



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Bauen im Anthropozän

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs / Diplom-Ingenieurin
unter der Leitung**

Ass. Prof. Arch. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mladen Jadric

E253 Institut für Architektur und Entwerfen

Forschungsbereich Hochbau und Entwerfen

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Asmira Husic, BSc

01326928

Wien, am 07.01.2020

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit thematisiert die Anwendungsmöglichkeiten der Kreislaufwirtschaft in Architektur und Bauwesen. Ziel ist es, auf die Dringlichkeit eines Paradigmenwechsels in Architektur und Bauwesen aufmerksam zu machen und dahingehend unterschiedliche Modelle zu diskutieren. Dies passiert vor dem generellen Hintergrund der aktuellen Klimadebatte und der spezifischen, negativen Auswirkungen gegenwärtiger Bautätigkeiten auf die Umwelt. Dazu wird einerseits die Problematik der aktuellen Architektur- und Baupraxis in Bezug auf klimatische Veränderungen und den globalen Ressourcenverbrauch beleuchtet. Andererseits werden entsprechende Alternativen und Lösungsansätze für eine klima- und ressourcenschonende Architektur erörtert. Im Wesentlichen zeigt die Arbeit, dass die heutigen linearwirtschaftlichen Praktiken sowohl in der Planung als auch in der Ausführung zu überdenken sind. Die Kreislaufwirtschaft wird dabei als zukunftsweisendes Modell für das Bauwesen dargestellt. Anhand von ausgewählten Gebäudebeispielen wird ersichtlich, dass das erforderliche Know-How für geschlossene Kreisläufe in der Architektur bereits vorhanden ist und die Anwendung dieses Wissens auch aus ökonomischen Gesichtspunkten wichtige Vorteile generiert. Eine weitgehende Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Planung und ökoeffizienter Bauabwicklung soll in Zukunft abfallarmes sowie klima- und ressourcenschonendes Bauen ermöglichen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit basieren auf theoretischen und empirischen Grundlagen und sollen insbesondere Architektinnen und Architekten zur Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte in der Planung motivieren.

Abstract

This diploma thesis deals with the possible applications of circular economy in architecture and construction. The aim is to draw attention to the urgency of a paradigm shift in architecture and construction and to discuss different models in this respect. This happens against the general background of the current climate debate and the specific negative effects of current construction activities on the environment. On the one hand, the problems of contemporary architecture and building practice with regard to climatic change and the global consumption of resources will be examined. On the other hand, alternatives and solutions for a climate- and resource-friendly architecture are discussed. Essentially, this paper shows that today's linear economic practices need to be reconsidered both in planning and execution. The concepts of a circular economy are presented as forward-looking models for the construction industry. On the basis of selected building examples it becomes apparent that the necessary know-how for closed loops in architecture is already available and that the application of this knowledge also generates important advantages from an economic point of view. An extensive implementation of closed-loop planning and eco-efficient construction should enable low-waste, climate- and resource-friendly architecture in the future. The scientific findings of this thesis are based on theoretical and empirical principles and are intended to motivate architects in particular to take account of the aspects of closed-loop planning.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
1.1 Motivation	12
1.1.1 Architektur und Klima	12
1.1.2 Ressourcenverbrauch	13
1.1.3 Abfall	15
1.2 Forschungsfrage	17
1.3 Methodik	17
2. Architektur- und Baupraxis heute	21
2.1 Planung	23
2.1.1 Nutzungsplanung	23
2.1.2 Konstruktion	27
2.1.3 Material	28
2.2 Bauabwicklung	49
2.2.1 Rechtliche Hintergründe	50
2.2.2 Angewandte Rückbau- und Abbruchverfahren	52
2.3 Bewertungssysteme	56
2.3.1 Gebäudezertifizierung	56
2.3.2 Produktzertifizierung	58
2.4 Schlussfolgerung	60
3. Kreislaufwirtschaft im Bauen	63
3.1 Begriffsbestimmungen	64
3.1.1 Kreislaufwirtschaft	64
3.1.2 End-of-Life Potenziale	65
3.2 Kreislaufpotenziale als neue Parameter in der Architektur	68
4. Architekturkreisläufe	75
4.1 Städtebauliche Ebene	75
4.1.1 Schutzgut Boden	78
4.1.2 Regenwassermanagement	78
4.1.3 Ökonomie des Teilens	79
4.2 Bauwerksebene	80
4.2.1 Anpassungsfähiges Bauen	80
4.2.2 Ephemerer Bauen	87
4.3 Gebaute Beispiele - Kreislaufwirtschaftliche Planung	91

5. Kreislauffähige Konstruktionen	95
5.1 Lösbare Verbindungen und Konstruktionen	95
5.1.1 Gründung	95
5.1.2 Tragwerk	97
5.1.3 Gebäudehülle	98
5.1.4 Innenwandkonstruktionen	101
5.1.5 Fußbodenkonstruktionen	103
5.2 Einstoffliche Bauweisen	106
5.2.1 Biotischer Baustoff Holz	106
5.2.2 Mineralische Baustoffe	107
5.3 Gebaute Beispiele - Kreislauffähige Konstruktionen	113
6. Materialkreisläufe	121
6.1 Biotischer Kreislauf	121
6.1.1 Gründung und Tragwerk	121
6.1.2 Gebäudehülle	121
6.1.3 Bauplatten außen / innen	123
6.1.4 Oberflächen innen	124
6.1.5 Dämmungen	126
6.1.6 Gebaute Beispiele - biotischer Kreislauf	131
6.2 Technischer Kreislauf	135
6.2.1 Metallische Materialien	135
6.2.2 Mineralische Materialien	137
6.2.3 Gebaute Beispiele - technischer Kreislauf	143
6.2.4 Gebaute Beispiele - technisch-biotischer Kreislauf	153
6.2.5 Gebaute Beispiele - Materialkreisläufe durch Re-Use	161
6.3 Bauen mit lokalen Ressourcen	165
6.3.1 Gebaute Beispiele - Lokale Materialien	171
7. BIM als Planungsinstrument	177
7.1 Gebäudeplanung mit BIM	177
7.2 Rückbauplanung mit BIM	178
7.3 Aktuelle Forschungsfelder im BIM	179
8. Kostenvergleich	183
8.1 Kostenvergleich Einfamilienhaus - konventionell vs. recyclinggerecht	184
8.2 Kritik am Kostenvergleich	186
8.3 Kostenvergleich - konventionell vs. einstofflich	188
8.4 Fazit	191
9. Schlussfolgerung	195
10. Quellenverzeichnis	198
11. Abbildungsverzeichnis	202



Einleitung

1.1 Motivation

1.1.1 Architektur und Klima

1.1.2 Ressourcenverbrauch

1.1.3 Abfall

1.2 Forschungsfrage

1.3 Methodik

1. Einleitung

Der weltweite Städtebau trägt maßgeblich zur menschengemachten Veränderung des Planeten bei. Die zunehmende Urbanisierung stellt insbesondere die Architektur vor neue Herausforderungen. Wie wir im Anthropozän – dem Zeitalter des Menschen – künftig bauen und zugleich die negativen Externalitäten möglichst geringhalten können, ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit.

