb der Wohnungen nur über kurze Strecken verlegt werden. Die Versorgung der Räume mit Elektrizität erfolgt über in Vorsatzschalen der Wände verlegte Leitungen, sodass hier eine relativ einfache Zugänglichkeit gewährleistet ist. Einzig die Fußbodenheizung in Verbindung mit dem Zementestrich ermöglicht keine einfache Zugänglichkeit für Reparatur- oder Austauscharbeiten. Nur die Decke über dem Erdgeschoss ermöglicht aufgrund der tragenden Holz-Lehm-Verbundelemente einen anderen Deckenaufbau mit geringeren Schallschutzanforderungen, sodass der Fußbodenaufbau trocken erfolgt und folglich auch Reparatur- und Austauscharbeiten ermöglicht.

Auf der Südseite ist die Fassade vollständig zerlegbar aufgebaut und ermöglicht auch den Austausch einzelner Schichten. Die Balkenelemente lassen sich entfernen, die Schalung der Fassade ist sichtbar verschraubt und somit lösbar. Die Winddichtung wird punktuell verklammert und größtenteils durch die verschraubte Unterkonstruktion der Fassadenschalung fixiert. In der Mitte der Wand befinden sich das Ständerwerk und die Dämmebene. Diese werden beidseitig mit verschraubten Brandschutzbekleidungen geschützt. Raumseitig erfolgt eine Installationsebene mit Holzständern und eine raumseitige Bekleidung aus Lehmbauplatten, wobei hier aufgrund des notwendigen Lehmputzes fraglich ist, ob die schadensfreie Rückbaubarkeit der raumseitigen Bekleidung möglich ist. Im Bereich des Laubengangs wird die Fassade zum Laubengang hin verputzt. Dieser wird auf eine Putzträgerplatte aufgebracht. Dabei ist aufgrund der verdeckten Befestigungsmittel und des vollflächig aufgetragenen Putzes keine schadensfreie Demontage möglich. Aufgrund der tragenden Eigenschaft können weder bei der Süd- noch bei der Nordfassade ganze Fassadenelemente ausgebaut werden. Die Rückbaubarkeit der Innenwandaufbauten hängt wiederum maßgeblich davon ab, ob eine Platzierung der Innenwand auf dem Estrich möglich ist. In diesem Fall ist der Rückbau des Fußbodenaufbaus nicht notwendig, um eine nicht tragende Wand zu versetzen, auszubauen oder einzuziehen. Dies ist ausschließlich für Wände denkbar, die keine Einheiten voneinander trennen. Der schadensfreie und punktuelle Rückbau der Fußbodenaufbauten ist aufgrund des Heizstrichs nicht möglich. Die Wandoberflächen

können durch Anstreichen erneuert werden, während die Fußbodenoberflächen des Parketts durch Abschleifen oder gezielten Austausch erneuert werden können.

Tabelle 7-11: Holzriegelhof – Bewertung Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau

<b>Kriterium:</b> Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Haustechnik	Zugänglichkeit der vertikalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Minimierung der horizontalen Versorgungsleitungen	0,5/0,5
	Zugänglichkeit der horizontalen Versorgungsleitungen	0,25/0,5
Gebäudehülle und Sekundärstruktur	Austausch einzelner Komponenten der Fassade durch schadensfreie Lösbarkeit und Zugänglichkeit	0,5/1
	Schadensfreie Lösbarkeit ganzer Fassadenelemente	0/0,5
	Rückbaubare Innenwandaufbauten (nicht tragend) ohne Beschädigung benachbarter Bauteile	1/1
	a) Schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten b) Punktuell schadensfrei rückbaubare Bodenaufbauten	a) 0/0,5 b) 0/1
Oberflächen	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Wand), z. B.: durch Anstrich	0,5/0,5
	Einfach zu erneuernde Oberflächen (Bodenbelag), z. B.: durch trocken verlegtes Parkett	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>3,75/6</b>

### 7.2.3. Analyse- Re-Use & Recycle

#### *Wiederverwendungspotenzial*

Das Tragwerk ist in Abbildung 7-23 schematisch dargestellt. Darauf ist zu erkennen, dass das Gebäude aus vier unabhängigen Baukörpern besteht. Einmal der langgezogene Gebäudeteil entlang der Inzersdorferstraße in Ost-West-Richtung, der schräg daran angebaute Gebäudeknick mit dem Bürotrakt sowie die beiden frei stehenden und über den Laubengang verbundenen Türme im Innenhofbereich. Dabei findet eine Wiederholung von Bauteiltypen innerhalb der Baukörper statt, wie die Wohnungstrennwände, Stützen und Träger sowie Außenwände und Treppenhauskerne im Hauptbaukörper. Diese wiederholen sich innerhalb eines Stockwerks sowie geschossweise. Die Wiederholung von Bauteilen findet zudem auch bauteilübergreifend statt. So werden beispielsweise die angestellten Türme im Innenhof mit denselben Außenwandelementen wie der Hauptbaukörper ausgeführt. Dies führt zur Reduktion der Bauteiltypen.

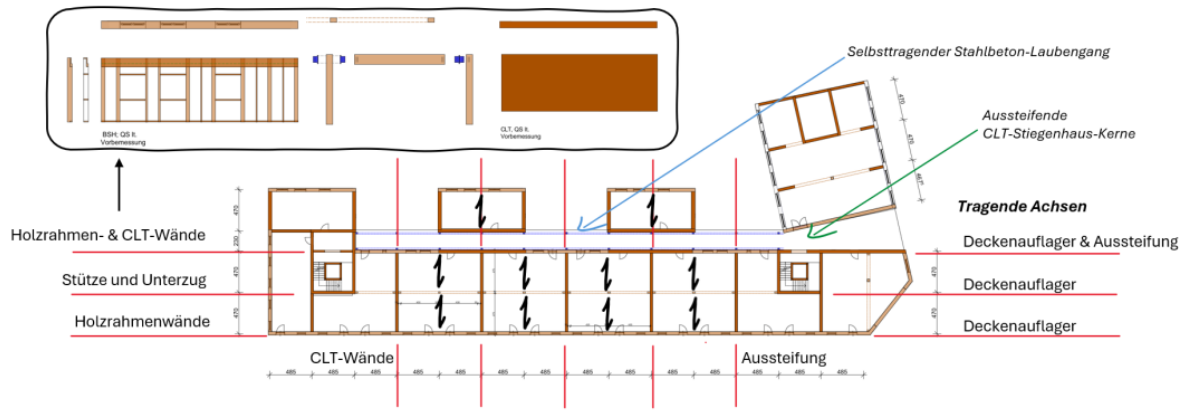


Abbildung 7-23: Holzriegelhof - Schematische Darstellung Tragwerk (aus [149])

Im Bereich des Ausbaus findet eine klare Trennung zwischen der Primär- und Sekundärbeziehungsweise Tertiärstruktur statt. So sind innerhalb der Wohneinheiten das Tragwerk und andere Funktionen wie Raumteilung oder das Führen der Versorgungsleitungen voneinander getrennt. Im Bereich der aussteifenden Wohnungstrennwände erfüllt das Tragwerk zusätzlich eine raumtrennende Funktion. Im Bereich der Fassade erfüllt das Tragwerk auch die Funktion der Gebäudehülle.

Bei der Nachvollziehbarkeit der Belastung wurde beim Tragwerksentwurf Wert darauf gelegt, nachvollziehbare Lastpfade und Belastungen zu erzeugen. So wurde im Bereich der Fassade größtenteils auf Holztafelbauwände gesetzt, in welcher wenige BSH-Stützen den Lastabtrag übernehmen. Gleichzeitig wurde eine direkte Kraftweiterleitung von Stütze zu Stütze im Bereich der Stockwerkstöße gewählt. Im Bereich der Mittelachse werden Einfeldträger gewählt. Diese lagern im Randbereich der Wohnung nicht auf den Wohnungstrennwänden, sondern auf eigenen Stützen. Die Stützen der Mittelachse leiten ihre Lasten wiederum in einem direkten Stoß in die darunterliegende Stütze ein. So lässt sich ein Großteil des vertikalen Lastabtrags mit einfacher Stabstatik berechnen. Zudem werden Sprünge und Auskragungen vermieden und die Bauteile stets übereinander platziert. Der Einsatz von BSP-Wänden wurde möglichst gering gehalten. Hier wurde zudem darauf geachtet, dass die Wände eine geringe Anzahl an Öffnungen aufweisen.

Tragwerk und Gebäudehülle bestehen vollständig aus vorgefertigten Elementen. Die Holztafelbauwände und Massivholzwände sollen bis auf die raumseitige Installationsebene vorgefertigt werden. Die aussteifenden BSP-Wände werden im Werk für die Verzahnung vorbereitet und bereits mit Brandschutzbekleidungen versehen. Bei den Stützen und Trägern werden im Werk die Stahlbauteile vormontiert. Die Wiederholung der Bauteiltypen und die Kombination der Bauteiltypen an verschiedenen Stellen des Gebäudes weisen auf die Modularität der Bauteile, Bauelemente und Komponenten hin. Die Leichtigkeit ist bei den tragenden Bauteilen aus Holz ebenfalls gegeben. Der Laubengang aus Stahlbeton kann auch als modular angesehen werden, da hier vorgefertigte Stützen und Platten auf der Baustelle zusammengesteckt werden. Auch hier wiederholen sich die Bauteile.

Sämtliche tragenden Bauteile weisen eine gute Nutzungsneutralität auf und können zum selben Zweck wiederverwendet werden. Dabei weist die Fassade eine hohe Anpassbarkeit auf und kann aufgrund der großen Stützenabstände und der modular anbaubaren Balkone und Pflanzentröge sehr gut an neue Nutzungen angepasst werden. Andere Bauteile wie die BSP-Decken und Wände können neben einer Wiederverwendung auf Bauteilebene auch zerlegt werden, sodass das tragende Bauelement aus BSP in einem anderen Tragwerk eingesetzt werden kann.

Das Gebäuderaster wird für alle Baukörper bis auf den Bürotrakt gleich ausgeführt. Dies führt zu gleichen Abmessungen und somit Standardisierung in den Fassadenelementen, Wohnungstrennwänden, Stützen und Trägern sowie den Deckenelementen.

Tabelle 7-12: Holzriegelhof – Bewertung Wiederverwendungspotenzial

Kriterium: Wiederverwendungspotenzial		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Einfachheit der Konstruktion	Reduktion tragender Bauteile und Bauteiltypen	1/1
	Klare Trennung des Tragwerks von Sekundär- und Tertiärstruktur	0,5/1
	Nachvollziehbarkeit der Belastung tragender Bauteile	1/1
Modularität und Standardisierung	Modulare Bauweise, Vorfertigung und Leichtigkeit der Elemente	1/1
	Nutzungsneutrale tragende Bauteile	1/1
	Standardisierte Raster und Bauteile	1/1
Gesamtbewertung		5,5/6

#### Demontierbare Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauteilen

Zur Erreichbarkeit der Verbindungsmittel in den Bauteilknoten müssen die darüberliegenden, im Zuge des Ausbaus hergestellten Oberflächen rückbaubar sein. Die betrifft neben den Decken- und Dachaufbauten auch die Wandverkleidungen. Sowie die Bauteilstöße im Fassadenbereich. Die Deckenaufbauten bestehen bis auf den Zementestrich aus trocken verlegten Komponenten. Der Rückbau des Zementestrichs ist zeitaufwändig und geht nicht ohne Beschädigung der Fußbodenheizung und der darunterliegenden Trittschalldämmung, er ist jedoch grundsätzlich möglich. Dabei werden vor allem keine tragenden Bauelemente beschädigt. Der Fußbodenaufbau der Holz-Lehm-Rippendecke ist trocken verlegt und kann somit einfach schichtweise rückgebaut werden, ohne die einzelnen Komponenten zu beschädigen. Der Dachaufbau erfolgt mit vollständig trocken verlegten Komponenten. Dazu werden die Abdichtungen in der Attika geklemmt und wie auch die trocken verlegten Schaumglasdämmplatten über das Gewicht der Kiesschüttung und des Pflanzensubstrats vor Aufschwemmen oder Windsog gesichert. Die Vorsatzschalen bestehen aus einer Dämmebene, in der sich auch eine verschraubte Unterkonstruktion befindet, sowie den darauf verschraubten raumseitigen Verkleidungen aus Lehmbauplatten. Grundsätzlich ist diese Konstruktion leicht rückbaubar. Durch ein Verputzen der Oberfläche werden jedoch die Schraubenköpfe verdeckt, sodass ein Rückbau nicht schadensfrei erfolgen kann.

Im Bereich der aussteifenden Wände werden Verzahnungen zur Schubkraftübertragung sowie wenige eingelassene Gewindestangen zur Übertragung der Zugkräfte und Lagesicherung verwendet (siehe Abbildung 7-15). Sämtliche Verbindungsmittel sind dabei so positioniert, dass sie leicht aufzufinden und zu erreichen sind. Im Bereich der Holztafelbauwände findet die Lagesicherung im Wandsockel mit Stahlwinkeln am Ständerwerk statt, sodass die Position des Verbindungsmittels bekannt ist. Auffindbarkeit und Erreichbarkeit sind hier gegeben. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Wandelementen im vertikalen Wandstoß erfolgen

idealerweise von der Außenseite, wo die geschraubte Fassadenschalung einfach abnehmbar ist. Hier könnten zum einen wieder die Hartholz-Schwalbenschwanzverbinder genutzt werden, wenn Schubkräfte in dem Bauteilstoß übertragen werden, oder einfache kreuzweise Verschraubungen zur Lagesicherung. Dabei ist bei der Verschraubung wieder auf eine genaue Dokumentation der Lage zu achten. Die Lagesicherung der Decke zu den Holztafelbauwänden erfolgt mittels schräger Verschraubung. Bei der Positionierung ist hier während der Bauarbeiten eine genaue As-Build-Dokumentation notwendig. Als Verbindungsmittel zwischen den Deckenelementen kommen Hartholz-Schwalbenschwanzverbinder zum Einsatz. Deren Position ist leicht zu erkennen und zudem aufgrund der Produktionsdaten der Deckenelemente nachvollziehbar. Die Verbindungsmittel im Stützenknoten sind zum Teil sichtbar (Passbolzen Stütze-Träger) und zum Teil vom Fußbodenaufbau verdeckt (Passbolzen Stütze-Stütze), aber leicht auffindbar.