Die linearwirtschaftlichen Denkmuster nehmen folgeschwere Ausmaße an und sollten – sofern eine nachhaltige Lebensweise angestrebt wird – nicht weiter fortgeführt und unterstützt werden. Nimmt man sich die Natur zum Vorbild, ist das Denken und Handeln in Kreisläufen eine aussichtsreiche Lösung für nahezu alle Handlungsfelder. Ziel der Arbeit ist es zu erläutern, wie Architektur und Bauwesen in geschlossenen Kreisläufen geplant und gebaut werden können. Die Autorinnen des Recycling Atlas, halten das bereits vorhandene Know-How kreislauffähiger Architektur in ihrem literarischen Werk fest. [1] Bereits der Untertitel verweist auf die Notwendigkeit eines Wertewandels in der Bauwirtschaft: Gebäude als Materialressource begreifen und nutzen. Die vorliegende Arbeit stützt sich auf das Fachwissen des Recycling Atlas und ergänzt diese durch fundierte, empirische Forschungsergebnisse.

Einleitend wird im Motivationsteil der Zusammenhang zwischen Bautätigkeiten und weltweiten Umweltereignissen aufgezeigt und die daraus folgende Dringlichkeit eines Paradigmenwechsels betont. Mit besonderem Augenmerk auf die Nutzungsplanung, Konstruktion und Materialität von Gebäuden demonstriert die Arbeit die gegenwärtige Architektur- und Baupraxis. Anschließend wird im Hauptteil die Kreislaufwirtschaft als effektiver Lösungsansatz für die, eingangs dargestellte, Problematik umfangreich erläutert und mit Beispielen veranschaulicht. Die Arbeit zielt nicht auf eine quantitative Bewertung oder einen qualitativen Vergleich der einzelnen Lösungsansätze ab. Vielmehr sollen die Möglichkeiten und Potenziale einer klima- und ressourcenschonenden Architektur abgebildet und somit für künftige Architektengenerationen Anreize geschaffen werden, verstärkt auf diese Alternativen zurückzugreifen.

1.1 Motivation

1.1.1 Architektur und Klima

Die Architektur kann im wahrsten Sinne des Wortes seit jeher als Gegenspieler zum Klima begriffen werden. Bereits die vitruvianische Urhütte, die als frühestes Exempel den Sinn der Architektur und das Urprinzip des Bauens verkörpert, wurde errichtet um den Menschen vor klimatischen Einwirkungen zu schützen. Das älteste erhaltene Zeugnis zur Baukunst Vitruvs *Zehn Bücher über Architektur* hält diese These fest. Im ersten Kapitel des zweiten Buches berichtet er *Vom Ursprung der Gebäude* und argumentiert zunächst funktional: „Und zuerst richteten sie Gabelhölzer auf, schoben Zweige dazwischen und bedeckten die Wände mit Lehm [...], um Regenstürme und Hitze abzuhalten [...]“ [2]

Im Gegensatz zur Antike nimmt die Bedeutung „Gegenspieler zum Klima“ in der heutigen Zeit eine umgekehrte Rolle ein. Paradoxe Weise ist nicht mehr ganz klar, ob das Klima die Bedrohung für den Menschen oder der Mensch die Bedrohung für das Klima darstellt und wen es hier zu schützen gilt.

„Ours is a nation of affluence. But the technology that has permitted our affluence spews out vast quantities of wastes and spent products that pollute our air, poison our waters, and even impair our ability to feed ourselves. At the same time, we have crowded together into dense metropolitan areas where concentration of wastes intensifies the problem.“ [3]

Mit diesem Absatz beginnt der Bericht des wissenschaftlichen Beirats des amerikanischen Präsidenten Lyndon B. Johnson. 1965 wurde der Bericht mit dem Titel *Restoring the Quality of Our Environment* veröffentlicht und warnt vor den möglichen Auswirkungen des steigenden Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre. [4] Ein halbes Jahrhundert später leben wir bereits in dieser vorhergesagten Umweltkatastrophe. Die ersten Vorboten der Klimawandelfolgen sind bereits weltweit spürbar:

Die *Arctic Report Card 2018* stellt eine signifikante Erwärmung der Arktis fest. [5] Die Zeitschrift „*Nature*“ veröffentlicht kürzlich Untersuchungen, die darauf hindeuten, dass regionale Starkregenereignisse auf den Klimawandel zurückzuführen sind. [6] Diverse Studien zeigen weltweite Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Ökosysteme von Insekten und die damit verbundenen Einflüsse auf die natürliche Nahrungskette auf. [7] Umweltorganisationen warnen vor Migrationsbewegungen als Folge der zunehmenden Wüstenausbreitung. Klimawandelbedingte Dürreperioden führen zu Wasserknappheit, Ernteverlusten und Nahrungsmittelknappheit. [8]

Das *UN IPCC*, der Ausschuss für Klimawandel der Vereinten Nationen, schlägt Alarm: Wenn nicht bald eine Wende im menschlichen Denken und Handeln einkehrt, werden die Auswirkungen noch viel größere Ausmaße annehmen. [9]

Die aufstrebende Disziplin der Klimatologie zeigt besonders in den letzten Jahrzehnten den Konnex zwischen Bauwesen und Klima auf. Landesweit betrachtet sind die Sektoren Gebäude, Verkehr und Abfallwirtschaft für fast die Hälfte der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Der Ausstoß des Gebäudesektors beläuft sich im Jahr 2017 auf 8,3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent und ist somit für ca. 10 Prozent der Gesamtemissionen verantwortlich. [10] Hinzu kommt, dass zwei Drittel des Schwerlastenverkehrs baustellenbedingt sind. [11] Der Anteil des Bauwesens an der aktuellen Treibhausgas-Bilanz und am lokalen Feinstaubaufkommen ist immens.

Wissentlich im Anthropozän¹ angekommen, muss auch in der Architektur ein umfassender Paradigmenwechsel stattfinden. Intelligente Ausnutzung spezifischer und regionaler Gegebenheiten in der Planung sowie die Verringerung von Emissionen in der Bauabwicklung zählen folglich zu den zentralen Aufgaben einer zukunftsweisenden, nachhaltigen Architektur.

1.1.2 Ressourcenverbrauch

Die Weltbevölkerung wächst kontinuierlich und damit auch der Bedarf an Ressourcen. Die zunehmende Urbanisierung stellt uns vor eine weitere große Herausforderung. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) geht davon aus, dass bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts 80 Prozent der Bevölkerung in urbanen Agglomerationen leben werden. [12] Global betrachtet werden zur alleinigen Deckung des Bevölkerungswachstums gegenwärtig 11.000 Gebäude pro Tag errichtet. Bis zum Jahr 2050 soll dieser Wert auf knapp 15.000 Gebäude pro Tag steigen. [13]

Dem Leitindikator für inländischen Materialverbrauch DMC² zufolge, verzeichnet die Hauptgruppe der nicht-metallischen Mineralstoffe mit knapp zwei Drittel den größten Anteil, am österreichischen Ressourcenverbrauch. Mehr als 90 Prozent der nicht-metallischen Mineralstoffe sind Baurohstoffe, wie Sand und Kies. [14]

¹ ein Vorschlag von Forschern zur Benennung eines neuen Erdzeitalters, in welchem der Mensch als einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Entwicklungen auf der Erde gilt.