Die Lösbarkeit der Verbindungsmittel wird als gut beurteilt. Der aussteifende Wandstoß erfolgt mit einer Verzahnung und Lagesicherung aus Passbolzen. Beides lässt sich schadensfrei lösen und wiederverwenden. Die Lagesicherung der Holztafelbauelemente erfolgt mit lösbaren Winkelverbindungen (die Gewindestange wird in die Gewindemuffe der Decke eingeschraubt und am Winkel mit einer Mutter fixiert) zwischen Decke und Wandsockel. Und mit Verschraubungen zur Lagesicherung zwischen Decke und Deckenaufleger. Beide Verbindungen sind schadensfrei lösbar, die Winkelverbindung sogar wiederverwendbar. Die Verschraubungen zur Lagesicherung im vertikalen Wandstoß sind im Allgemeinen wieder lösbar, möglicherweise aber nicht wiederverwendbar. Die Hartholz-Schwalbenschwanzverbinder zwischen den Deckenelementen lassen sich schadensfrei lösen und wiederverwenden. Dasselbe gilt für die Holz-Stahlblech-Verbindung und die Holz-Holz-Verbindung mit Passbolzen im Stützenknoten. Die Fertigteile des Laubengangs können mit Montagenocken und Verschraubungen in ihrer Lage gesichert werden. Aufgrund des Gewichts des Stahlbetons sind keine weiteren Maßnahmen zur Lagesicherung notwendig. Die Aussteifung erfolgt durch den punktuellen Anschluss an den Holzbau mit Verschraubungen. Somit ist der Laubengang schadensfrei lösbar und wiederverwendbar.

Durch die Verwendung von Kontaktverbindungen zur Schubkraftübertragung in der Gebäudeaussteifung sowie die Verwendung von Hartholz-Schwalbenschwanzverbindern zur Herstellung der Scheibenwirkung in der Decke kann die Anzahl der Verbindungsmittel deutlich reduziert werden. Die verwendeten Verbindungsmittel lassen sich auch mit einfachen Werkzeugen und Geräten lösen.

Tabelle 7-13: Holzriegelhof – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Demontierbarkeit der Bauteile		
<b>Messgröße</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Punkte</b>
Erreichbarkeit der Verbindungen	Rückbaubarkeit des Ausbaus und der der Sekundärstruktur	1/1
	Positionierung der Verbindungsmittel	1/1
Trennbarkeit der Verbindungsmittel	a) Teilweise schadensfrei lösbare Verbindungen b) Größtenteils schadensfrei lösbare und wiederverwendbare Verbindungen	a) 0/1 <b>b) 2/2,5</b>
Reduktion des Rückbauaufwands	Reduktion der Verbindungsmittelanzahl	1/1
	Rückbau mit einfachen Geräten möglich	0,5/0,5
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>5,5/6</b>

#### *Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils*

Im Entwurf wird vollständig auf verklebte, geklammerte oder genagelte Verbindungen verzichtet. Einzige Ausnahmen bilden hier der gegossene Zementestrich. Die punktuell geklammerte Folie im Wandaufbau, sowie die Verbindung zwischen der Putzträgerplatte und dem Putz im Bereich des Laubengangs. Für die Befestigung der Brandschutzbekleidungen, Unterkonstruktionen und Schalungen werden stets sichtbare Verschraubungen gewählt. Einzig die raumseitigen Oberflächen weisen keine sichtbaren Schraubenköpfe auf. Aufgrund der Vorsatzschalen zur Leitungsführung und zum Schallschutz weisen sowohl die Außenwände als auch die Wohnungstrennwände einen vielschichtigen Bauteilaufbau aus. Dieser ist allerdings additiv, sodass bei jedem Bauteil eine tragende Kernschicht durch direkte Brandschutzbekleidung geschützt wird. Innen- und außenseitig erfolgt dann der weitere Bauteilaufbau mit den entsprechenden Bekleidungen und Vorsatzschalen. Der Deckenaufbau weist eine im Holzbau gewöhnliche Anzahl an Schichten auf.

Die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel wird als grundsätzlich gut eingestuft. Dabei ist zu beachten, dass die raumseitigen Verschraubungen der Wandbekleidung verspachtelt beziehungsweise verputzt und gestrichen werden, sodass hier die Erreichbarkeit nicht mehr gegeben ist. Sämtliche dahinterliegenden Schichten sowie die außenliegenden Schichten im Bereich der Holzschalung weisen sichtbare Schraubenköpfe auf und sind leicht zu erreichen. Da die Wandbekleidungen nicht zur Aussteifung verwendet werden, kann die Verbindungsmittelanzahl zur Befestigung der Bekleidungen reduziert werden. Im Fußbodenaufbau erfolgt die Verbindung durch Schichten, sodass hier keine Verbindungsmittel eingesetzt werden.

Die Nutzungsneutralität der Bauelemente und Komponenten wird als gut eingeschätzt. Insbesondere die tragenden Komponenten, welche einen hohen Werterhalt bei der Wiederverwendung auf Komponentenebene besitzen, sind vollständig schadensfrei von den Bekleidungen lösbar. Hier fallen im Bereich der Außenwände BSP-Elemente mit wenigen Öffnungen und die Stützen und Auflager der Holztafelbaukonstruktion an. Im Bereich der Wohnungstrennwände fallen öffnungsfreie BSP-Elemente an, ebenso wie im Bereich der Decken.



Tabelle 7-14: Holzriegelhof – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile

<b>Kriterium:</b> Trennbarkeit innerhalb eines Bauteils		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Verbindungen zwischen Komponenten	Verzicht auf verklebte, geklammerte und genagelte Verbindungen	1,5/2
	Reduktion der Bauteilschichten	0/1
	Gute Erreichbarkeit der Verbindungsmittel	0,5/1
	Geringe Anzahl der Verbindungsmittel	1/1
Wiederverwendungspotenzial	Nutzungsneutrale Bauelemente und Komponenten	1/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>4/6</b>

### Informationsverfügbarkeit

Da es sich um einen Entwurf im Rahmen einer Wettbewerbsabgabe handelt, kann diese Kategorie nicht aussagekräftig bewertet werden. Dieser Entwurf beinhaltet keine vollständige Planung in BIM, keine Ausführungsdokumentation und keine Erfassung in einer Bauteildatenbank. Im Zuge der Tragwerksplanung wurden für die einzelnen Verbindungen Überlegungen zu Demontage und Rückbau angestellt. Eine Validierung an einem Prüfkörper war nicht Bestandteil des Entwurfs.

Tabelle 7-15: Holzriegelhof – Bewertung Informationsverfügbarkeit

<b>Kriterium:</b> Informationsverfügbarkeit		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Digitales Gebäudemodell	BIM-Modell – Digitaler Zwilling	-/2
	Erfassung in Bauteildatenbank zur Wiederverwendung	-/1
Rückbaukonzept	Rückbau- und Demontagekonzept	-/2
	Mock-Up / Prüfkörper zur Erprobung von Rückbauszenarien	-/1
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>-/6</b>

### Materialrecycling

Das Holztragwerk besteht aus Holztafelbauwänden, BSP-Wänden und BSP-Decken sowie BSH-Stützen und Trägern. In den vorhergehenden Kriterien wurde geklärt, dass das Tragwerk sich sowohl auf der Bauteil- als auch auf der Bauelement- und Komponentenebene zur Wiederverwendung eignet. Sollte diese nach mehreren Wiederverwendungszyklen nicht mehr möglich sein, können die Bauelemente und Komponenten sortenrein getrennt werden. Dies wurde ebenfalls in einem vorhergehenden Kriterium erläutert. Die sortenreinen

Holzkomponenten weisen alle einen Klebstoffanteil auf, sodass eine direkte Kompostierung ausgeschlossen wird. Stattdessen kann jedoch eine Kaskadennutzung stattfinden.

Im Fassadenaufbau ist südseitig eine vollständige sortenreine Zerlegung möglich. Nordseitig lässt sich der Putz nicht sortenrein von den Putzträgerplatten trennen. Für die übrigen Bauteilschichten der nordseitigen Außenwände wird eine sortenreine Trennung als möglich angesehen. Die Komponenten werden wie folgt eingestuft: Die raumseitige Bekleidung aus Lehm- oder Gipsbauplatten kann nicht schadensfrei rückgebaut werden, da die Schraubenköpfe verdeckt sind. Die Platten lassen sich jedoch in Kombination mit einem Lehmputz hochwertig und auf derselben Qualitätsstufe recyceln [50]. Die Zellulosedämmung im Bereich der Vorsatzschalen stammt aus einer Kaskadennutzung und stellt für gewöhnlich deren letzte Stufe dar, sodass am Ende der Lebensdauer eine Kompostierung erfolgt [19]. Das Recyclingpotenzial der Gipsfaserplatten sowie der Mineralwoll- oder Glasdämmung ist bereits aus den vorherigen Analysen bekannt. Ebenso wie die Fähigkeit zur Kaskadennutzung oder Wiederverwendung der unbehandelten Holzschalung. Die Putzträgerplatten und der darauf aufgetragene Putz lassen sich nicht rückstandsfrei voneinander trennen, sodass ein hochwertiges Recycling kritisch gesehen wird.

Im Dachaufbau werden lose verlegte Folien und Schaumglasdämmplatten verwendet und vom Dachsubstrat beschwert. Der Rückbau kann sortenrein erfolgen, sodass die Schaumglasplatten wiederverwendet und ohne Qualitätsverlust wiederverwertet [50] werden können.

Die Innenwandaufbauten werden aus Gipskartonplatten auf Metallunterkonstruktion und einer Zellulosedämmung hergestellt. Dabei ist die Gipskartonplatte wieder theoretisch sehr gut wiederverwertbar, auch wenn dies nicht in der Praxis umgesetzt wird. Die Zellulosedämmung lässt sich wiederverwenden, wenn sie keinen Feuchteintrag erfährt. Ansonsten kann sie kompostiert werden. Die Metallunterkonstruktion ist sehr gut recyclebar. Bei den Deckenaufbauten ist der Zementestrich nur schwer von den Rohren der Fußbodenheizung zu trennen. Hier wird ein hochwertiges Recycling verhindert. Die mineralische Trittschalldämmung wird beim Rückbau beschädigt, sodass eine Wiederverwendung nicht möglich ist. Durch die Trennfolie zum Zementestrich liegt sie jedoch sortenrein vor. Ein Recycling ist heute nicht der Stand der Praxis. Es existieren aber zum Teil Herstellerrücknahmen mit anschließender Rückführung in die Produktion bei Produktionsabfällen [21]. Die Beschwerung aus Lehm- oder Gipsbausteinen kann wiederverwendet oder für die Herstellung anderer Produkte aus Lehm recycelt werden.

Die Fußbodenaufbauten der Holz-Lehm-Verbund-Rippendecken können aufgrund des guten Schallschutzes der tragenden Deckenbauteile trocken verlegt werden. Somit ist eine sortenreine Trennung des Aufbaus möglich. Das bedeutet, dass die Trockenestrichplatten aus Gips und die Trittschalldämmplatten entweder wiederverwendet oder wiederverwertet werden können. Die Blähtonfüllung lässt sich wiederverwenden.

Tabelle 7-16: Holzriegelhof – Bewertung Materialrecycling

Kriterium: Materialrecycling		
Messgröße	Bewertung	Punkte
Recyclingfähigkeit Tragwerk	Tragende Bauteile und Bauteilelemente	1/2
Recyclingfähigkeit Gebäudehülle	Fassade	0,5/1
	Dachaufbau	1/1
Recyclingfähigkeit Ausbau	Innenwand	0,5/1
	Boden	0,5/1
Gesamtbewertung		3,5/6

#### 7.2.4. Auswertung Holzriegelhof

Im folgenden Abschnitt wird die Bewertung des Holzriegelhofs ausgewertet. Dabei sollen positive und negative Elemente des Entwurfs identifiziert werden und geringe Eingriffe vorgeschlagen werden, welche zur Verbesserung der Ergebnisse beitragen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-17 dargestellt.

Tabelle 7-17: Holzriegelhof - Auswertung

Themenfelder / Kriteriengruppen	Kriterien	Haus des Holzes	Bikes & Rails	Walden 48	Holzriegelhof
<b>1. Reduce</b>					
1.1. Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	3,5	5	4,5	5,5
	1.1.2. Nutzungsdichte	2	5,5	4	5
1.2. Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	0	0	0	3,5
	1.2.2. Reduktion des Stahlbetonanteils in Tragwerk und Gründung	3	1	2	4,5
	1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	5,5	3	3	3
	1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	4,75	2	4	3,25
<b>2. Long-Use</b>					
2.1. Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	5	4,5	5	5,5
	2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	5,5	4	4,75	3,75
	2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	3,5	4	3,5	4,5
2.2. Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	4,5	3,5	5,5	3,5
	2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	5,25	3,5	3,5	3,75
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>					
3.1. Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	5,5	4	3,5	5,5
	3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	5,5	3	2	5,5
	3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	5	3,5	2	4
	3.1.4. Informationsverfügbarkeit	5	3	1	-
3.2. Recycling	3.2.1. Materialrecycling	4	3,5	4	3,5

#### Positive Einflüsse

Der Entwurf des Holzriegelhofs schneidet bei der Bewertung des Flächenverbrauchs und der Nutzungsvielfalt sehr gut ab. Dafür sind vor allem das Angebot kleiner Wohnungen und die diversen Nutzungsangebote verantwortlich. In den Kriterien Bauteilwiederverwendung und Reduktion des Stahlbetonanteils schneidet der Entwurf im Vergleich zu den Referenzgebäuden deutlich besser ab. Das ist auf die Bestandsnutzung zurückzuführen. Für den Neubau war keine neue Unterkellerung und Gründung notwendig, da der Bestand lediglich punktuell ergänzt und ertüchtigt werden musste. Eine besonders gute Bewertung wird bei den Kriterien

Wiederverwendungspotenzial und Demontierbarkeit der Bauteile erzielt. Hierbei ist die Bewertung auf dem Niveau des Haus des Holzes. Bei den beiden Objekten kommen ähnliche Systeme zur Gebäudeaussteifung mittels Verzahnung zum Einsatz. Bei der Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart wird auch eine sehr gute Bewertung erzielt. Dies ist auf den Verzicht auf tragende Wände innerhalb der Nutzungseinheiten und die Möglichkeit zur Teilung der Einheiten durch eine flexible Erschließung über den Laubengang sowie eine flexible Versorgung über zwei Steigschächte zurückzuführen. Zudem wurden bereits Grundrisse für verschiedene Nutzungsszenarien samt Umbaumaßnahmen erarbeitet.

### *Negative Einflüsse*

Die aussteifenden Wohnungstrennwände in BSP-Bauweise wirken sich dagegen negativ auf die Umnutzung für andere Nutzungen aus. Hier ist die maximale Fläche, die pro Nutzungseinheit zur Verfügung steht, dadurch begrenzt. Es wurde ein Konzept erarbeitet, wie sich zwei Nutzungseinheiten in den beiden obersten Geschossen zusammenlegen lassen. Darüber hinaus können jedoch keine großen zusammenhängenden Nutzungseinheiten geschaffen werden. Daneben haben die Wohnungstrennwände in Massivholzbauweise auch negative Auswirkungen auf die Bewertung der Effizienz des Holzeinsatzes im Tragwerk.

Obwohl versucht wird, auf alternative ökologische Baustoffe wie Lehmbauplatten und Zellulosedämmungen zu setzen, kann dies nicht vollständig umgesetzt werden, da aus brandschutztechnischen Gründen im Bereich der tragenden Außenwand Mineralwolle verwendet wird. Der Brandschutz im Bereich der dem Laubengang zugewandten Fassade erfordert auch eine nicht brennbare Bekleidung, weshalb hier eine verputzte Oberfläche mit Putzträgerplatten verwendet wird. Diese wirken sich nicht nur negativ auf die Verwendung ökologischer Baustoffe aus, sondern auch auf die Reparaturfähigkeit, die Trennbarkeit der Bauteilschichten und das Materialrecycling. Aus Schallschutzgründen musste ein Fußbodenaufbau mit mineralischem Estrich gewählt werden. Dieser wirkt sich negativ auf die Verwendung ökologischer Baustoffe, die Umnutzung für eine andere Nutzung, die Reparaturfähigkeit, die Trennbarkeit der Bauteilschichten und das Materialrecycling aus.

### *Mögliche Eingriffe*

Ein möglicher Eingriff könnte eine Reduktion der aussteifenden Wohnungstrennwände sein. In Abbildung 7-24 ist das angepasste Tragwerk dargestellt. Dabei werden die zwei Wohnungstrennwände, die zusammen mit der Fassade zum Laubengang eine T-förmige Aussteifung bilden, beibehalten, während die weiteren Wohnungstrennwände nicht mehr aus BSP, sondern in Trockenbauweise erstellt werden. Die Aussteifung in Querrichtung wird nunmehr von den beiden Treppenhauskernen sowie den beiden verbliebenen Wohnungstrennwänden aus BSP hergestellt. Die auszusteienden Baukörper weisen dabei eine ähnliche Dimension wie beim Haus des Holzes (siehe Abbildung 6-2) auf. Durch die Reduktion der aussteifenden Trennwände können nun im Falle einer Nutzungsänderung in den Regelgeschossen drei Nutzungseinheiten mit Grundflächen von circa 170 bis 220 m<sup>2</sup> vermietet werden. Diese würden sich für Büronutzungen oder Ordinationen anbieten und die Umnutzbarkeit für eine andere Nutzung erhöhen.

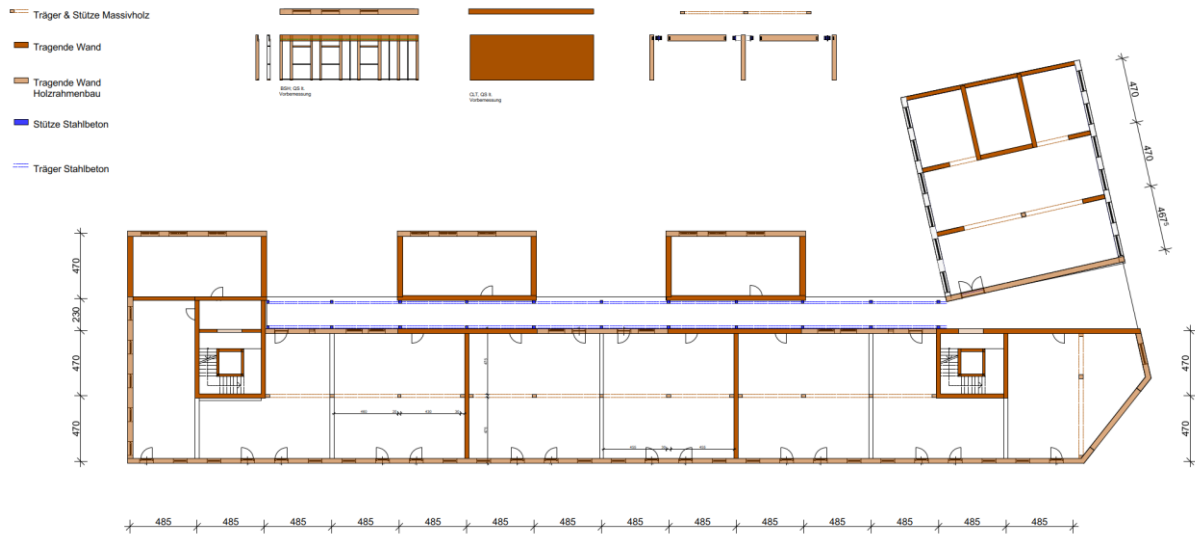


Abbildung 7-24: Holzriegelhof - angepasste Aussteifung (eigene Darstellung)

In Verbindung mit tragenden Holztafelbaufassaden ist die Dämmstoffauswahl aus Gründen des Brandschutzes begrenzt. So fallen viele biogene Dämmstoffe weg. Es existieren zugelassene Aufbauten mit Zellulosedämmstoff, diese weisen jedoch häufig als bedenklich eingestufte Borsalze als Zusatzstoffe für den Brandschutz auf [19]. Eine Änderung hin zu einer nicht tragenden Fassade durchzuführen, wird als zu weitreichend erachtet. An einer anderen Stelle kann eine Verbesserung an der Fassade erzielt werden. Im Bereich des Laubenganges ist aktuell eine Putzfassade vorgesehen, welche mehrere Probleme mit sich bringt. Eine alternative, nicht brennbare Oberfläche im Bereich der Laubengänge ist zum Beispiel mittels wiederverwendeter Metallverkleidungen, beispielsweise Recycling-Kupferblech, möglich. Dieses lässt sich schadensfrei lösen, sodass die Reparaturfähigkeit und Wiederverwendbarkeit positiv beeinflusst werden. Daneben ist eine hochwertige Wiederverwertung von Metallen möglich. Je nach Herkunft ist es sogar möglich, Kupferbleche aus 100 % wiederverwertetem Kupfer zu beziehen [19]. Die hohen Kosten und eine optische Auffälligkeit müssen dafür in Kauf genommen werden. Günstigere und optisch unauffälligere Alternativen stellen zum Beispiel Faserzementplatten dar. Diese sind jedoch nur bedingt zur Wiederverwendung und gar nicht zur Wiederverwertung geeignet.

Ein weiterer großer Einflussfaktor wurde nach der Analyse des Holzriegelhofs im Bereich des Fußbodenaufbaus ausgemacht. Hier ist insbesondere der Vergleich zum Haus des Holzes interessant, welches einen innovativen Fußbodenaufbau aus Buchenholzriemen aufweist. Dieser Fußbodenaufbau ist aus ökologischen Baustoffen und ermöglicht einen schadensfreien und kleinflächigen Rückbau inklusive Wiederverwendung. Zudem ist eine einfache Zugänglichkeit der Leitungen der Fußbodenheizung möglich. Aus dem Projekt Haus des Holzes ist bekannt, dass der Fußbodenaufbau in Verbindung mit einer Holzrippendecke mit zusätzlichen Schallschutzmaßnahmen an der Unterseite verwendet wird [121]. Zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit des Fußbodenaufbaus scheinen aufwändigere und teurere Deckenbauteile notwendig zu sein. Bei der Planung war zunächst vorgesehen, die Holz-Rippendecken mit Stampflehmausfachung allen Geschossen auszuführen. Somit hätte auch ein trockener Fußbodenaufbau gewählt werden können. Es ist davon auszugehen, dass der Holzboden mit Buchenriemen-Elementen in Verbindung mit der Holz-Lehm-Rippendecke die Schallschutzanforderungen erfüllt. Es wurde sich jedoch dagegen entschieden, da die Deckenuntersicht als optisch nicht passend und zu teuer für die Verwendung in Wohnungen eingestuft wurde. Möglicherweise bieten Hohlkastenelemente wie in [26] eine optisch ansprechende Lösung für die Wohnnutzung.

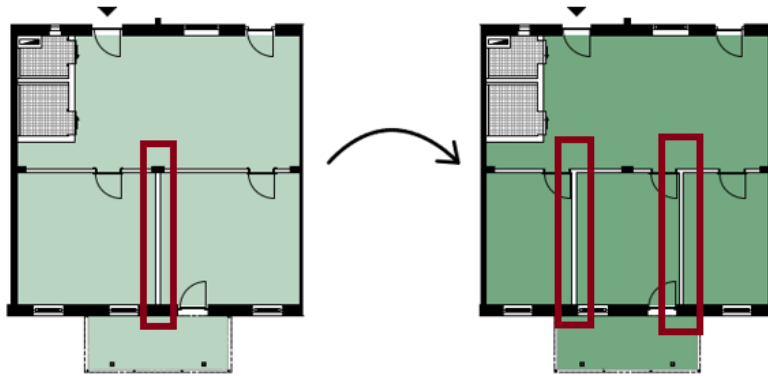


Abbildung 7-25: Holzriegelhof - Festlegen "kurzlebiger" Bauteile (bearbeitet aus [149])

Aus der Analyse geht an mehreren Stellen hervor, dass sich die raumseitigen Oberflächen von Wänden kaum schadensfrei lösen lassen. Dieses Problem tritt bei allen analysierten Objekten auf. Auch Graf et al. [26] stellen hier Defizite fest. Dies ist insbesondere für Innenwände problematisch, wenn diese regelmäßig und nach kurzer Nutzungsdauer verändert werden müssen. Wie zum Beispiel bei den Trennwänden der Schlafzimmer im Holzriegelhof (siehe Abbildung 7-25). Die markierten Wände sollen kurzfristig an neue Lebenssituationen der Bewohner angepasst werden können. Möglicherweise müssen für solche Bauteile Kompromisse in der Optik eingegangen werden, um die schadensfreie Demontage zu ermöglichen und so nicht bei jedem Umbau nach wenigen Jahren Abbruchmaterial zu produzieren, das sich nur mehr für ein Recycling eignet. Hier bieten sich möglicherweise Lösungen aus dem Büro-Ausbau an, wo sich modulare und umbaubare Trennwände bereits in Anwendung befinden.

## 8. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeit reflektiert. Dazu werden die Teilforschungsfragen beantwortet und diskutiert.

### **Ist der mehrgeschossige Holzbau in seiner aktuellen Form kreislauffähig?**

Der mehrgeschossige Holzbau hat gute Voraussetzungen, eine kreislauffähige Bauweise zu werden. Die Analyse der Referenzobjekte und des Stands der Technik zeigt jedoch auch, dass häufig insbesondere durch die Wahl der Verbindungsmittel und Bauteilaufbauten kein einfacher Austausch von Komponenten möglich ist und dass durch die Wahl der Knotendetails der schadensfreie Rückbau nicht möglich ist.

### **Wie lässt sich die Kreislauffähigkeit von mehrgeschossigen Holzgebäuden objektiv bewerten?**

Zur Bewertung der Kreislauffähigkeit wurde das komplexe Themenfeld des zirkulären Bauens in die drei Themenfelder „Reduce“, „Long-Use“ und „Re-Ude & Recycle“ unterteilt. Für jedes Themenfeld wurde versucht, objektive und maßgebende Kriterien herauszuarbeiten, welche eine Beurteilung der Kreislauffähigkeit eines mehrgeschossigen Holzbaus möglich machen. Viele der Kriterien sind jedoch nicht gut quantifizierbar und müssen in aufwändigen Analysen und in Abwägungsprozessen, die mit Unsicherheiten verbunden sind, beurteilt werden. In diese Kategorie fallen zum Beispiel die Bewertung der Anzahl der Verbindungsmittel oder die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel. Zudem fällt eine Beurteilung des Recyclingpotentials besonders schwer, da heute für einige Baustoffe noch keine Recyclingverfahren existieren und für andere Baustoffe existieren diese Verfahren, finden jedoch kaum Anwendung. Trotzdem wurde versucht, eine objektive Bewertungsmethode zu erstellen, die bei der Planung eines Gebäudes aufzeigen kann, an welchen Stellen bezüglich der Kreislauffähigkeit Nachholbedarf besteht.

### **Kann mehrgeschossiger Holzbau zu einer Verringerung der Flächenversiegelung im Neubau oder zu einer Erhöhung der Nutzungsintensität beitragen?**

Aus der Literaturrecherche ist bekannt, dass der Holzbau sich hervorragend für Aufstockungen eignet. Dort wird er in der Praxis bereits heute häufig angewandt. Andere Formen der Modernisierung wie die serielle Sanierung mit Fassadenelementen aus Holz sind weniger verbreitet. Die hohe architektonische und bauliche Qualität sowie die Geschwindigkeit lassen ein gewisses Potential erahnen - hohe Kosten stehen dem jedoch häufig noch im Weg. Aus den Referenzanalysen konnte festgestellt werden, dass die Beteiligten die Wichtigkeit der hohen Baugeschwindigkeit bei der innerstädtischen Nachverdichtung hervorgehoben haben.

### **Wie lässt sich ein mehrgeschossiger Holzbau besonders ressourceneffizient ausführen?**

Die Wahl einer ressourceneffizienten Holzkonstruktion (z. B. Skelett- oder Holztafelbau) anstelle eines Holzmassivbaus kann die benötigte Holzmenge enorm senken. In den Referenzprojekten werden weitere Möglichkeiten aufgezeigt. Eine nicht tragende Fassaden ermöglicht den Einsatz biogener Dämmstoffe. Im Fußbodenaufbau kann ein zementgebundener Estrich durch Buchenholzelemente ersetzt werden. Die Erschließungskerne und die Gebäudeaussteifung lassen sich vollständig in Holzbauweise errichten. Sogar Treppenläufe, -podeste und Aufzugsschächte sind aus Massivholz möglich. Aus der Literaturrecherche wird noch eine weitere Stellschraube hervorgehoben. Ein Verzicht oder eine deutliche Reduktion des Untergeschosses können einen sehr großen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch haben. Aus zwei der Referenzobjekte ist sogar bekannt, dass das

Untergeschoss nur mehr der Unterbringung der Haustechnik sowie einer Fahrradgarage dient. Möglicherweise findet hier ein Umdenken statt und es werden in Zukunft Anstrengungen unternommen, den Ressourceneinsatz im Untergeschoss zu reduzieren.

### **Von welchen Aspekten hängt die Umnutzung des Verwendungszwecks im mehrgeschossigen Holzbau ab und wie lässt sich eine Umnutzung mit angemessenem Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand erreichen?**

Besonders eine geringe Anzahl tragender Innenwände beeinflusst die Umnutzbarkeit positiv, sowohl zum selben Nutzungszweck als auch für eine andere Nutzung. Außerdem müssen die Gebäudeerschließung und die -versorgung ein Teilen und Zusammenlegen von Einheiten zulassen. Daneben wurde in der Referenzanalyse immer wieder festgestellt, dass ein Fußbodenaufbau, der sich nicht punktuell und schadensfrei zurückbauen lässt, die Umnutzbarkeit negativ beeinflussen kann, da das Hinzufügen und Entfernen von Wohnungstrennwänden erschwert wird. Hier liefert der Fußbodenaufbau aus dem Haus des Holzes ein gutes Beispiel dafür, wie ein solcher Boden aussehen kann. Bei der Rückbaubarkeit nicht tragender Innenwände wurden hingegen kaum zufriedenstellende Lösungen für den Wohnbau gefunden. Bei diesen lässt sich die raumseitige Bekleidung meistens nicht lösen, da die Verschraubungen überspachtelt werden.