² DMC – Leitindikator Ressourcenverbrauch; errechnet sich aus der inländischen Entnahme von Rohstoffen zuzüglich der Importe und abzüglich der Exporte.

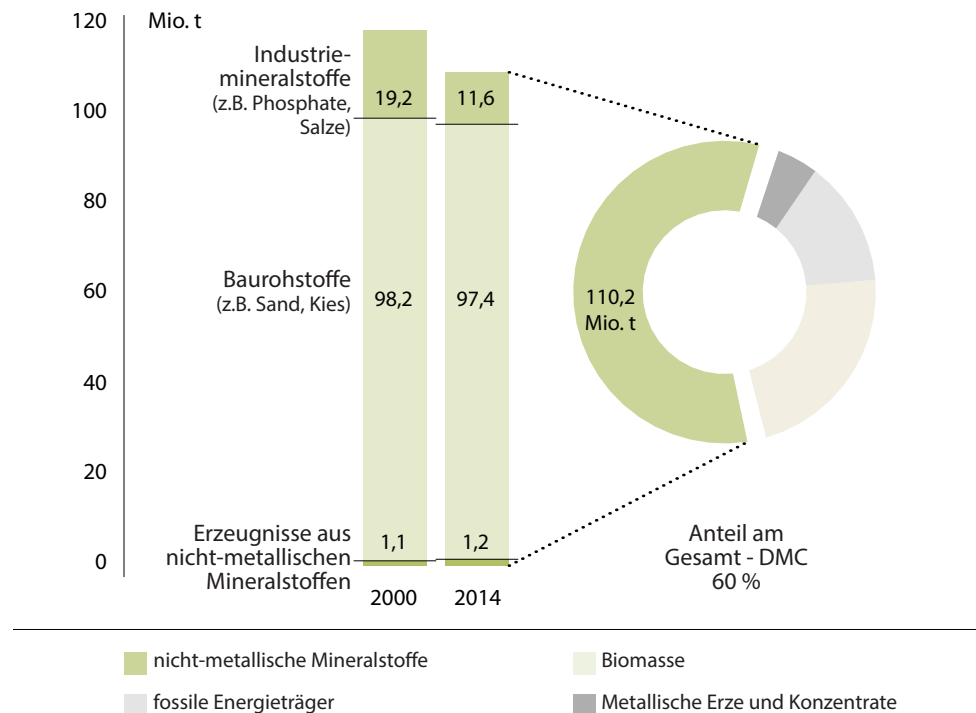


Abb.1: Anteil der nicht-metallischen Mineralstoffe am Gesamt DMC

In den vergangenen 20 Jahren hat sich der Bedarf an mineralischen Baustoffen weltweit verdreifacht.³ Um diesen Verbrauch decken zu können, werden schätzungsweise 40 Milliarden Tonnen⁴ Sand jährlich gefördert. Somit gilt die knapper werdende Ressource Sand als meistgeförderter Rohstoff der Welt. [15]

Die anthropogenen Aktivitäten des sogenannten *Sand-Minings* an Küsten und in Flussregionen haben signifikante Auswirkungen auf die Umwelt. Sie sind eine Bedrohung für zahlreiche Meereslebewesen und führen folglich zum Biodiversitätsverlust. Der Sandabbau an Küsten und in Flussbetten kann zu Erosion und Schädigung ganzer Flusslandschaften führen. In Ausnahmefällen, wie etwa in Indonesien, können durch den Raubbau sogar ganze Inseln verschwinden. [16] Negativ wirkt sich dieser Umstand auch auf die klimatischen Verhältnisse aus. Die sowohl beim Transport als auch im Zuge der Zementherstellung entstehenden CO₂-Emissionen tragen somit nicht nur direkt, sondern auch indirekt zum Klimawandel bei. [17] Sand-Mining wird hier nur stellvertretend als eines von vielen Beispielen für den linearwirtschaftlichen Umgang mit natürlichen Ressourcen genannt.

Rohstoffe sind endlich, deshalb ist es dringend notwendig sie in einen geschlossenen Kreislauf zu führen. Viele Rohstoffe sind nur noch beschränkt oder in ge-

³ Der Bedarf an mineralischen Baustoffen wird von der Umweltorganisation der Vereinten Nationen UNEP anhand der Daten für die Zementproduktion im Zeitraum von 1994 bis 2012 abgeleitet.

⁴ Der Umweltorganisation der Vereinten Nationen UNEP liegen nicht für alle Regionen der Erde verlässliche Daten zu den Fördermengen vor. Unter Berücksichtigung der Ungewissheiten schätzt die UNEP den Verbrauch auf 40 Mrd. Tonnen per anno.

ringen Mengen am Ort ihres natürlichen Vorkommens zu finden, können aber in Form von Sekundärrohstoffen aus anthropogenen Lagerstätten rückgewonnen werden. Ein Teil dieser Rohstoffe ist im weltweiten Gebäudebestand vorhanden. Im Allgemeinen betreiben wir aber immer noch eine Linearwirtschaft, die von stetigem Wachstum und kapitalistischen Grundprinzipien ausgeht. In den Bereichen Energiewirtschaft, Konsum, Chemie und auch im Bauwesen zeigen sich aber zunehmend Bewegungen und erfolgreiche Modelle zirkulären Wirtschaftens. [18]

Irrtümlicherweise wird in der Bauwirtschaft unter dem Begriff Kreislaufwirtschaft oft das Recycling mineralischer Baustoffe verstanden. Es erfordert eine genaue Definition der Begrifflichkeiten um eine neue Art des Bauens an die Allgemeinheit zu bringen.

Der Schlüssel liegt in einem grundlegenden Wertewandel: Die hochentwickelten Länder dürfen nicht länger als importabhängige Ballungsräume begriffen und dargestellt werden. Vor allem urbane Zentren verfügen – im Sinne einer Kreislaufwirtschaft – über sehr große Rohstoffressourcen, welche bisher kaum wahrgenommen und genutzt werden. Damit stellt dies einen wichtigen Ansatzpunkt für den oben beschriebenen Wandel dar.

1.1.3 Abfall

Neben den Klimawandelfolgen und dem Ressourcenverbrauch stellt die Zuspitzung des Abfallaufkommens ebenfalls ein globales wie schwerwiegendes Problem dar.

Die Ursprünge dieser Umstände liegen in der industriellen Revolution des späten 18. Jahrhunderts. Leichtfertiger Konsum und verbrauchendes Wachstum wurden im Zuge der Ausbreitung der industrialisierten Weltwirtschaft zu untrennbaren Spielgefährten. Bis ins 20. Jahrhundert herrschte das *Cradle-to-Grave-Prinzip* (= von der Wiege zur Bahre) vor. Dies bedeutet, dass sich das Know How der produktiven Industrie auf den linearwirtschaftlichen Weg beschränkt. Das Hauptaugenmerk liegt auf einem möglichst effizienten Weg von der Herstellung, der *Wiege* (Cradle), bis zum Verbrauch bzw. zur Entsorgung, der *Bahre* (Grave). Die ressourcenschonende Verwendung und Verwertung des Produktes, über die standardmäßige Nutzung hinaus, spielt dabei keine Rolle. Resultat dieser Produktionsweise ist, dass die Produkte nach ihrer Verwendung entsorgt und deren ursprüngliche Ressourcen vollständig vernichtet werden. [19] Dies kann als globaler Teufelskreis aus ansteigendem Ressourcenbedarf, immer höheren Treibhausgasemissionen und anwachsenden Müllbergen gesehen werden.

Nach wie vor lebt der Großteil unserer Gesellschaft nach den Prinzipien der sogenannten Wegwerfkultur. Der Müll sammelt sich auf Abfalldeponien und ver-

schmutzt zunehmend auch die Weltmeere. [20] Die thermische Abfallbehandlung auf den Deponien erzeugt CO₂ und toxische Substanzen, die die Luft und das Grundwasser verseuchen und unsere natürlichen Lebensräume bedrohen. [21]

Besonders der urbane Raum ist von diesem Problemdruck betroffen. Durch die immer geringeren Standzeiten von Neubauten und dem höher werdenden Sanierungsbedarf der Nachkriegsbauten, nimmt das Deponievolumen in den Städten zu. Mit knapp drei Viertel des österreichischen Gesamtabfallaufkommens stellen Baurestmassen (Aushubmaterialien und Abfälle aus Bau- und Abbruchtätigkeiten) eine wesentliche Abfallkategorie dar. Bau- und Abbruchabfälle entstehen zu 90 Prozent beim Abbruch, dem Umbau oder der Sanierung von Bauwerken. Auf die Neuerrichtung von Gebäuden sind lediglich 10 Prozent des Mülls zurück zu führen. [22]

An oberster Stelle der fünfstufigen Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie steht die Abfallvermeidung, gefolgt von Wieder- bzw. Weiterverwendung. [23] Bei der Umsetzung stoßen Wiederverwendungskonzepte des Bauwesens bislang auf zahlreiche Schwierigkeiten. Bei konventionellen Abbruchtechniken kommt es zwangsläufig zur Vermischung der Abbruchmaterialien. Die so erzeugten Abbruchmassen werden teilweise vollständig als Baumischabfall entsorgt. [24] Weiters führen Nicht-trennbare Konstruktionen dazu, dass Bauteile im Ganzen, und damit ohne Chance auf Trennung und Verwertung, entsorgt werden müssen. Auch die chemische Zusammensetzung vieler Baustoffe kann die Wiederverwendung maßgeblich behindern (z.B. Flammschutzmittel in EPS-Dämmplatten). [25]

Die gegenwärtige Müllproblematik lässt sich nur bekämpfen, wenn es gelingt Stoffkreisläufe tatsächlich zu schließen. Es reicht nicht mehr aus, die Produkte einem Downcycling⁵ zuzuführen, wie es bislang praktiziert wurde. Die vollständige Zerstörung von Abfall bedeutet gleichzeitig die vollständige Vernichtung von potentiellen Sekundärrohstoffen. Deswegen ist ein Umdenken dringend notwendig. In diesem Zusammenhang ist auch eine Neuinterpretation des Abfallbegriffs hilfreich. Der deutsche Chemiker und Verfahrenstechniker Braungart bringt dies mit „Abfall ist Nahrung“ zum Ausdruck.

⁵ Verwertungsprozess bei dem das recycelte Material von geringerer Qualität und Funktionalität ist als das Originalmaterial.

1.2 Forschungsfrage

Aus den oben angeführten Daten und Fakten wird die Relevanz dieser Arbeit erkenntlich. Die linearwirtschaftliche Ausrichtung der gegenwärtigen Gesellschaft wirkt sich zweifelsfrei negativ auf den Planeten und die Menschheit aus und kennzeichnet eine neue geochronologische Epoche, in der der Mensch und seine Tätigkeiten zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse der Erde geworden sind. Die weltweite Bautätigkeit trägt in besonders großem Ausmaß zu dieser Entwicklung bei. Daraus leitet sich folgende forschungsleitende Frage für die vorliegende Arbeit ab:

Wie können wir im Anthropozän – dem Zeitalter des Menschen - künftig bauen und die negativen Externalitäten möglichst gering halten?

Eine kreislaufwirtschaftliche Haltung kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten und wird daher im Zuge dieser Arbeit als zentraler Lösungsansatz für eine klima- und ressourcenschonende Architektur erläutert. Demnach wird hier mit zahlreichen Beispielen veranschaulicht, wie Architektur und Bauwesen in geschlossenen Kreisläufen geplant und gebaut werden können.

1.3 Methodik

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurde ein Methoden-Mix aus Literaturarbeit und empirischen Beobachtungen gewählt. Im Zuge von Projektarbeiten konnten realitätsbezogene Daten zu diesem Themengebiet erhoben werden und in die Arbeit einfließen.

Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Zunächst wurde anhand der gegenwärtigen Architektur- und Baupraxis untersucht, welche Praktiken aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht zu überdenken sind und im Sinne der Nachhaltigkeit nicht weiter fortgeführt werden sollten. Die Beleuchtung dieser Praktiken erfolgt in den Kategorien: Planung, Bauabwicklung, Rückbau und Bewertungssysteme. Besonders ausführlich wurden die Unterkategorien Nutzungsplanung, Konstruktion und Material behandelt, da sie ausschlaggebend für den architektonischen Entwurf sind. Aufbauend auf den Unterkategorien wurden anschließend alternative und zukunftsweisende Lösungsansätze für eine kreislauffähige Architektur ausgearbeitet. Eine Gute-Praxis-Sammlung von Beispielen zeigt die Umsetzung dieser Lösungsvorschläge. Abschließend wurden recyclingfähige Konstruktionen gegenüber konventionellen Bauweisen mithilfe eines Kostenvergleichs auf ökonomische Verhältnisse geprüft.



2.

Architektur- und Baupraxis heute

2.1 Planung

2.1.1 Nutzungsplanung

2.1.2 Konstruktion

2.1.3 Material

2.2 Bauabwicklung

2.2.1 Rechtliche Hintergründe

2.2.2 Angewandte Rückbau- und
Abbruchverfahren

2.3 Bewertungssysteme

2.3.1 Gebäudezertifizierung

2.3.2 Produktzertifizierung

2.4 Schlussfolgerung

2. Architektur- und Baupraxis heute

In Laufe der Architekturgeschichte haben sich Prinzipien und Vorstellungen der Baukunst stark weiterentwickelt. Vitruvs antike Wertvorstellung der Firmitas, Utilitas und Venustas sind lange nicht mehr die einzigen Grundsätze architektonischen Schaffens. Heute wissen wir, dass die Architektur eine breit gefächerte Disziplin ist, in der es bautechnische, bauphysikalische, ökologische sowie wirtschaftliche Kriterien zu erfüllen gilt.