### **Welche Aspekte erhöhen die Reparaturfähigkeit mehrgeschossiger Holzgebäude, sodass mit einem angemessenen Zeit-, Kosten- und Ressourcenaufwand die Nutzungsdauer des Gebäudes verlängert werden kann?**

Bei der Reparaturfähigkeit sind wieder die Rückbaubarkeit des Bodens und die Rückbaubarkeit der raumseitigen Bekleidung aufgefallen. Beide ermöglichen den Zugang zur horizontalen beziehungsweise vertikalen Leitungsführung in der Wohnung und beide ermöglichen den Zugang zur Gebäudehülle von Innen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass viele Lösungen für schadensfrei trennbare Bauteilaufbauten, sowohl im Bereich der Decken und Dächer als auch im Bereich der Innen- und Außenwände existieren und deren Einsatz häufig keine große Umstellung darstellt.

### **Welche Bauteile, Bauelemente und Komponenten weisen im mehrgeschossigen Holzbau am Ende des Lebenszyklus ein hohes Wiederverwendungspotenzial auf und durch welche Maßnahmen kann dieses Potenzial voll ausgeschöpft werden?**

In der Literatur wird das Wiederverwendungspotenzial auf Bauteilebene im Holzbau als besonders hoch eingeschätzt. Modular zusammengestellte, demontierbare Skeletttragwerke und sich wiederholende Fassadenelemente mit einem additiven Schichtaufbau scheinen dabei besonders hervorstechen. Sie bieten die Möglichkeit, vielfältige Gebäude mit einem hohen Gestaltungsspielraum aus wiederverwendeten Bauteilen zu entwerfen. Auch Bauelemente wie BSP-Platten oder Stützen und Träger haben ein hohes Wiederverwendungspotenzial, da diese sich sehr flexibel und nutzungsneutral in einem neuen Tragwerk wiederverwenden lassen.

### **Lässt sich die Rückbaubarkeit und Trennbarkeit von Bauteilen mit effizienter maschineller Vorfertigung der Bauteile und elementweiser Montage vereinbaren?**

Bei der maschinellen Herstellung von Wandelementen besteht die Möglichkeit, Schichten zu schrauben, anstatt zu nageln oder zu klammern. Ein sehr großes Potential liegt in der CNC- und Abbund-Technik. Diese hochpräzisen Holzbearbeitungsmethoden ermöglichen lösbare Verbindungen über Kontaktstöße wie beispielsweise Verzahnungen und stellen eine



Schlüsseltechnologie für das kreislauffähige Bauen dar. Zudem wird die Vorfertigung von den meisten Autoren als Grundvoraussetzung für eine kreislauffähige Bauweise genannt.

### Wie ist das Materialrecycling im Kontext der Kreislaufwirtschaft zu betrachten und welche Baustoffe und Materialien lassen sich im mehrgeschossigen Holzbau am Ende des Lebenszyklus im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wiederverwerten?

In der Kreislaufwirtschaft wird das Materialrecycling nicht primär angestrebt. Vielmehr wird es als Mittel gesehen, ein Produkt wieder erneut zu produzieren, wenn es sich nicht mehr reparieren oder wiederverwenden lässt. Dennoch spielt es eine wichtige Rolle, da die meisten Werkstoffe irgendwann ihre maximale Nutzungsdauer erreichen. Allerdings geht aus der Literaturrecherche hervor, dass die wenigsten Bauprodukte sich zum heutigen Stand im Sinne der Kreislaufwirtschaft recyceln lassen. Metalle, nachwachsende Rohstoffe und manche mineralischen Werkstoffe wie Gips lassen sich nachweislich in fast geschlossenen Kreisläufen führen, auch wenn dies flächendeckend angewandt wird. Bei vielen Werkstoffen ist dieses Ziel jedoch noch fraglich.

### Welche Maßnahmen haben einen besonders großen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit und Ressourceneffizienz des Holzgebäudes?

Aus den Referenzanalysen und der Literaturrecherche wurden folgende baulichen Maßnahmen identifiziert, die das Ergebnis der Analyse der Kreislauffähigkeit besonders stark beeinflussen. Ein besonders positiver Einfluss lässt sich bei der Verwendung eines Skeletttragwerks, einem trocken verlegten Fußboden und dem Verzicht auf Klammern und Nägel feststellen. Besonders negativ ist im Rahmen der Analyse und Recherche die Verwendung von Ortbeton insbesondere in Form von Verbundbauteilen aufgefallen.

Tabelle 8-1: Einfluss verschiedener Maßnahmen

Themenfelder / Kriteriengruppen		Kriterien	Einfluss			
			Skeletttragwerk	Trocken verlegter Fußbodenaufbau	Verzicht auf Klammern und Nägel	Vergossene Holz-Beton-Verbund-Decken
<b>1. Reduce</b>						
1.1.	Flächenverbrauch	1.1.1. Flächeninanspruchnahme	o	o	o	o
		1.1.2. Nutzungsdichte	o	o	o	o
1.2.	Ressourcenschonender Materialeinsatz	1.2.1. Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung	o	o	o	o
		1.2.2. Reduktion des Stahlbetonanteils in Tragwerk und Gründung	o	o	o	-
		1.2.3. Effizienter Holzeinsatz im Tragwerk	+	o	o	+
		1.2.4. Verwendung alternativer ökologischer Baustoffe	+	+	o	o
<b>2. Long-Use</b>						
2.1.	Flexibilität	2.1.1. Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	+	+	o	o
		2.1.2. Umnutzung für eine andere Nutzung	+	+	+	o
		2.1.3. Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit	o	o	o	o
2.2.	Langlebigkeit	2.2.1. Langlebigkeit des Holztragwerks	+	o	o	o
		2.2.2. Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle, Sekundärstruktur und Ausbau	+	+	+	o
<b>3. Re-Use &amp; Recycle</b>						
3.1.	Re-Use	3.1.1. Wiederverwendungspotential	+	o	o	-
		3.1.2. Demontierbarkeit der Bauteile	+	+	+	-
		3.1.3. Trennbarkeit der Bauelemente und Komponenten	+	+	+	-
		3.1.4. Informationsverfügbarkeit	o	o	o	o
3.2.	Recycling	3.2.1. Materialrecycling	+	+	+	-

### Welche Hindernisse und Bedenken existieren aktuell in Bezug auf die Wiederverwendung im Holzbau?

Gesetzliche Hindernisse sind vor allem noch bei der Wiederverwendung von Bauteilen festzustellen. Hier fehlen Zertifizierungssysteme und Regelungen für Haftungs- und Garantiefragen. Ein Hindernis, heute kreislauffähig neu zu bauen, stellt sicherlich der Kostenaufwand dar. Hier wird versucht, mit den Instrumenten der Taxonomie Anreize zu

schaffen, Geld in nachhaltige Investitionen zu lenken. Zeitgleich müssen institutionelle Käufer von Immobilien beginnen zu überlegen, wie in Zukunft mit Entsorgungskosten umzugehen ist, wenn sich die Deponieverbote weiter verschärfen. Auch dies könnte eine treibende Kraft für kreislauffähiges Bauen darstellen.

### **Welche Vorteile weist der Holzbau auf, wenn es darum geht, ein kreislauffähiges Gebäude zu errichten?**

Hier sind einerseits die Modularität und die Vorfertigung zu nennen, welche den mehrgeschossigen Holzbau ausmacht. Sie wird von vielen Autoren als essentiell für das zirkuläre Bauen gesehen. Hinzu kommt, dass der Holzbau bereits viele Verbindungsmittel kennt, die sich schadensfrei demontieren lassen. Diese wurden im Verlauf dieser Arbeit herausgearbeitet. Mit der modularen Vorfertigung und schadensfrei demontierbaren Verbindungsmitteln besitzt der Holzbau die Grundwerkzeuge für kreislauffähiges Bauen. Hier bedarf es nun viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um standardmäßige Bauteilknoten zu etablieren, die sich wieder lösen lassen und eine Wiederverwendung zulassen. Andererseits ist zu nennen, dass Holz ein nachwachsender Rohstoff ist. Das bietet ihm in einer Kreislaufwirtschaft Vorteile gegenüber fossilen, metallischen oder mineralischen Werkstoffen. Diese können in einer Kreislaufwirtschaft nicht abgebaut werden, während Holz nachwächst und dabei CO<sub>2</sub> bindet. Das Binden von CO<sub>2</sub> macht den Werkstoff umso interessanter für eine Kreislaufwirtschaft. Dadurch können die Treibhausgase sehr viel länger als in einer linearen Wirtschaft in der gebauten Umwelt gespeichert werden.

## 9. Conclusio

Die zentrale Forschungsfrage, der in dieser Arbeit nachgegangen wird lautet, wie Wohngebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 in Holzbauweise im Sinne der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit errichtet werden können. Im Zuge einer umfassenden Literaturrecherche zum kreislauffähigen Bauen und dem Holzbau wird herausgearbeitet, welche Kriterien einen kreislauffähigen Holzbau ausmachen und wie sich ein kreislauffähiges Gebäude in Holzbauweise umsetzen lässt. Mithilfe aktueller Gebäudezertifizierungssysteme aus dem DACH-Raum sowie den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche wird ein Bewertungssystem zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit von mehrgeschossigen Holzwohngebäuden erarbeitet. Durch Anwenden des Bewertungssystems auf Referenzgebäude wird aufgezeigt inwieweit moderne und als nachhaltig geltende Holzwohngebäude den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft entsprechen und in welchen Bereichen Defizite und weiterer Forschungsbedarf bestehen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein eigener Entwurf erstellt, wobei mithilfe des Bewertungssystems versucht wird, Verbesserungen hinsichtlich der Kreislauffähigkeit des Entwurfs auszumachen.

Die Kreislauffähigkeit von Gebäuden wird maßgeblich durch drei Themenfelder beeinflusst: Die Ressourceneffizienz (Reduce), die Langlebigkeit und Dauerhaftigkeit (Long-Use) sowie die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit (Re-Use). Die Ressourceneffizienz lässt sich auf Gebäudeebene konstruktiv durch die Wahl der Baustoffe, des Tragwerks und der Bauteilaufbauten beeinflussen. Ein besonders großer Hebel zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind die Gründung und Unterkellerung des Gebäudes. Ein Verzicht auf ein Untergeschoss kann die Treibhausgasbilanz und den Ressourcenverbrauch stark verringern. Bei der Entwicklung und dem Einsatz ressourceneffizienter Bauteile werden häufig Verbundkonstruktionen mit nicht trennbaren Verbindungen eingesetzt. Dabei entsteht in einer Kreislaufwirtschaft ein Konflikt zwischen dem Prinzip der Wiederverwendbarkeit und Ressourceneffizienz. Neben den konstruktiven Aspekten spielen auch die Wahl und Lage des Baugrunds und insbesondere die Nutzungsintensität des Gebäudes eine entscheidende Rolle. Hier lässt sich eine hohe Ressourceneffizienz zum Beispiel durch Nachverdichtung und Verkleinerung der privaten Flächen zugunsten von Gemeinschaftsflächen erreichen. Aus rechtlichen Gründen und mangels breiter Verfügbarkeit spielt der Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen und Materialien noch keine entscheidende Rolle bei der Steigerung der Ressourceneffizienz. Im Zuge der Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft wird deren Einsatz jedoch immer wichtiger. Unter der Prämisse einer Steigerung der Holzbauquote bietet sich die Skelettbauweise an. Sie ermöglicht einen besonders ressourceneffizienten Einsatz von Holz im Tragwerk sowie den Verzicht auf Brandschutzbekleidung bei entsprechender Bemessung auf Abbrand. Zusätzlich fallen die Anforderungen aus dem Brandschutz an die Fassade geringer aus, sodass hier biogene Dämmstoffe eingesetzt werden können.

Die Langlebigkeit hängt maßgeblich von der Robustheit und Dauerhaftigkeit des Tragwerks ab, da dieses die maximale Lebensdauer bestimmt. Beim Holzbau ist hier insbesondere auf einen effektiven Feuchteschutz der tragenden Bauteile zu achten. Damit die maximale Lebensdauer des Tragwerks ausgenutzt werden kann, müssen sämtliche funktionalen Gebäudeschichten mit einer kürzeren Lebensdauer austauschbar sein. Hierfür müssen trennbare Bauteilaufbauten gewählt werden. Außerdem bietet sich die Trennung zwischen Tragwerk und Gebäudehülle an. Die Trennbarkeit zwischen Bauteilschichten wird im Bereich der Wände vor allem durch den Verzicht auf Verklebungen, Klammern und Nägel erreicht und im Bereich der Geschossdecken vor allem durch trocken verlegte Fußbodenaufbauten. Bei der Lösbarkeit von Bauteilschichten der Wände stellt dabei die Erreichbarkeit der Verbindungsmittel der

raumseitigen Bekleidung eine große Herausforderung dar, da diese Verbindungsmittel aus ästhetischen Gründen zumeist verdeckt werden. Bei Fußbodenaufbauten sollte auf vergossene Schichten verzichtet werden, da diese einen punktuellen Rückbau verhindern. Rein trocken geschichtete Bodenaufbauten sind jedoch häufig aus Schallschutzgründen nicht einfach zu realisieren. Auch die Haustechnik sollte in gut erreichbaren und von anderen Bauteilen getrennten Schächten und Kanälen verlegt werden, um einen regelmäßigen Austausch zu ermöglichen. Darüber hinaus bestimmt die Umnutzbarkeit, wie lange ein Gebäude tatsächlich genutzt wird. Eine Reduktion tragender Innenwände, mehrere Versorgungsschächte und Zugangsmöglichkeiten je Nutzungseinheit sowie rückbaubare Innenwände, Fußboden- und Deckenaufbauten ermöglichen sowohl eine Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart (z. B. Zusammenlegen von zwei Wohneinheiten zu einer Gemeinschaftswohnung) als auch eine Umnutzung für eine andere Nutzung (z.B. Zusammenlegen aller Wohneinheiten eines Geschosses zur Nutzung als Großraumbüro). Auch hier bietet sich ein Skelettragwerk an, da dieses einerseits die Trennung zwischen Tragwerk und Gebäudehülle ermöglicht und gleichzeitig sehr flexible Grundrisse ohne tragende Innenwände entstehen.