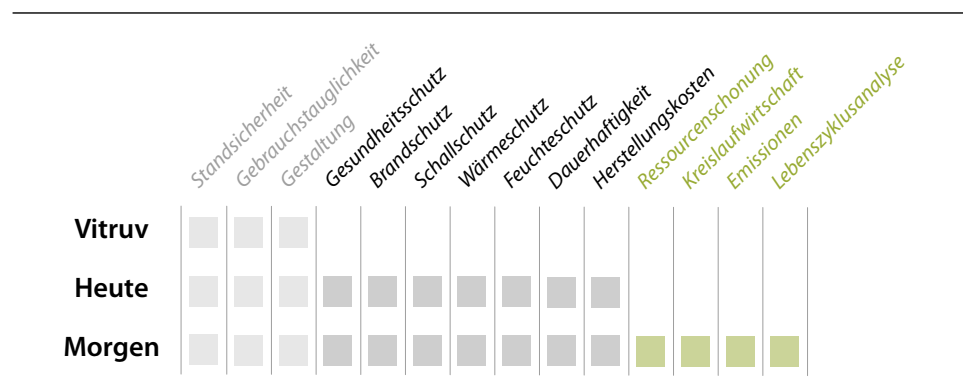


Abb.2: Wertewandel in der Architektur

Unter Betrachtung der lokalen Bausubstanz, sind die Schritte dieser Weiterentwicklung in der Funktion, Konstruktion und Materialität der Gebäude gut ablesbar. Jedes dritte Gebäude in Wien wurde vor 1945 errichtet. [26] Diese Bauwerke erfüllen die heutigen Standards, hinsichtlich Nutzungsflexibilität und Bauphysik, kaum und müssen daher aufwendig saniert oder abgebrochen werden. Auch die Nachkriegsbauten weisen ähnlich gravierende Mängel auf. Als besonders problematisch erweisen sich die Verbundbauweise und die Durchmischung schwer trennbarer Baustoffe. [27] In den Nachkriegsjahren galt das Hauptaugenmerk der effizienten, quantitativen Schaffung von Wohnsubstanz, Nachhaltigkeitsaspekte wurden in der Regel nicht berücksichtigt. Von den 1960ern bis in die 1980er Jahre wurden zahlreiche, industrialisierte Plattenbausiedlungen in Wien errichtet. [28] Die Optimierung der Produktivität sowie die Senkung der Herstellungskosten gelten damals als zentrale Kriterien des Architekturschaffens. Zugleich kommt es zu einem vermehrten Einsatz von asbesthaltigen Baumaterialien wie Eternitplatten oder Dämmstoffen. [29] Der zu dieser Zeit übliche Einsatz von schadstoffemittierenden Materialien gilt aus heutiger Sicht als undenkbar.

Ein Fünftel der Wiener Bausubstanz wurde um die Jahrtausendwende bzw. danach errichtet. [30] Großteils erfüllen diese Bauwerke zwar die Anforderungen

an die Architektur der Gegenwart. Wenn es jedoch um Fragen der Ressourcenschonung, Kreislaufwirtschaft oder Emissionen geht, werden nur wenige einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Architektur gerecht. Dennoch gibt es einige vorbildliche Beispiele, die im Zuge dieser Arbeit genannt werden. (s. Kapitel Gebaute Beispiele)

Im Folgenden wird die bislang dominante Vorgehensweise in der Bauwirtschaft hinsichtlich kreislaufwirtschaftlicher Aspekte untersucht. Dabei werden folgende Bereiche genauer analysiert und die fest verankerten, linearwirtschaftlichen Denkmuster hervorgehoben und hinterfragt:

- Planung:
 - › Nutzungsplanung
 - › Konstruktion
 - › Material
- Bauabwicklung
 - › Rechtliche Hintergründe
 - › Angewandte Rückbau- und Abbruchverfahren
- Bewertungssysteme

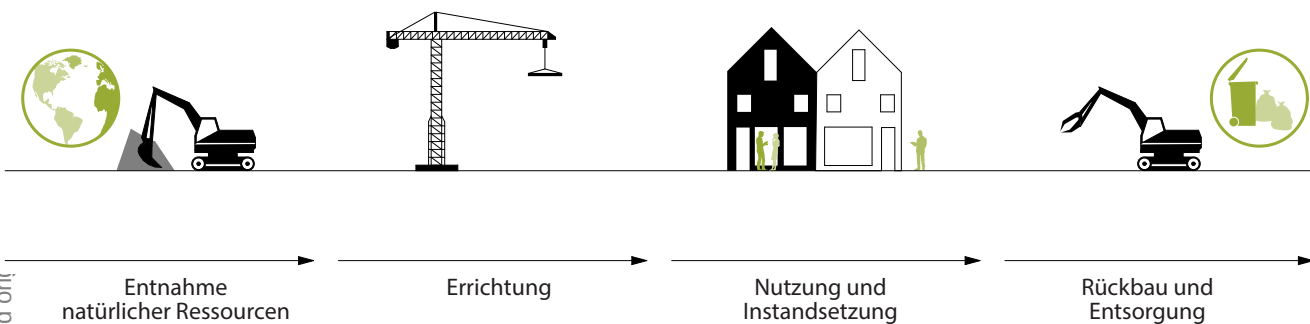


Abb.3: Prinzip einer Linearwirtschaft

2.1 Planung

Die Planung von Architektur reicht vom großen städtebaulichen Maßstab bis hin zur kleinmaßstäblichen Gebäudeplanung. In der Planungsphase werden alle maßgeblichen Entscheidungen getroffen, die die Eigenschaften der gebauten Umwelt oder eines Bauwerks, über den gesamten Lebenszyklus hinweg, bestimmen. Gegenstand architektonischer Überlegungen bei der Gebäudeplanung sind vor allem die Nutzung, Konstruktion und Materialität.

2.1.1 Nutzungsplanung

Nutzungsflexibilität ist die Grundvoraussetzung für die Langlebigkeit eines Gebäudes. Multifunktionale, langfristig nutzbare Gebäude sind derzeit noch wenig verbreitet. Viel zu oft ist die Planung auf Konzepte ausgerichtet, bei denen nach kurzfristiger Nutzungsdauer ein unökonomischer und unökologischer Rückbau unumgänglich ist. Diese Tatsache ist zumeist auf das misslungene Nutzungs-Planungs-Verhältnis eines Gebäudes zurück zu führen. Nutzungsplanung und Nutzungsverhalten lassen sich in diesem Falle nicht kongruent abbilden. Besonders stark ist dieses Phänomen im Wohnbau ausgeprägt. Die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Wohngebäudes liegt zwischen 60 und 100 Jahren. [31] Aber gerade im Wohnbau kann sich die Nutzungsdauer aufgrund von Mietrechtsverhältnissen oder historischen Werten verlängern. Daher sind Wohnbauten grundsätzlich viel seltener vom Rückbau betroffen, als Büro-, Verwaltungs- oder Industriebauten.

Die Erkenntnis über den Nutzungs-Planungs-Konflikt gab es bereits Anfang der 1960er Jahre, in Bereichen der Soziologie und Bauforschung. So hat etwa der Architekturtheoretiker Christopher Alexander von *menschlichen Verhaltensmustern eine planungsrelevante Mustersprache*¹ abgeleitet.

„Die Leute ziehen oft um, und die Häuser werden immer mehr aus fabriksmäßig hergestellten Bestandteilen gebaut, wie etwa 1,2 m x 2,4 m großen Gipskartonplatten mit fertiger Oberfläche, ... – diese Materialien eignen sich überhaupt nicht zur schrittweisen Veränderung, wie sie für eine individuelle Anpassung erforderlich ist. Tatsächlich sind die Methoden der Massenproduktion praktisch unvereinbar mit den Möglichkeiten individueller Anpassung.“ [32]

In diesem Zusammenhang sind vor allem die Massenwohnbauten der 60er und 70er Jahre zu kritisieren. Die Adaptivität des Habitats steht hierbei in direktem Konflikt mit der vereinheitlichten und ökonomisierten Abfolge technischer Maßnahmen. Nutzungsverhalten und individuelle Interessen treten in den Hintergrund.

¹ „A pattern language“ (engl. Originaltitel aus dem Jahr 1977): Sammlung von planungsrelevanten Mustern mit dem Ziel der Schaffung einer menschengerechten und lebensfördernden Architektur.

„Durch eine weitgehende Verselbständigung des technisch-ökonomischen Entwicklungsprozesses dieser Umwelt und parallele Ausblendung der politisch sozialen Komponenten entsteht die Gefahr der Präformierung und damit auch der Einschränkung von ganz bestimmten Handlungsweisen ..., so dass die technischen Aggregate, besonders in diesen Dimensionen, totalitäre Züge annehmen.“ [33]

Christopher Alexanders Ansätze erfuhren zwar, besonders in den 1980er Jahren, viel positive Resonanz innerhalb der Architekturwelt, konnten sich jedoch kaum in der Planungs- und Baupraxis manifestieren. Auch gegenwärtig, mehr als 40 Jahre nach Alexanders Arbeiten, dominiert eine nach kurzfristigen ökonomischen Maßstäben orientierte Bauweise: Mit Formen und Materialien die Flexibilität und individuelle Interpretierbarkeit des Grundrisses tendenziell erschweren und damit einer langfristigen Nutzung entgegenstehen.

Einen der Tiefpunkte städtebaulicher sowie architektonischer Fehlplanung stellt das gescheiterte Wohnbauprojekt Pruitt-Igoe in St. Louis dar. 1972, nur wenige Jahre nach der Errichtung, musste die Großwohnsiedlung schließlich abgerissen werden. Grund dafür war die rasante Ghettoisierung, die durch die hohe Bewohnerdichte, eine unzugängliche Architektur und die schlechte Verwaltung verursacht wurde. Das ehrgeizige Architekturkonzept der 33 identischen Wohnscheiben stellte sich für die Nutzer als vollkommen verfehlt heraus. Kritik an der Nutzungsplanung gab es beispielsweise in Bezug auf die Erschließung der Gebäude. Die Fahrstühle hielten nur in jedem dritten Stockwerk, um Begegnungen und nachbarschaftliche Beziehung zu erzwingen. Diese Idee entsprach allerdings nicht den Bedürfnissen der Bewohner und führte schnell zu dunklen und vom Vandalismus bedrohten Gängen, in denen sich niemand gerne aufhielt. Jegliche Verbesserungsversuche durch die Stadt blieben erfolglos. [34]

Ein ähnliches Paradebeispiel für ein misslungenes Nutzungs-Planungs-Verhältnis spielte sich hierzulande vor den Toren der oberösterreichischen Hauptstadt Linz ab. Die zwei Hochhäuser des Harter-Plateaus wurden in den 1970er Jahren als Wohnprojekt für VOEST-Alpine Mitarbeiter errichtet. Als sich mit der Zeit auch Mieter aus anderen Bevölkerungsschichten ansiedelten, kam es vermehrt zu sozialen Spannungen. Unter anderem führten fehlende Grünflächen und die problematische Architektur zur Sprengung der beiden Hochhäuser im April 2013. [35]

Kurzlebigkeit ist aber nicht nur ein Problem des Wohnbaus, sondern findet sich in fast allen baulichen Strukturen wieder. Die meisten Gebäude werden zwar so gebaut, dass sie dem intendierten Zweck möglichst lange dienen, tatsächlich anpassungsfähig an veränderte Nutzungsumstände sind jedoch wenige davon.

„Wir sprechen von Flexibilität und Multifunktionalität, doch im Grunde schauen die Projekte heute nicht anders aus als vor 80 Jahren.“

Harry Glück, Architekt

Diese Aussage des Architekten Harry Glück bei einem Interview im Jahr 2017, als er zum Rückbauvorhaben zu einem seiner Werke befragt wurde, kann stellvertretend für die Weitläufigkeit des Nutzungs-Planungs-Konfliktes gesehen werden. Das ehemalige Rechenzentrum der Stadt Wien – aufgrund seiner ästhetischen Erscheinung auch besser bekannt als *Glaspalast* – wurde 1980 unter der Planung des renommierten Wiener Architekten errichtet. 35 Jahre später ist das Bauwerk nicht mehr in der Lage die Kriterien zeitgemäßer Büronutzung zu erfüllen. [36] Harry Glück selbst erklärt, dass es für ein Bauwerk dieser Art keine adäquate Nachnutzung gebe, weil es nach präzisen Kriterien geplant wurde und technische Vorgaben zu erfüllen hatte. [37]

2.OG

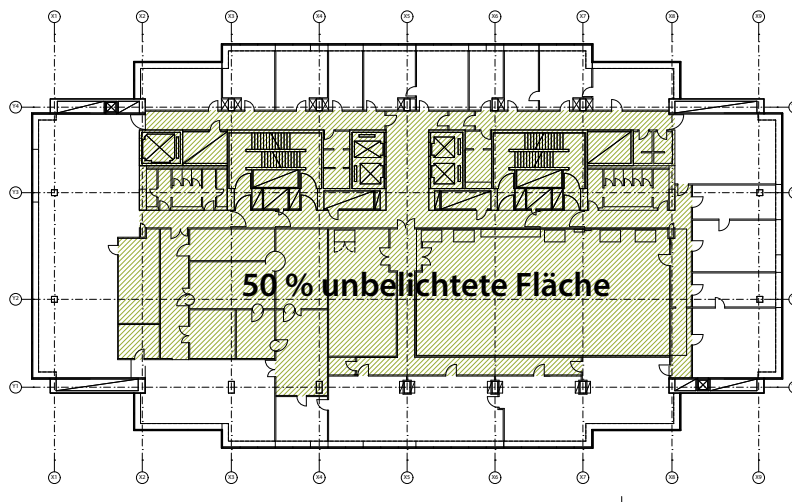


Abb.4: Grundriss 2. Obergeschoss, Rathausstraße 1 / Glaspalast

Eine besonders kurze Lebensdauer weist der Europapavillon des Sophienspitals am Wiener Neubaugürtel auf. Das erst 1999 von Architekt Martin Kohlbauer errichtete Gebäude soll nun, nur 20 Jahre später, abgerissen werden. Zweifelsfrei neigt sich die Nutzungsdauer des Baukörpers lange nicht dem Ende zu, dennoch muss der vollkommen intakte Spitalstrakt für den Neubau von Wohnungen weichen. Eine Adaptierung ist aufgrund der spezifischen Struktur und der völlig anderen Nutzungsabsicht kaum umzusetzen.