Die Wiederverwendung wird am Ende der Lebensdauer stets dem Recycling vorgezogen, da damit ein höherer Werterhalt einhergeht. Modulare Systeme und Vorfertigung leichter Bauteile werden bereits heute im mehrgeschossigen Holzbau praktiziert. Dies wird als gute Grundlage für eine spätere Wiederverwendung der Bauteile angesehen. Um dieses Wiederverwendungspotenzial ausschöpfen zu können, bedarf es darüber hinaus lösbare Verbindungen in den Bauteilknoten. Es existieren im Holzbau Knotendetails, die als schadensfrei lösbar gelten. Besonderes Potenzial wird hier in modernen zimmermannsmäßigen Verbindungen gesehen, welche die Kräfte über eine formschlüssige Kontaktverbindung übertragen. Ebenfalls als lösbar gelten einige metallische Verbindungsmittel aus dem Ingenieurholzbau, zum Beispiel mit Unterlegscheiben und Muttern gesicherte Bolzen, Passbolzen oder Gewindestangen. Auch Holz-Holz-Verbindungen bieten eine schadensfrei lösbare Verbindung und können insbesondere zur Schubkraftübertragung oder zur Herstellung von Decken- oder Wandscheiben eingesetzt werden. Die für die Reparaturfähigkeit notwendigen trennbaren Bauteilaufbauten ermöglichen am Ende des Lebenszyklus auch eine Wiederverwendung von Komponenten oder ein Materialrecycling. Während für die Wiederverwendung der Komponenten die schadensfreie Zerlegbarkeit entscheidend ist, ist für das Materialrecycling die sortenreine Trennbarkeit maßgebend.

In seiner standardmäßig praktizierten Form stellt der mehrgeschossige Holzwohnungsbau in den Gebäudeklassen 4 und 5 keine kreislauffähige Bauweise dar. Sowohl die Literaturanalyse des Status Quo im mehrgeschossigen Holzbau als auch die Referenzanalysen zeigen, dass insbesondere die Wiederverwendbarkeit nicht erfüllt wird. Dies liegt vor allem an der Wahl der Verbindungsmittel. Diese sind unter anderem aus fertigungstechnischen, logistischen, montagebedingten und finanziellen Gründen nicht auf Reversibilität ausgelegt. Häufig kommen Klammern, Nägel und Schrauben in großer Anzahl zum Einsatz und verhindern einen schadensfreien Rückbau. Besonders erschwerend auf den Rückbau wirken sich Holz-Beton-Verbunddecken mit einer formschlüssig vergossenen Aufbetonschicht aus. Zudem fällt auf, dass für viele der eingesetzten Materialien noch keine geschlossenen Recycling-Kreisläufe existieren. Die Referenzanalyse und die Literaturrecherche zeigen aber auch, dass es möglich ist, kreislauffähige Bauteile und Bauteilverbindungen in Holzbauweise zu verwenden. Während die Zerlegbarkeit der Bauteile bereits durch kleine Anpassungen in der Fertigung (Umstellung von Klammern und Nägel auf Schrauben) ermöglicht werden kann,

müssen viele Knotendetails für die Demontierbarkeit der Bauteile neu gestaltet und entwickelt werden. In der Referenzanalyse wird auch aufgezeigt, dass der mehrgeschossige Holzbau in seiner aktuellen Form im Bereich der Ressourceneffizienz die Anforderungen an kreislauffähige Gebäude teilweise gut erfüllen kann. Im Bereich der Ressourceneffizienz besteht noch nicht ausgenutztes Potenzial bei der Bauteilwiederverwendung oder Bestandsnutzung sowie bei der Reduktion des Stahlbetonteils im Bereich der Gründung und Unterkellerung. Bei der Beurteilung der Langlebigkeit und Dauerhaftigkeit schneiden die gewählten Referenzgebäude insbesondere bei ihrer Flexibilität und Umnutzbarkeit gut ab, während die Reparaturfähigkeit noch Verbesserungspotenzial aufweist, da häufig die erforderlichen lösbaren Verbindungsmittel nicht verwendet werden. Hierbei werden auch die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche bestätigt, wonach die Rückbaubarkeit des Bodenaufbaus schwer umzusetzen ist.

Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zeigen, dass der Holzbau eine Bauweise ist mit dem Potenzial, zukünftig kreislauffähige Gebäude errichten zu können. Dieses große Potenzial des Holzbaus zur zirkulären Bauweise liegt einerseits an den Eigenschaften des Rohstoffs Holz und andererseits an den technischen Eigenschaften des Holzbaus. Mit Holz lässt sich das Tragwerk aus einem nachwachsenden Material errichten, welches in einem geschlossenen biogenen Kreislauf im Sinne der Kreislaufwirtschaft geführt werden kann. Lediglich Stahl kann ebenfalls in einem geschlossenen (technischen) Kreislauf geführt werden. Gegenüber Stahl weist Holz jedoch die Eigenschaft auf, dass der Primärenergiegehalt des Tragwerks zu einem großen Teil aus erneuerbarer Primärenergie besteht und dass für die Rohstoffgewinnung kein Abbau endlicher Ressourcen notwendig ist. Für Beton oder andere mineralische Baustoffe für das Tragwerk existieren zum heutigen Zeitpunkt noch keine geschlossenen Materialkreisläufe. Aus technischer Sicht bietet der mehrgeschossige Holzbau mit der industriellen Vorfertigung leichter Elemente eine gute Voraussetzung, modulare Bauteile mit hohem Wiederverwendungspotenzial herzustellen. Zudem existieren eine Reihe von verschiedenen Verbindungsmitteln, die sich schadensfrei wieder lösen lassen und so eine Demontage dieser modularen Bauteile am Ende der Nutzungsdauer des Gebäudes ermöglichen.

Zum Erreichen der Kreislauffähigkeit im mehrgeschossigen Holzwohnungsbau ist jedoch auch noch viel Forschungsbedarf notwendig. Einerseits gilt es, die Versorgung mit nachhaltig erzeugtem Bauholz auch bei einer Steigerung der Holzbauquote sicherzustellen. Hierfür sind insbesondere Fragen zu klären, wie der Wald trotz Klimawandel nachhaltig zur Holzproduktion genutzt werden kann und wie die Zusammensetzung eines solchen Waldes aussieht. In diesem Zuge muss sich die Holz- und Bauindustrie damit befassen, wie sich neue Holzarten in Zukunft für das Bauwesen einsetzen und bearbeiten lassen. Klar ist, dass eine positive Klimabilanz des Werkstoffs Holz nur in Verbindung mit einer langen Nutzungsdauer gegeben ist. Dazu wird zunächst eine Wiederverwendung und anschließend eine Kaskadennutzung angestrebt. Um dies zukünftig umzusetzen bedarf es Forschung zur Bewertung der Tragfähigkeit von wiederverwendeten Bauteilen und Bauelementen sowie klarer rechtlicher Regelungen zur Wiederverwendung von Bauteilen. Zudem müssen bereits existierende Herstellungsverfahren von Holzwerkstoffen hinsichtlich der Kaskadennutzung optimiert werden und Anreize geschaffen werden, sodass die Kaskadennutzung von Altholz einer thermischen Verwertung vorgezogen wird.

Neben der Forschung an der Optimierung des stofflichen Kreislaufs von Holz ist es auch notwendig, geschlossene Recycling-Kreisläufe und CO<sub>2</sub>-neutrale Herstellungsverfahren für mineralische, metallische und organische Werkstoffe zu entwickeln. Insbesondere der Werkstoff Beton stellt das Bauwesen hier vor eine große Herausforderung, da dieser auch bei einer Steigerung der Holzbauquote im Hochbau nicht ersetzt werden kann. Für nicht

nachwachsende Rohstoffe, die im Bauwesen verwendet werden, müssen bestehende Verfahren so angepasst werden oder neue Verfahren entwickelt werden, sodass ein Recycling ohne Qualitätsverlust möglich ist. Ein dauerhafter Einsatz eines Stoffs, der nicht nachwachsend ist und nicht auf einer gleichbleibenden Qualitätsstufe recycelt werden kann, ist nicht mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereinbar.

Neben der Entwicklung kreislauffähiger Materialien ist es auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft auch notwendig, den Ressourcenverbrauch beim Bauen zu senken. Dafür muss einerseits ein Umdenken der Bauherren und Nutzer sowie in der Architektur stattfinden. Durch Suffizienz lassen sich besonders viele Ressourcen beim Bauen einsparen. So kann der Materialbedarf eines Gebäudes durch einen Verzicht auf ein Untergeschoss und kleinere Wohneinheiten stark gesenkt werden. Andererseits kann eine höhere Ressourceneffizienz durch die Entwicklung neuer Bauelemente erreicht werden, sodass mit weniger Materialaufwand gleiche Tragfähigkeiten erreicht werden. Zukünftig ist es wichtig, solche tragenden Elemente zu entwickeln und dabei gleichzeitig deren Kreislauffähigkeit zu beachten. Dies bedeutet insbesondere einen Verzicht auf Verbundwerkstoffe und Verbundbauteile, die sich nicht mehr sortenrein trennen lassen. Selbiges gilt für die Bauweisen. Hier sind besonders ressourcenaufwändige Tragwerke zu hinterfragen und, wenn möglich, durch ressourcenschonende Tragwerke zu ersetzen.

Neben einer stabilen Rohstoffversorgung bedarf es neuen Konstruktionsmethoden und Konstruktionsdetails, um kreislauffähige Gebäude aus wiederverwendbaren Elementen zu errichten. Hier besteht ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf an neuen, lösbaren Bauteilverbindungen und Knotendetails. Diese bilden die Grundvoraussetzung für eine schadensfreie Demontage und die darauffolgende Wiederverwendung. In diesem Zuge ist auch der Entwicklungsbedarf neuer, schadensfrei lösbarer Verbindungsmittel zu nennen. Ebenso erforderlich ist die Entwicklung von reparaturfähigen und trennbaren Bauteilaufbauten sowie Konzepte zur konsequenten Trennung von Tragwerk, Hülle, Ausbau und Haustechnik. Die im Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Referenzgebäude und Forschungsarbeiten zeigen, dass der Holzbau Möglichkeiten zur Umsetzung kreislauffähiger Konstruktionen bietet. Es wird aufgezeigt, dass das kreislauffähige Bauen ein komplexes Themenfeld darstellt, in dem viele unterschiedliche Einflussgrößen eine Rolle spielen. Hierbei ist anzumerken, dass auffällt, dass der Holzskelettbau häufig als mögliche Lösung für einzelne Teilgebiete des Themenkomplexes kreislauffähiges Bauen genannt wird.

Abschließend ist die Informationsverfügbarkeit zu nennen, welche ebenfalls eine große Herausforderung darstellt. Die Wiederverwendung von Bauteilen nach einer langen Primärnutzung kann nur funktionieren, wenn sämtliche Informationen von der Herstellung über die Nutzung des Bauteils zur Verfügung stehen. Hier müssen digitale Lösungen entwickelt und konsequent angewandt werden, mit welchen die entsprechenden Daten über mehrere Jahrzehnte gespeichert und eingepflegt werden können. Zudem ist die Entwicklung von Datenbanken notwendig, um die gebaute Umwelt darzustellen. So können Angebot und Nachfrage von wiederverwendbaren Bauteilen, Bauelementen und Baustoffen zusammengeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Grundlagen für einen zirkulären, mehrgeschossigen Holzwohnungsbau vorhanden und in Teilen bereits fortgeschritten sind. Demgegenüber stehen jedoch auch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie ein notwendiges Umdenken entlang des gesamten Herstellungsprozesses im Bauwesen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), "Europäischer Green Deal."  
[https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/eu\\_international/euop\\_greendeal.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/eu_international/euop_greendeal.html) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [2] Eurostat, "Eurostat regional yearbook 2023 edition", Luxemburg, Europäische Union, 2023.
- [3] A. Hanika, "ÖROK-Regionalprognosen 2021 bis 2050: Bevölkerung – Teil 1," presented at the Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien, 2022.
- [4] UNEP, "Global Status report for buildings and construction towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector", Nairobi, UNEP, 2022.
- [5] B. Luger und U. Dorau, "Circular Housing Ansätze zur Verankerung der Prinzipien kreislauffähigen Bauens im Wohnungsneubau", 2021.
- [6] Europäische Kommission "Im Blickpunkt - Energieeffizienz von Gebäuden."  
[https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17\\_de#:~:text=Insgesamt%20entfallen%20auf%20Geb%C3%A4ude%20in%20der%20EU%2040,auf%20die%20Phasen%20Bau%2C%20Nutzung%2C%20Renovierung%20und%20Abriss.](https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_de#:~:text=Insgesamt%20entfallen%20auf%20Geb%C3%A4ude%20in%20der%20EU%2040,auf%20die%20Phasen%20Bau%2C%20Nutzung%2C%20Renovierung%20und%20Abriss.) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [7] Europäische Union "Factsheet – Energy Performance of Buildings", Brüssel, Europäische Union, 2021.
- [8] Europäische Kommission "Energy performance of buildings directive." Europäische Kommission. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_de](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_de) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [9] H. Gugerli, R. Frischknecht, U. Kasser und M. Lenzlinger, "Merkblatt SIA 2032: Graue Energie im Fokus", in *15. Schweizerisches Status-Seminar «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen»*, 2008.
- [10] S. Winter, "Holzbau heute," in *Holzbau Taschenbuch*, S. Winter und M. Peter Eds. Weinheim, Germany: Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2021, p. 55.
- [11] J. Kaufmann, "Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden am Beispiel des Forschungsprojekts "Building. Lab"", in *Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.*, 2022.
- [12] A. Rosen, "Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen," in *Atlas Recycling*, A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen, und J. Seggewies Eds. München: DETAIL, 2021.
- [13] A. Rosen, "Urban Mining Index – Planungs- und Bewertungsinstrument für zirkuläres Bauen," *Bauphysik*, vol. 43, no. 6, pp. 357-365, 2021, doi: 10.1002/bapi.202100035.
- [14] S. Lutter, J. Kreiml und S. Giljum, "Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht für Deutschland 2022", vol. 118/2023, Umweltbundesamt, 2023, p. 39.
- [15] Destatis, "Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) 2020", Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022.

- [16] I. Homeier *et al.*, "Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050: die Wiener Strategie für eine nachhaltige Entwicklung", Wien, Magistrat der Stadt Wien, 2019, p. 163 Seiten.
- [17] D. Hebel und L. Wappner, "Vom sortenreinen Bauen," in *Sortenrein Bauen : Methode, Material, Konstruktion*, V. Calavetta, S. Bytomski, und P. Holtmann Eds., Erste Auflage ed. München: München : Edition Detail, 2023, pp. 231 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 30 cm.
- [18] D. Müller und C. Aebischer, "Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten", Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU, 2022.
- [19] A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen und J. Seggewies, *Atlas Recycling* (Gebäude als Materialressource). München: DETAIL, 2021.
- [20] DGNB. *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau*, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., Stuttgart, 2023.
- [21] A. Rosen, *Urban Mining Index : Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*. Stuttgart: Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2021, pp. XIII, 330 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 29.7 cm x 21 cm.
- [22] J. Kanters, "Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art," *Buildings*, vol. 8, no. 11, 2018, doi: 10.3390/buildings8110150.
- [23] A. Hillebrandt, "Architekturkreisläufe – Urban-Mining-Design," in *Atlas Recycling*, A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen, und J. Seggewies Eds.: DETAIL, 2021.
- [24] S. Schuster und S. Geier, "CircularWOOD – Towards Circularity in Timber Construction in the German Context," presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022/09/01, 2022. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012030>
- [25] A. Hillebrandt und J. Seggewies, "Recyclingpotenziale von Baustoffen," in *Atlas Recycling*, A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen, und J. Seggewies Eds. München: DETAIL, 2021.
- [26] J. Graf *et al.*, "Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen", 2022.
- [27] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), "Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien." Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (besucht 2. Oktober, 2023).
- [28] Europäisches Parlament und Europäischer Rat "Richtlinie (EU) 2018/850 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien", 2018.
- [29] Europäisches Parlament und Europäischer Rat "Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106", in *EWG des Rates (EU-Bauprodukteverordnung–EU-BauPVO, ABI. L 88/5 ff*, 2011.
- [30] Europäische Kommission "European Climate Law." Europäische Kommission. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [31] Europäisches Parlament "Wie will die EU bis 2050 eine Kreislaufwirtschaft erreichen?",



- <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20210128STO96607/wi-e-will-die-eu-bis-2050-eine-kreislaufwirtschaft-erreichen> (besucht 2. Oktober, 2023).
- [32] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), "EU-Taxonomie-Verordnung." <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/eu-taxonomie-vo.html> (besucht 2. Oktober, 2023).
- [33] Europäische Kommission "Corporate sustainability reporting." Europäische Kommission. [https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting\\_en](https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [34] PWC, "Eine neue Ära in der Nachhaltigkeitsberichterstattung." <https://www.pwc.at/de/dienstleistungen/wirtschaftspruefung/pruefungsnahberatung/aktuelle-artikel/nachhaltigkeitsberichterstattung.html> (besucht 2. Oktober, 2023).
- [35] Bundeskanzleramt Österreich "Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020 - 2024", Wien, Bundeskanzleramt Österreich, 2020.
- [36] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie "Allgemeines zur Abfallwirtschaft." [https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen\\_wohnen\\_und\\_umwelt/abfall/1/Seite.3790060.html](https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/abfall/1/Seite.3790060.html) (besucht 3. Oktober, 2023).
- [37] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), "Recycling-Baustoffverordnung." Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/recht/vo/recycling.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/recht/vo/recycling.html) (besucht 2. Oktober, 2023).
- [38] P. Hradil *et al.*, "Best practices: PARADE. Best practices for Pre-demolition Audits ensuring high quality Raw materials", 2019.
- [39] Austrian Standards International "ÖNORM B 3151:2022-05: Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode", Wien, 2022.
- [40] Österreichisches Institut für Bautechnik "OIB-Richtlinien." Österreichisches Institut für Bautechnik. <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien> (besucht 2. Oktober, 2023).
- [41] Österreichisches Institut für Bautechnik "OIB-Richtlinien 2023." Österreichisches Institut für Bautechnik. <https://www.oib.or.at/oib-richtlinien/richtlinien/2023> (besucht 2. Oktober, 2023).
- [42] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), "Verordnung über Deponien und Langzeitlager." Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). <https://www.bmuv.de/gesetz/verordnung-ueber-deponien-und-langzeitlager/> (besucht 4. Oktober, 2023).
- [43] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) "Verordnung zur Änderung der Ersatzbaustoffverordnung und der Brennstoffwechsel-Gasmangellage-Verordnung." <https://www.bmuv.de/gesetz/verordnung-zur-aenderung-der-ersatzbaustoffverordnung-und-der-brennstoffwechsel-gasmangellage-verordnung> (besucht 4. Oktober, 2023).
- [44] Bundesamt für Energie, Abteilung für Medien und Politik, "Energiestrategie 2050 nach dem Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes", Schweiz, Bundesamt für Energie, 2018.

- [45] BAFU, Abteilung Ökonomie und Innovation, "Massnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz (Grüne Wirtschaft)", V. Eidgenössisches Department für Umwelt, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2020.
- [46] Y. Sandin, M. Cramer und K. Sandberg, "How timber buildings can be designed for deconstruction and reuse in accordance with ISO 20887," in *WCTE 2023-World Conference on Timber Engineering 19.-22. June, 2023, Oslo, Norway, 2023*: WCTE 2023-World Conference on Timber Engineering.
- [47] M. Zeumer, S. E. khouli und V. John, *Nachhaltig konstruieren (Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl - Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren)*. DETAIL, 2014.
- [48] S. Krötsch und L. Müller, "Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [49] D. Hebel *et al.*, "Fokus Holz," in *Sortenrein Bauen : Methode, Material, Konstruktion*, V. Calavetta, S. Bytowski, und P. Holtmann Eds., Erste Auflage ed. München: München : Edition Detail, 2023, pp. 231 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 30 cm.
- [50] D. Prof. Hebel und L. Prof. Wappner, *Sortenrein bauen - Material, Konstruktion, Methodik (Methodik – Material – Konstruktion)*. DETAIL, 2023.
- [51] S. Rüter und S. Diederichs, "Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz", in *ARBEITSBERICHT aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1*, Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei Institut für Holztechnologie und Holzbiologie (HTB), 2012.
- [52] A. Hafner und H. König, "Lebenszyklusanalyse," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [53] S. Winter, "Schutzfunktionen," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [54] H. Kaufmann, W. Huß, S. Krötsch und S. Winter, "Struktur und Tragwerk," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [55] S. Krötsch und W. Huß, "Bauteile und Bauelemente," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [56] A. Niemann, "Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [57] H. Kaufmann, S. Krötsch und S. Winter, *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, Erste Auflage ed. (Edition DETAIL). München: München : Detail Business Information GmbH, 2017, pp. 1 Online-Ressource (271 Seiten), Illustrationen, ΠΙΓῃνε.
- [58] M. Kohaus und H. Kaufmann, "Schichtenaufbau der Gebäudehülle," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [59] Baunetz Wissen "Lebensdauer von Haustechnikkomponenten." Baunetz Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/heizung-lueftung/lebensdauer-von-haustechnikkomponenten-2333439> (besucht 19. Oktober, 2023).
- [60] dataholz.eu "Geprüfte / zugelassene Bauteile." Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. <https://www.dataholz.eu/> (besucht 23. Oktober, 2023).

- [61] M. Teibinger, "Gebäudetechnik – Besonderheiten im Holzbau," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [62] C. Schühle, "Schichtenaufbau von Innenbauteilen," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [63] D. Schwede und E. Störl, "Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen," *Die Bautechnik*, vol. 94, no. ISSN: 0932-8351, p. 9, 2017, doi: 10.1002/bate.201600025.
- [64] *DIN 8580:2022-12*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. , Berlin, 2022.
- [65] A. Bernasconi, "Überbauung Via Cenni Mailand–4 Holzhochhäuser mit je 9 Geschossen," in *Internationales Holzbau-Forum*, 2012: Forum Holzbau.
- [66] Stexon GmbH "Steckverbinder." <https://www.stexon.eu/innovation-im-holzbau/steckverbinder/> (besucht 30. Oktober, 2023).
- [67] rothoblaas, "X-Rad", in *Brochüre*, 2017.
- [68] S. Ebert, S. Ott, K. Krause, A. Hafner und M. Krechel, "Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene," *Die Bautechnik*, vol. 97, no. ISSN: 0932-8351, p. 25, 2020, doi: 10.1002/bate.201900109.
- [69] W. Huß, "Produktion," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [70] D. E. Hebel und F. Heisel, *Besser - Weniger - Anders Bauen: Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft* (Grundlagen - Fallbeispiele - Strategien). Birkhäuser, 2022.
- [71] S. Schuster und S. Geier, "circularWOOD-Paradigmenwechsel für eine Kreislaufwirtschaft im Holzbau", in *BBSR-Online-Publikation 15/2023* Bonn, Deutschland, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023.
- [72] F. Lattke, "Lösungen für die Gebäudemodernisierung," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [73] T. Wolf, A. Untergutsch, C. Wensing, H. Mittelbach, F. Lu-Pagenkopf, D. Kellenberger und P. Kubowitz, "Potenziale von Bauen mit Holz - Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv und Holzbauweise", vol. 192/2020, Umweltbundesamt, 2020.
- [74] A. Hafner *et al.*, "Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden-Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)", in *Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. BMEL/BMUB*, 2017.
- [75] W. Pölz, N. Braschel und D. Fritz, "Treibhausgasemissionen des stofflichen und energetischen Einsatzes von Holz in Österreich im Vergleich zu Substitutionsstoffen", Wien, Umweltbundesamt, 2015.
- [76] F. Winnefeld, "Neue Materialien für CO2-freundlicheren Beton–Chancen und Herausforderungen", in *Infra-Tagung 2023* Schweiz, 2023.
- [77] D. Hebel *et al.*, "Fokus Beton," in *Sortenrein Bauen : Methode, Material, Konstruktion*, V. Calavetta, S. Bytowski, und P. Holtmann Eds., Erste Auflage ed. München: München : Edition Detail, 2023, pp. 231 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 30 cm.
- [78] M. Hoppe, P. Schneider-Marin und L. Brüssermann, "Grundlagenexpertise Was brauchen „Quartiere für die Zukunft“?–Good Practice für Wohnquartiere in Bremen",

- Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtplanung und Wohnungsbau der Freien Hansestadt Bremen (SKUMS), 2022.
- [79] F. Dolezal, "Ökobilanzierung von Holzprodukten bei Reuse und Recycling," *Zuschnitt 88 Reuse und Recycling*, 2023.
- [80] Austrian Standards International "ÖNORM EN 15978-1:2021 10 01: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität", Wien, 2021.
- [81] I. Sustersic, "Less is more – optimized ribbed CLTs – the future," in 22. *Internationales Holzbau-Forum IHF*, 2016: Forum Holzbau. [Online]. Available: [https://www.hcltp.com/files/ugd/316835\\_413e624fafd546ca95524e3b578121ac.pdf](https://www.hcltp.com/files/ugd/316835_413e624fafd546ca95524e3b578121ac.pdf). [Online]. Available: [https://www.hcltp.com/files/ugd/316835\\_413e624fafd546ca95524e3b578121ac.pdf](https://www.hcltp.com/files/ugd/316835_413e624fafd546ca95524e3b578121ac.pdf)
- [82] P. Mayencourt und C. Mueller, "Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way bending," *Structures*, vol. 18, pp. 48-59, 2019.
- [83] A. Fadai und W. Winter, "Ressourceneffiziente Konstruktionen in Holzleichtbeton-Verbundbauweise," *Bautechnik*, vol. 91, no. 10, pp. 753-763, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/bate.201300090>.
- [84] B. Kromoser und P. Holzhaider, "An innovative resource-efficient timber-concrete-composite ceiling system: Feasibility and environmental performance," *Civil Engineering Design*, vol. 3, no. 5-6, pp. 179-191, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/cend.202100022>.
- [85] Rematter AG "Holz-Lehm-Decken", in *Factsheet*, 2023.
- [86] R. Jussel, "HORTUS – Bauen nach dem Standard von morgen", in 27. *Internationale Holzbau-Forum (IHF) Band II 30. November und 1. Dezember 2023* Biel, Forum Holzbau, 2023.
- [87] A. Fadai, M. Rinnhofer und W. Winter, "Aktivierung der Verglasung zur Aussteifung mehrgeschossiger Bauten," *ce/papers*, vol. 1, no. 1, pp. 118-130, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/cepa.14>.
- [88] A. Fadai und D. Stephan, "Ressourceneffiziente Planung großflächiger Holz-Glas-Fassaden | Ökologische und energetische Bewertung," *ce/papers*, vol. 4, no. 1, pp. 105-118, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/cepa.1246>.
- [89] A. Fadai und D. Stephan, "Ecological performance of reusable load-bearing constructions," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1078, no. 1, 2022/09/01 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1078/1/012123.
- [90] Österreichisches Institut für Bautechnik "OIB-Grundlagendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7 Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen", Wien, 2023.
- [91] L.-M. Ottenhaus, Z. Yan, R. Brandner, P. Leardini, G. Fink und R. Jockwer, "Design for adaptability, disassembly and reuse – A review of reversible timber connection systems," *Construction and Building Materials*, vol. 400, p. 132823, 2023/10/12/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132823>.
- [92] H. Schulze, "Lebensdauer von Holzhäusern," in *Holzbau: Wände – Decken – Bauprodukte – Dächer – Konstruktionen – Bauphysik – Holzschutz*, H. Schulze Ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005, pp. 509-514.
- [93] J. Wang, X. Cao und H. Liu, "A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 79, no. 2, pp. 245-259, 2021/03/01 2021, doi: 10.1007/s00107-020-01623-9.