Bei Betrachtung des gegenwärtigen Gebäudebestandes und der großteils angewandten Planungsprinzipien, zeigt sich, dass die Themen der Kreislaufwirtschaft (z.B. Nutzungsrecycling) bislang kaum Einzug in die Baupraxis erhalten haben.

Sowohl im Wohnbau als auch im Bereich der Büro- und Verwaltungsbauten werden die Potenziale der Nutzungsflexibilität nur wenig ausgeschöpft. Standardisierte Grundrissmuster und starre Nutzungsbestimmungen werden den Anforderungen des gesellschaftlichen Wandels selten gerecht, daher kommt es oftmals zum vorzeitigen Abbruch von Gebäuden. Nutzungsrecycling ist die erste Stufe der Wiederverwendung und somit das einzige Szenario das vollständig auf Abbruch verzichtet, Abfall vermeidet und Ressourcen schont. Eine verstärkte Berücksichtigung derartiger Aspekte bereits bei der Planung gegenwärtiger Projekte kann als Hebel für zukünftiges Nutzungsrecycling dienen.

Pruitt Igoe

Standzeit

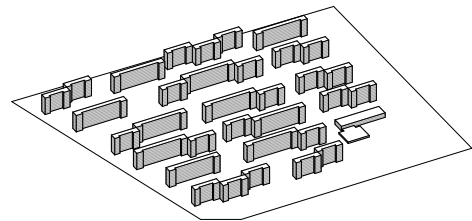
St. Louis, USA

1955 Errichtung

17

1972 Abbruch

Jahre



Harter Plateau

Standzeit

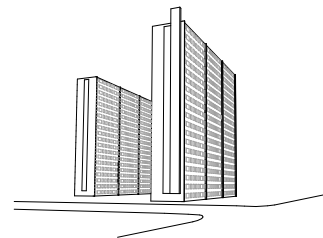
Leonding, AT

1970 Errichtung

33

2003 Abbruch

Jahre



Glaspalast

Standzeit

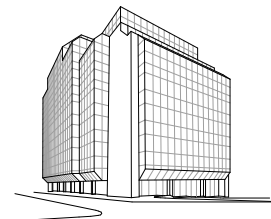
Wien, AT

1980 Errichtung

37

2017 Abbruch

Jahre



Europapavillon

Standzeit

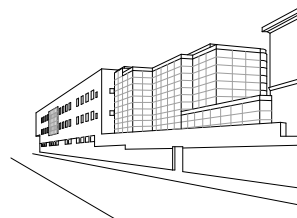
Wien, AT

1999 Errichtung

20

2019 Abbruch*

Jahre



*Bekanntgabe des Abbruchvorhabens

Abb.5: Standzeiten ausgewählter Projekte

2.1.2 Konstruktion

Die Kreislaufpotenziale und die Nutzungsflexibilität eines Bauwerks sind stark abhängig von der Konstruktion und Gebäudestruktur. Der vorzeitige Abbruch eines Gebäudes kann, durch eine Entkernung und anschließende Bestandsertüchtigung oder -erweiterung, verhindert werden. Der Umbau ist jedoch nur dann möglich, wenn die Tragstruktur erhalten werden kann und ein gewisses Maß an Flexibilität aufweist.

Das Terrassenhaus von Harry Glück in der Inzersdorferstraße ist nur eines von vielen Beispielen einer unflexiblen Gebäudestruktur. Die in den 1970er Jahren errichtete Wohnanlage gilt als Prototyp des „Wiener Terrassenhauses“ und ist gekennzeichnet vom pragmatischen Funktionalismus. Der Schnitt des Gebäudes zeigt eindeutig, dass eine Anpassung der Struktur weder in horizontaler, noch vertikaler Richtung möglich ist. Durch die Verlagerung der Erschließungsflächen in jedes zweite Geschoss und die halbgeschossigen Maisonetten ist eine Aufteilung der Wohneinheiten unmöglich. Eine Erweiterung nach außen ist durch die Terrassierung der Wohnanlage ebenso ausgeschlossen.

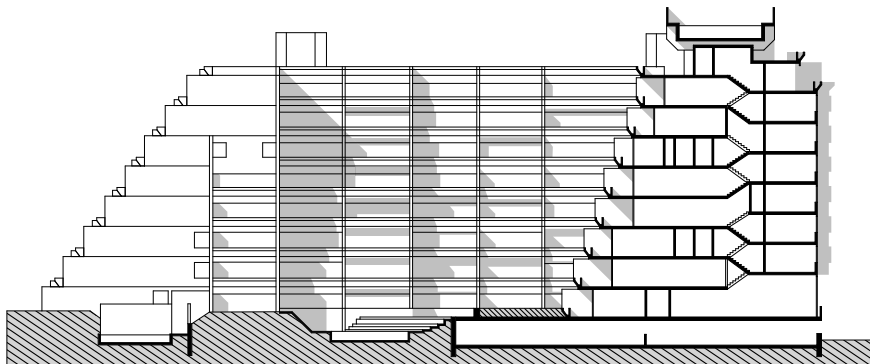


Abb.6: Schnitt Terrassenhaus Inzersdorferstraße (Harry Glück 1971)

Kommt es schließlich zum Abbruch, ist im Grunde jedes Gebäude mithilfe von Schneide- und Trenntechnologien recyclingfähig. Entscheidend ist allerdings der Aufwand im selektiven Rückbau.² In dieser Hinsicht sind die meisten Bestandsobjekte mit aufwändigen Rückbauarbeiten und hohen Instandhaltungskosten verbunden. (s. Kostenvergleich, S. 54)

Aus dem inländischen Materialverbrauchindex geht hervor, dass ein Großteil der Baurohstoffe mineralischer Natur ist. Also ist davon auszugehen, dass die

² Wird auch kontrollierter Rückbau genannt. Im Vordergrund steht die Erfassung und sortenreine Trennung bzw. Entsorgung unterschiedlicher Materialien, sowie die Separierung und der getrennte Rückbau von Bereichen, die Schad- oder Störstoffe enthalten.

meisten der Gebäude in Stahlbeton- oder Ziegelbauweise errichtet werden. [38] Beton ist im Rückbau aber um ein Vielfaches energieaufwendiger als Stahl- oder Holzkonstruktionen. Schwere Massivbauten erfordern, im Gegensatz zum Skelettbau, einen höheren Materialeinsatz und gelten somit nicht unbedingt als ressourcenschonende Bauweise. Zumal mineralische Baustoffe im Massivbau zum Einsatz kommen, deren Recyclingpotenziale eingeschränkt sind. Stahlskelettbauweisen erweisen sich nicht nur in der Nutzungsflexibilität als äußerst vorteilhaft, sondern gelten nebenbei als wahre urbane Minen. Bislang ist die Stahlskelettbauweise jedoch dem Hallen-, Büro- und Gewerbebau vorbehalten.