- [94] D. Lenz, "Schichten als kreislaufgerechtes Prinzip," in *Sortenrein Bauen : Methode, Material, Konstruktion*, V. Calavetta, S. Bytomski, und P. Holtmann Eds., Erste Auflage ed. München: München : Edition Detail, 2023, pp. 231 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 30 cm.
- [95] J. Graf, "Entflechtung von Wachstum und Ressourcenverbrauch," *Bautechnik*, vol. 97, no. S2, pp. 108-115, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/bate.202000078>.
- [96] E. Boerman, "Materialien der Kreislaufwirtschaft," in *Sortenrein Bauen : Methode, Material, Konstruktion*, V. Calavetta, S. Bytomski, und P. Holtmann Eds., Erste Auflage ed. München: München : Edition Detail, 2023, pp. 231 Seiten, Illustrationen, Diagramme, Pläne, 30 cm.
- [97] KÜNG HOLZBAU AG "LIGNOTHERM Holzboden Heizsystem", in *Broschüre*, 2021.
- [98] P. Hradil, A. Talja, M. Wahlström, S. Huuhka, J. Lahdensivu und J. Pikkuvirta, "Re-use of structural elements: Environmentally efficient recovery of building components", 2014.
- [99] C. Cristescu *et al.*, "Design for deconstruction and reuse of timber structures—state of the art review", 2020.
- [100] Y. Sandin *et al.*, "Design of Timber Buildings for Deconstruction and Reuse — Three methods and five case studies (open access)", in *RISE Report 2022:52*, Project InFutUReWood, 2022.
- [101] DP6 architectuurstudio "The Natural Pavilion / DP6 architectuurstudio." ArchDaily. <https://www.archdaily.com/990176/the-natural-pavilion-dp6-architectuurstudio> (besucht 06.02., 2024).
- [102] I. Bertin, F. Lebrun, N. Braham und R. Le Roy, "Construction, deconstruction, reuse of the structural elements: the circular economy to reach zero carbon," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 323, p. 012020, 09/06 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012020.
- [103] O. O. Akinade *et al.*, "Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills," *Waste Management*, vol. 60, pp. 3-13, 2017/02/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>.
- [104] G. Bertino, J. Kisser, J. Zeilinger, G. Langergraber, T. Fischer und D. Österreicher, "Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 939, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/939>.
- [105] K. F. Arisya und R. Suryantini, "Modularity in Design for Disassembly (DfD): Exploring the Strategy for a Better Sustainable Architecture," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 738, no. 1, p. 012024, 2021/04/01 2021, doi: 10.1088/1755-1315/738/1/012024.
- [106] W. Huß, S. Geier, F. Lattke und M. Stieglmeier, "Planung," in *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*, H. Kaufmann, S. Krötsch, und S. Winter Eds., Erste Auflage ed. München: DETAIL, 2017.
- [107] S. Jacob-Freitag, "Architekturobjekte - Ersatzparlament Wien." Heinze GmbH. <https://www.heinze.de/architekturobjekt/ersatzparlament-wien/12712686/?q=ersatzparament&pos=1> (besucht 20. Mai, 2024).
- [108] Oslo tre architects "HasleTre Office." ArchDaily. <https://www.archdaily.com/1002449/hasletre-office-oslo-tre-architects> (besucht 21 Mai, 2024).
- [109] O. Flindall, J. Tycho und M. Groba, "HASLETRE: NORWAY'S FIRST TIMBER OFFICE BUILDING DESIGNED FOR DISASSEMBLY AND REUSE", in *World Conference on Timber*

- Engineering (WCTE 2023)*Oslo, Norway, World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023), 2023.
- [110] Verein Minergie (Hrsg.) "Neu Bauen mit Minergie."  
<https://www.minergie.ch/de/standards/neubau/> (besucht 23. Februar, 2024).
- [111] NNBS. *Kriterienbeschreibung SNBS-HOCHBAU Nutzungsarten Wohnen, Verwaltung, Bildungsbauten, Gewerbenutzung im Erdgeschoss*, Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz NNBS, Zürich, 2024.
- [112] SNBS, "Kriterium 222 Nutzungsdichte Wohnen - Hilfstool-Version 2023.12", in *Excel-Hilfstool*, SNBS, 2023.
- [113] Statistik Austria "Wohnen: Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik", Wien: Statistik Austria, 2022.
- [114] T. Kenkmann *et al.*, "Flächensparend Wohnen Energieeinsparung durch Suffizienzpolitiken im Handlungsfeld „Wohnfläche“", vol. 104/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt, 2019.
- [115] K. Pfäffli, J. Nipkow, S. Schneider und M. Hänger, "Grundlagen zu einem Suffizienzpfad Energie - Das Beispiel Wohnen", Zürich, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen, 2012.
- [116] P. Jung, "Skelett-/Rahmen- und Brettsperrholzbauweise im direkten Vergleich", in *23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017*, Forum Holzbau, 2017.
- [117] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit "Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Büro und Verwaltungsgebäude, Hauptkriteriengruppe Ökonomische Qualität, Kriteriengruppe Wirtschaftlichkeit und Wertstabilität, Kriterium Anpassungsfähigkeit", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015.
- [118] Minergie-Eco, "Vorgabenkatalog Minergie-Eco Neubau MFH, Nachweisversion 1.5 ME-ECO Online 2020, Version 1.4 / Januar 2018", Minergie-Eco, 2020.
- [119] Schweizer Ingenieur- und Architektenverein SIA "Haus des Holzes - das Entwicklungs- und Vorzeigeprojekt für das Bauen in Zukunft."  
<https://www.prixsia.ch/project/1148/Haus-des-Holzes-das-Entwicklungs-und-Vorzeigeprojekt-f-r-das-Bauen-in-Zukunft#pid=17> (besucht 26. März, 2024).
- [120] Pirmin Jung Schweiz AG "Haus des Holzes - Entwicklungs- und Vorzeigeprojekt für das Bauen in Zukunft." <https://www.pirminjung.ch/hausdesholzes> (besucht 26. März, 2024).
- [121] P. Jung, "Haus des Holzes Bauen in die Zukunft," in *Webinar Aufzeichnung "Zukunft Holzbau 2022"*, 2022: Vinzenz Harrer GmbH. [Online]. Available: <https://www.harrer.at/de/service/videothek/webinare/>. [Online]. Available: <https://www.harrer.at/de/service/videothek/webinare/>
- [122] Pirmin Jung Schweiz AG "Journal - Unterlagsboden mal anders."  
<https://www.pirminjung.ch/journal/unterlagsboden-mal-anders> (besucht 26. März, 2024).
- [123] Informationsdienst Holz "Eröffnung des Haus des Holzes." Informationsdienst Holz. <https://informationsdienst-holz.de/details/eroeffnung-des-haus-des-holzes> (besucht 26. März, 2024).
- [124] O. Bopp, "Pirmin Jung Schweiz AG, persönliche Kommunikation," 2024.
- [125] Kanton Luzern "Nutzungsplanung." <https://www.geo.lu.ch/map/zonenplan/> (besucht 26. März, 2024).
- [126] Architekturbüro Reinberg ZT GmbH und G. Reinberg, "Architektur für eine solare Zukunft / Architecture for a Solar Future", Berlin, Boston, Birkhäuser, 2021.

- [127] GB\*Stadtteilbüro für die Bezirke 3, 5, 10 und 11 „, "DAS SONNWENDVIERTEL", in *LEBENDIG, LEISTBAR, L(I)EBENSWERT*Wien, Stadt Wien– Technische Stadterneuerung, 2023.
- [128] G. Reinberg, "Gastvortrag "Solararchitektur und Werkbericht"", in *Modul Ressourceneffiziente Materialisierung SS2023, Masterstudium Architektur, Hocheffiziente Gebäudekonzepte mit Naturbaustoffen*, Technische Universität Wien, Institut für Trag Werk Holz Bau, am 03.05.2023, 2023.
- [129] Architekturbüro Reinberg ZT GmbH "Errichtung eines Wohnheimes: Baugruppe Bikes & Rails", in *Bestandsplan*Wien, 2016.
- [130] K. Pock, "Bikes & Rails." <https://www.kurtpock.at/projekte/detail/bikes-and-rails.html> (besucht 03. April, 2024).
- [131] Architekturzentrum Wien "Wohnanlage Bikes and Rails." nextroom - Verein zur Förderung der kulturellen Auseinandersetzung mit Architektur. <https://www.nextroom.at/building.php?id=40261> (besucht 03. April, 2024).
- [132] A. Isopp, "Bikes & Rails, Wien, Balkone mit Auflager und Abspannung", in *in Zuschnitt 86 Balkone im Holzbau*, 2022.
- [133] Stadt Wien "Flächenwidmungs- und Bebauungsplan." <https://www.wien.gv.at/flaechenwidmung/public/> (besucht 05. April, 2024).
- [134] Österreichisches Institut für Bautechnik "OIB-Richtlinie 2 Brandschutz", Wien, 2023.
- [135] J. Ahrenberg, "Baugruppe Walden 48, Berlin - Keimzelle für den Wohnungsbau", in *DBZ Deutsche Bauzeitschrift* vol. 04 | 2021Berlin, Bund Deutscher Baumeister, Architekten und Ingenieure e.V, 2021, pp. 48-53.
- [136] J. Wiedemeier, "Schöner Wohnen auf dem Friedhof", in *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung* vol. 23. Oktober 2016 Nr. 42Frankfurt, 2016, p. 51.
- [137] E. Obermoser, "Gesundes Wohnen am Friedhof", in *Architektur Fachmagazin* vol. 02/2021Perchtoldsdorf, 2021.
- [138] ifb frohloff staffa kühler ecker Beratende Ingenieure PartG mbB "Wohngebäude Walden 48, Berlin." <https://www.ifb-berlin.de/projekte/alle/wohngebaeude-walden-48#weiterlesen> (besucht 10. April, 2024).
- [139] F. Scharabi und S. Scharabi, "wohnbau mit textilem Sonnenschutz: Baugemeinschaftsprojekt in Berlin", vol. 1.2021, Quartier Fachmagazin für urbanen Wohnungsbau, 2021.
- [140] M. Kühl, "Urbaner Holzbau - Walden 48 - die Rückkehr des Holzbaus in die Stadt", in *Bautechnik 98, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2*, 2021, pp. 115-121.
- [141] F. Scharabi, "Scharabi Architekten, persönliche Kommunikation,".
- [142] U. Schmidt, "Wohngebäude Walden 48 in Berlin." Baunetz Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/schiefer/objekte/wohnen-mfh/wohngebaeude-walden-48-in-berlin-7519043> (besucht 12. April, 2024).
- [143] I. Andernach, "ENEV-Nachweis (Stand Ausführungsplanung) - Walden 48", in *Heinze ArchitekturAWARD 2022: 1. Platz - Nachhaltiger Wohnungsbau*, Heinze GmbH, 2017.
- [144] ifb frohloff staffa kühler ecker Beratende Ingenieure PartG mbB "Urbaner Holzbau - Walden 48 - die Rückkehr des Holzbaus in die Stadt", in *Bautechnik 98, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2*, M. Kühl, 2021, pp. 115-121.
- [145] A. Kharazipour und U. Kües, "20. Recycling of Wood Composites and Solid Wood Products", in *Wood production, wood technology, and biotechnological impacts*, 2007.
- [146] Stattbau GmbH "STATTBAU filmt - Videoexkursion zum Projekt: Walden48", Interview mit Susanne und Farid Scharabi Berlin, Stattbau GmbH, 2020.

- [147] G. Bauer, R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Holzriegelhof", in *Projektarbeit Tragwerke - Ressourceneffiziente Tragwerksplanung und Holzbau*, Wien, 2024.
- [148] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Präsentationsvideo Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024.
- [149] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Projektbeschreibung Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024.
- [150] R. Faul, M. Huber und A. Michel, "Projektplakate Holzriegelhof", in *proHolz Student Trophy 2024 woodencity*, Wien, 2024.
- [151] proHolz Austria "Bauplatz 2 Ergänzung Blockrand." <https://www.proholz.at/student-trophy/bauplatz-2> (besucht 20. April, 2024).
- [152] X-Fix Holzverbinder "Wie funktioniert X-fix?", <https://x-fix.at/pages/wie-funktioniert-x-fix> (besucht 21. April, 2024).
- [153] SIHGA GmbH "IDEFIX IF/IFD." <https://www.sihga.com/idefix-if-ifd/> (besucht 21. April, 2024).



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Lineares Wirtschaftsprinzip (Eigene Darstellung nach [17]).....	2
Abbildung 2-1: Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Eigene Darstellung nach [17]) .....	9
Abbildung 2-2: Abfallhierarchie (Eigene Darstellung nach [12]) .....	11
Abbildung 2-3: Technischer Kreislauf (Eigene Darstellung nach [25]).....	13
Abbildung 2-4: Biotischer Kreislauf (Eigene Darstellung nach [25]).....	14
Abbildung 2-5: Hierarchie kreislauffähiger Neubauten (Eigene Darstellung nach [26]) .....	15
Abbildung 3-1: Vertikale und horizontale Bauelemente aus Holz (Eigene Darstellung nach [57]) .....	24
Abbildung 3-2: Scherschichten (Eigene Darstellung nach [5]) .....	27
Abbildung 3-3: Verbindungstechniken im Holzbau (Eigene Darstellung nach [65]) .....	31
Abbildung 3-4: Anschluss Wand-Decke-Wand (aus [65]).....	33
Abbildung 3-5: Zug- und Scherverbindung durch Verschraubung (aus [65]).....	33
Abbildung 4-1: Lebenszyklusinformations-Module nach ÖNORM EN 15978-1, Hervorhebung von Modulen mit besonderer Relevanz für die Kreislaufwirtschaft (Eigene Darstellung, nach [80]) .....	42
Abbildung 4-2: Wiederverwendungs- und Recyclingprozess (Eigene Darstellung, nach [18])	43
Abbildung 4-3: Geometrisch optimierte Holz-Beton-Verbund-Decke (aus [84]) .....	46
Abbildung 4-4: Baukonstruktive Schichten (Eigene Darstellung nach [94]).....	51
Abbildung 4-5: Statisch erforderliche Bauteile eines nutzungsneutralen Holzskelettbaus (Eigene Darstellung, nach [26]) .....	52
Abbildung 4-6: Vertikale Leitungsführung in Schächten (aus [26]).....	55
Abbildung 4-7: Lösbare Verbindungen für sichtbare Oberflächen (aus [26]) .....	58
Abbildung 4-8: Flexible Grundrissgestaltung durch nicht tragende Innenwände (aus [26]) ...	60
Abbildung 4-9: Re-Use-Hierarchie (Eigene Darstellung nach [99]) .....	62
Abbildung 4-10: Re-Use-Kreisläufe (Eigene Darstellung) .....	63
Abbildung 4-11: Standardisiertes und modulares Skeletttragwerk in Holzbauweise (Eigene Darstellung nach [26]) .....	70
Abbildung 4-12: Reversibler Wand-Decken-Stoß mit Schubkraftübertragung über Fingerzinken und Zugkraftübertragung mittels axial beanspruchter Gewindestangen (aus [95]) .....	71
Abbildung 4-13: Reversible Verbindung zur Schubkraftübertragung aus Kunstharzpressholz-Dübeln und metrischen Schrauben (aus [26]) .....	72
Abbildung 4-14: Nachhaltigkeitshierarchie am Lebensende (Eigene Darstellung nach [104])	74
Abbildung 5-1: SNBS-Hilfstool (Kriterium 222) zur Berechnung der Pro-Kopf-Wohnfläche (aus [112]) .....	85
Abbildung 5-2: Materialbedarf verschiedener Holzdeckensysteme im Vergleich (Eigene Darstellung, nach [57]) .....	89
Abbildung 6-1: Haus des Holzes - Querschnitt mit Nutzung: Büro (blau), Wohnen (grün), Sportstudio (rot) und Untergeschoss (grau) ( Eigene Bearbeitung aus [119]).....	103
Abbildung 6-2: Haus des Holzes - Grundriss Tragwerk (aus [121]) .....	103
Abbildung 6-3: Haus des Holzes - Grundriss 2. OG mit Steigschächten (Bearbeitet, aus [119]) .....	110
Abbildung 6-4: Haus des Holzes - Modell des Tragwerks (aus [121]) .....	115
Abbildung 6-5: Haus des Holzes - Wandstoß Aussteifung Haus des Holzes (aus [121]) .....	117
Abbildung 6-6: Bikes & Rails - Querschnitt mit Nutzung und Energiekonzept (aus [130]) ...	124
Abbildung 6-7: Bikes & Rails - Konstruktionsprinzip (aus [126]) .....	125

Abbildung 6-8: Bikes & Rails - Grundriss und Tragsystem - Erdgeschoss und Regelgeschoss (aus [126]) .....	125
Abbildung 6-9: Bikes & Rails - Südseitige Außenwand zwischen Wohnung und Wintergarten (aus [126]) .....	131
Abbildung 6-10: Bikes & Rails - Querschnitt Tragwerk (aus [126]).....	137
Abbildung 6-11: Bikes & Rails - 3D-Modell (aus [126]) .....	141
Abbildung 6-12: Walden 48 - Grundriss EG und RG (aus [137]).....	146
Abbildung 6-13: Walden 48 - Ausschnitt Tragwerk (aus [137]).....	147
Abbildung 6-14: Walden 48 - Längsschnitt (aus [107]) .....	159
Abbildung 6-15: Walden 48 - Querschnitt Tragwerk (aus [144]).....	160
Abbildung 6-16: Walden 48 - Wand-Decke-Wand-Stoß (aus [140]) .....	162
Abbildung 7-1: Holzriegelhof - Bestandsbebauung (aus [148]) .....	173
Abbildung 7-2: Holzriegelhof - Rückbau des Bestands im Erdgeschoss (aus [148]) .....	173
Abbildung 7-3: Holzriegelhof - Öffnen bestehender Tiefgarage zum Hofniveau (aus [148]).	174
Abbildung 7-4: Holzriegelhof - Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart (aus [149]) ...	174
Abbildung 7-5: Holzriegelhof - Wohnungsvarianten (aus [149]).....	174
Abbildung 7-6: Holzriegelhof - Zusammenschluss zu Cluster-Wohnungen (aus [149]) .....	175
Abbildung 7-7: Holzriegelhof - Bauteilstöße (aus [149]).....	176
Abbildung 7-8: Holzriegelhof - Erschließung Erdgeschoss (aus [148]).....	176
Abbildung 7-9: Holzriegelhof - Erschließung Regelgeschoss (aus [148]) .....	177
Abbildung 7-10: Holzriegelhof - Aufschlüsselung der Flächen (aus [150]) .....	177
Abbildung 7-11: Holzriegelhof - Grundriss Erdgeschoss (aus [150]).....	178
Abbildung 7-12: Holzriegelhof - Grundriss Regelgeschoss (aus [150]) .....	179
Abbildung 7-13: Holzriegelhof - Tragwerk Isometrie (aus [150]).....	180
Abbildung 7-14: Holzriegelhof - Stützenknoten (aus [150]).....	181
Abbildung 7-15: Holzriegelhof - Wandstoß aussteifend (aus [150]) .....	182
Abbildung 7-16: Holzriegelhof - Wandstoß Fassade (aus [150]) .....	183
Abbildung 7-17: Holzriegelhof - Haustechnisches Konzept (aus [149]) .....	184
Abbildung 7-18: Holzriegelhof - Städtebauliche Einbindung v.li.n.re. Bestandsprüfung und Teilabriss, maximales Bauvolumen und Blockrandschluss, Freischneiden des Volumens, Schaffen der Zugänge, Erschließung über Kerne und Laubengänge (aus [149]).....	184
Abbildung 7-19: Holzriegelhof - Innenhofkonzept (aus [149]).....	185
Abbildung 7-20: Holzriegelhof - Visualisierung Innenhof (aus [149]) .....	186
Abbildung 7-21: Holzriegelhof - Visualisierung Straßenecke (aus [149]).....	186
Abbildung 7-22: Holzriegelhof - Eingabe des Wohnungsspiegels in SNBS-Hilfstool (aus [112]) .....	188
Abbildung 7-23: Holzriegelhof - Schematische Darstellung Tragwerk (aus [149]).....	197
Abbildung 7-24: Holzriegelhof - angepasste Aussteifung (eigene Darstellung) .....	205
Abbildung 7-25: Holzriegelhof - Festlegen "kurzlebiger" Bauteile (bearbeitet aus [149]) ...	206

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bewertung der Lösbarkeit von ausgewählten Fügemethoden nach [63] (SK: Schwerkraft, FS: Formschluss, KS: Kraftschluss, FK: Federkraft, AD: Adhäsion), (1: ohne Schädigung lösbar, 2: im Allgemeinen ohne Schädigung oder Zerstörung lösbar, 3: im Allgemeinen mit, teils jedoch auch ohne Schädigung oder Zerstörung lösbar, 4: im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung lösbar, 5: nur durch Schädigung oder Zerstörung lösbar) .....	31
Tabelle 4-1: Hebel zur Ressourcenreduktion durch Suffizienz (aus [5]) .....	38
Tabelle 4-2: Lebensdauern von Holzbauteilen (nach [47]) .....	50
Tabelle 5-1: Systematik des SNBS-Systems beispielhaft am Kriterium „Wiederverwendung und Systemtrennung“ [111] .....	79
Tabelle 5-2: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Reduce .....	80
Tabelle 5-3: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Long-Use .....	81
Tabelle 5-4: Kriteriengruppen und Kriterien zum Themenfeld Re-Use und Recycle.....	82
Tabelle 5-5: Messgrößen Flächeninanspruchnahme .....	84
Tabelle 5-6: Messgrößen Nutzungsdichte .....	86
Tabelle 5-7: Messgrößen Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung .....	87
Tabelle 5-8: Messgrößen Reduktion des Stahlbetonteils .....	88
Tabelle 5-9: Messgrößen Effizienz des Holztragwerks.....	89
Tabelle 5-10: Messgrößen ökologische Baustoffwahl .....	90
Tabelle 5-11: Messgrößen Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart .....	91
Tabelle 5-12: Messgrößen Umnutzung für eine andere Nutzungsart.....	92
Tabelle 5-13: Messgrößen Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit .....	93
Tabelle 5-14: Messgrößen Langlebigkeit des Holztragwerks .....	94
Tabelle 5-15: Messgrößen Austausch und Reparatur .....	95
Tabelle 5-16: Messgrößen Wiederverwendungspotenzial .....	96
Tabelle 5-17: Messgrößen Demontierbarkeit .....	97
Tabelle 5-18: Beurteilung der Trennbarkeit der Verbindungsmittel zwischen Bauteilen .....	98
Tabelle 5-19: Messgrößen Trennbarkeit.....	99
Tabelle 5-20: Messgrößen Informationsverfügbarkeit.....	99
Tabelle 5-21: Messgrößen Materialrecycling .....	100
Tabelle 6-1: Haus des Holzes – Flächen und Volumen .....	102
Tabelle 6-2: Haus des Holzes – Bewertung der Flächeninanspruchnahme .....	105
Tabelle 6-3: Haus des Holzes - Bewertung der Nutzungsdichte.....	106
Tabelle 6-4: Haus des Holzes - Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung .....	107
Tabelle 6-5: Haus des Holzes - Bewertung Reduktion des Stahlbetonteils .....	108
Tabelle 6-6: Haus des Holzes - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks.....	108
Tabelle 6-7: Haus des Holzes – Bewertung der ökologischen Baustoffwahl .....	109
Tabelle 6-8: Haus des Holzes - Bewertung der Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart .....	110
Tabelle 6-9: Haus des Holzes – Bewertung der Umnutzung für eine andere Nutzungsart....	111
Tabelle 6-10: Haus des Holzes - Bewertung der Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit.....	112
Tabelle 6-11: Haus des Holzes – Bewertung der Langlebigkeit des Tragwerks .....	113

Tabelle 6-12: Haus des Holzes – Bewertung Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau .....	114
Tabelle 6-13: Haus des Holzes – Bewertung des Wiederverwendungspotenzials .....	116
Tabelle 6-14: Haus des Holzes – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile .....	118
Tabelle 6-15: Haus des Holzes – Bewertung der Trennbarkeit innerhalb der Bauteile.....	119
Tabelle 6-16: Haus des Holzes – Bewertung Informationsverfügbarkeit .....	120
Tabelle 6-17: Haus des Holzes – Bewertung Materialrecycling.....	121
Tabelle 6-18: Haus des Holzes - Auswertung.....	121
Tabelle 6-19: Bikes & Rails - Flächen und Volumen.....	123
Tabelle 6-20: Bikes & Rails - Bewertung der Flächeninanspruchnahme .....	126
Tabelle 6-21: Bikes & Rails - Bewertung der Nutzungsdichte.....	127
Tabelle 6-22: Bikes & Rails – Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung .....	128
Tabelle 6-23: Bikes & Rails - Bewertung der Reduktion des Stahlbetonteils.....	129
Tabelle 6-24: Bikes & Rails - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks .....	129
Tabelle 6-25: Bikes & Rails - Bewertung Ökologische Baustoffwahl .....	130
Tabelle 6-26: Bikes & Rails – Bewertung der Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart	132
Tabelle 6-27: Bikes & Rails - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart.....	133
Tabelle 6-28: Bikes & Rails - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit.....	134
Tabelle 6-29: Bikes & Rails – Bewertung der Langlebigkeit des Tragwerks.....	135
Tabelle 6-30: Bikes & Rails – Bewertung von Austausch und Reparatur der Haustechnik, der Gebäudehülle und des Ausbaus.....	136
Tabelle 6-31: Bikes & Rails – Bewertung Wiederverwendungspotenzial.....	138
Tabelle 6-32: Bikes & Rails – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile.....	139
Tabelle 6-33: Bikes & Rails – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile.....	141
Tabelle 6-34: Bikes & Rails – Bewertung der Informationsverfügbarkeit.....	142
Tabelle 6-35: Bikes & Rails – Bewertung des Materialrecyclings .....	143
Tabelle 6-36: Bikes & Rails - Auswertung .....	144
Tabelle 6-37: Walden 48 - Flächen und Volumen.....	145
Tabelle 6-38: Walden 48 – Bewertung der Flächeninanspruchnahme .....	148
Tabelle 6-39: Walden 48 - Bewertung Nutzungsdichte .....	149
Tabelle 6-40: Bikes & Rails - Bewertung Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung .	150
Tabelle 6-41: Walden 48 - Bewertung Reduktion des Stahlbetonteils.....	151
Tabelle 6-42: Walden 48 - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks .....	151
Tabelle 6-43: Walden 48 – Bewertung der ökologische Baustoffwahl.....	152
Tabelle 6-44: Walden 48 - Bewertung Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart .....	154
Tabelle 6-45: Walden 48 - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart.....	155
Tabelle 6-46: Walden 48 - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit.....	156
Tabelle 6-47: Walden 48 - Bewertung Langlebigkeit des Tragwerks .....	157
Tabelle 6-48: Walden 48 – Bewertung von Austausch und Reparatur der Haustechnik, der Gebäudehülle und des Ausbaus.....	158
Tabelle 6-49: Walden 48 – Bewertung des Wiederverwendungspotenzials .....	161
Tabelle 6-50: Walden 48 – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile.....	163
Tabelle 6-51: Walden 48 – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile.....	164
Tabelle 6-52: Bikes & Rails – Bewertung Informationsverfügbarkeit .....	165
Tabelle 6-53: Walden 48 – Bewertung Materialrecycling .....	166
Tabelle 6-54: Walden 48 - Auswertung .....	167
Tabelle 6-55: Gegenüberstellung der Referenzgebäude .....	168

Tabelle 7-1: Holzriegelhof - Bewertung der Flächeninanspruchnahme.....	187
Tabelle 7-2: Holzriegelhof – Bewertung der Nutzungsdichte.....	188
Tabelle 7-3: Holzriegelhof – Bewertung der Bauteilwiederverwendung und Bestandsnutzung .....	189
Tabelle 7-4: Holzriegelhof - Bewertung der Reduktion des Stahlbetonanteils .....	190
Tabelle 7-5: Holzriegelhof - Bewertung der Ressourceneffizienz des Holztragwerks .....	190
Tabelle 7-6: Holzriegelhof - Bewertung der ökologischen Baustoffwahl .....	191
Tabelle 7-7: Holzriegelhof - Bewertung Umnutzung innerhalb derselben Nutzungsart.....	192
Tabelle 7-8: Holzriegelhof - Bewertung Umnutzung für eine andere Nutzungsart .....	193
Tabelle 7-9: Holzriegelhof - Bewertung Nutzungsvielfalt und Erweiterbarkeit.....	194
Tabelle 7-10: Holzriegelhof - Bewertung Langlebigkeit des Tragwerks.....	195
Tabelle 7-11: Holzriegelhof – Bewertung Austausch und Reparatur Haustechnik, Gebäudehülle und Ausbau .....	196
Tabelle 7-12: Holzriegelhof – Bewertung Wiederverwendungspotenzial .....	198
Tabelle 7-13: Holzriegelhof – Bewertung der Demontierbarkeit der Bauteile .....	200
Tabelle 7-14: Holzriegelhof – Bewertung Trennbarkeit innerhalb der Bauteile.....	201
Tabelle 7-15: Holzriegelhof – Bewertung Informationsverfügbarkeit.....	201
Tabelle 7-16: Holzriegelhof – Bewertung Materialrecycling .....	203
Tabelle 7-17: Holzriegelhof - Auswertung .....	203
Tabelle 8-1: Einfluss verschiedener Maßnahmen .....	209

## Anhang – Einverständniserklärungen Projektarbeit

### Einverständniserklärung

Ich *Robert Faul*, Mitglied des Teams, das den Kurs 259.633 *Entwerfen Woodencyty | Holz und die Stadt (UE 8,0) 2023W* und den Wettbewerb *proHolz Student Trophy 24 woodencyty* bearbeitet hat, erkläre mich hiermit einverstanden, dass die von mir im Rahmen des Kurses und Wettbewerbs erstellten Inhalte in der Masterarbeit von *Maximilian Huber* mit dem Titel „*Ressourceneffiziente und recyclinggerechte Planung im mehrgeschossigen Holz-Hybrid-Wohnungsbau*“ verwendet werden dürfen.

Ort, Datum

Wien, 22.04.2024

Unterschrift



### Einverständniserklärung

Ich *Aaron Michel*, Mitglied des Teams, das den Kurs 259.633 *Entwerfen Woodencyty | Holz und die Stadt (UE 8,0) 2023W* und den Wettbewerb *proHolz Student Trophy 24 woodencyty* bearbeitet hat, erkläre mich hiermit einverstanden, dass die von mir im Rahmen des Kurses und Wettbewerbs erstellten Inhalte in der Masterarbeit von *Maximilian Huber* mit dem Titel „*Ressourceneffiziente und recyclinggerechte Planung im mehrgeschossigen Holz-Hybrid-Wohnungsbau*“ verwendet werden dürfen.

Ort, Datum

Wien, 24.04.24

Unterschrift



### Einverständniserklärung

Ich *Guido Bauer*, Mitglied des Teams, das den Kurs 259.633 *Entwerfen Woodencyty | Holz und die Stadt (UE 8,0) 2023W* bearbeitet hat, erkläre mich hiermit einverstanden, dass die von mir im Rahmen dieses Kurses erstellten Inhalte in der Masterarbeit von *Maximilian Huber* mit dem Titel „*Ressourceneffiziente und recyclinggerechte Planung im mehrgeschossigen Holz-Hybrid-Wohnungsbau*“ verwendet werden dürfen.

Ort, Datum

Wien 22.4.2024

Unterschrift