Die stetig steigenden Ansprüche an die Leistungsfähigkeit von Hüll- und Trennteilen in Gebäuden, haben die Recyclingfähigkeit von Konstruktionen massiv erschwert. Damit ein Bauteil die zu leistenden Funktionen erfüllen kann, besteht es mittlerweile aus einer Vielzahl aufeinanderfolgender, hoch spezialisierter Schalen und Schichten. [39]

Die gegensätzliche Variante zur konventionellen Schichtenkonstruktion ist das Monomaterialsystem. Die Komponenten eines solchen Systems bestehen aus einem einzigen Material und durchlaufen denselben Verwertungsprozess. Einstoffliches Bauen zählt allerdings nicht zu den häufigsten Konstruktionsmethoden und erfordert gezielte Verbesserungen in bautechnischer und bauphysikalischer Hinsicht, um flächendeckend eingesetzt werden zu können. [40] Auf die Potentiale und Schwierigkeiten wird im Kapitel Einstoffliche Bauweisen, S. 106 näher eingegangen.

Die heute üblichen Verbundkonstruktionen und die weitverbreiteten geklebten Verbindungen mögen vielleicht bauphysikalisch wichtig und wirtschaftlich erscheinen, erweisen sich aber im End-of-Life-Szenario als Hindernis. Auch die sortenreine Trennung der verwendeten Baustoffe ist, wenn überhaupt, nur mit einem hohen, unwirtschaftlichen Aufwand möglich. Alternative Konstruktionen mit lösbaren Verbindungen werden im Zuge dieser Arbeit vorgestellt.

2.1.3 Material

Analog zu der Wegwerfkultur der Massenkonsumentengesellschaft kommen die allermeisten bauwirtschaftlichen Materialien nur ein einziges Mal zum Einsatz. Man kann davon ausgehen, dass 90 Prozent aller Baustoffe, nach einmaligem Gebrauch, einem Downcycling zugeführt oder deponiert werden.³ Vor allem bei mineralischen Baustoffen und erdölbasierten Materialien ist es unmöglich, ein gleichwertiges Produkt wieder zu gewinnen. Nur bei Metall ist die Wertdichte ausreichend hoch um erneut einen Rohstoff daraus zu generieren. In den Ge-

³ Abgeleitet von den Abbruchmassen des Glaspalastes, Harry Glück: 30.000 t Betonabbruch, davon 1500 t Stahl aus Bewehrung. Fünf bis maximal zehn Prozent der Abbruchmasse (überwiegend Stahl und Metalle) können in einen geschlossenen Kreislauf rückgeführt werden.

bäuden werden häufig Stoffe verbaut, die aufgrund ihrer Eigenschaften der Ausschöpfung kreislaufwirtschaftlicher Potenziale entgegenstehen. Das sind insbesondere gesundheitsschädliche Materialien (z.B. Schadstoffe wie Asbest oder künstliche Mineralfasern), das Recycling beeinträchtigende Zusätze in Baustoffe (z.B. Flammschutzmittel in Dämmstoffen), aber auch Bekleidungen und Oberflächenüberzüge (z.B. WDVS, Brandschutzbeschichtungen oder chemische Holzschutzmittel), die eine sortenreine Trennung erschweren.

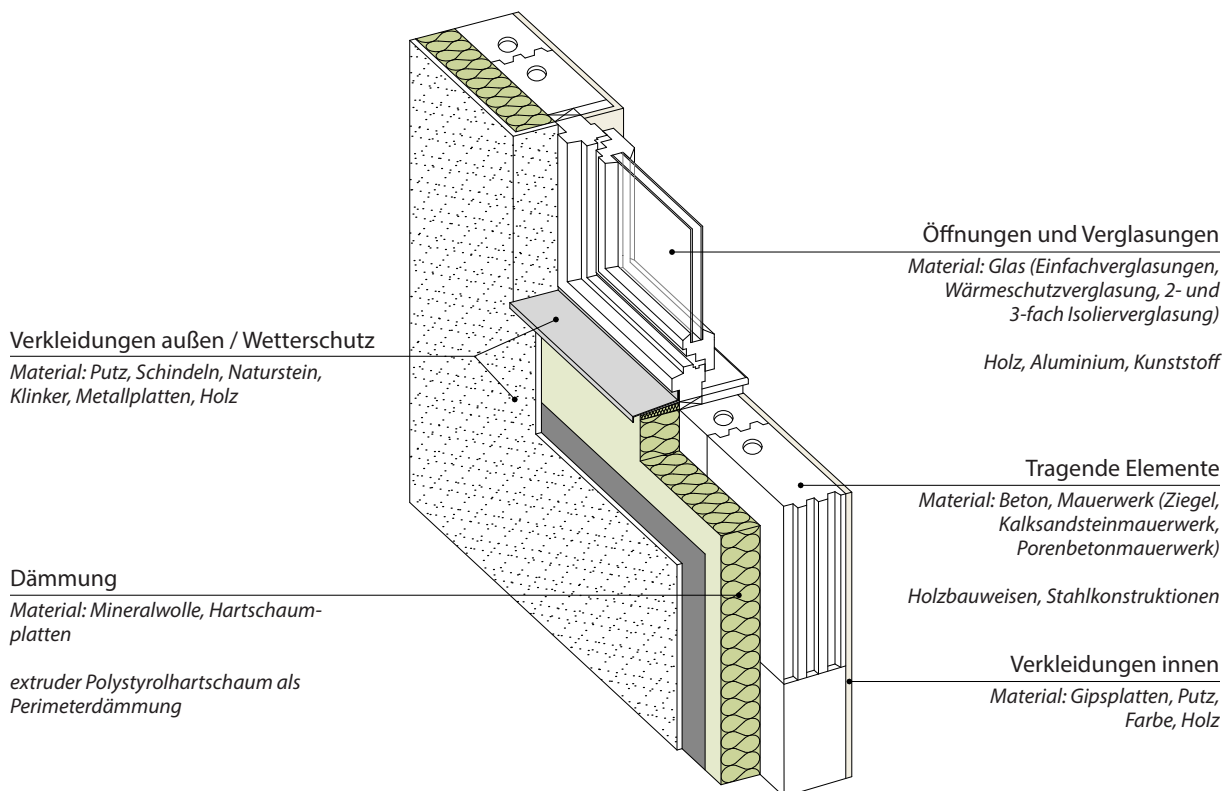


Abb.7: Materialien eines konventionellen Wandaufbaus

Die Hauptbestandteile eines Gebäudes weisen ganz unterschiedliche Eigenschaften auf, die entweder vor- oder nachteilig für kreislaufwirtschaftliche Interessen sein können. Anhand eines konventionellen Wandaufbaus werden ausgewählte Materialien in Folge auf ihre kreislaufwirtschaftlichen Potenziale und den Umgang mit ihnen in der Baupraxis untersucht. Die nachstehende Erläuterung soll einen Überblick über die jeweilige Materialgruppe geben. Auf die unterschiedlichen Materialuntergruppen wird nicht im Speziellen eingegangen.

Mineralische Baustoffe

Beton

Beton ist der beliebteste und meist verwendete Baustoff der Welt. Aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften gilt er als Hochleistungsbaustoff und weist zudem ein ausgesprochen hohes Recyclingpotenzial auf. Dieses Potenzial nimmt vor allem in Anbetracht der wachsenden Rohstoffknappheit von Kies und Sand an Bedeutung zu.

Die von der Europäischen Union festgelegte Recyclingquote von 70 Prozent bei Bau- und Abbruchabfällen wird hierzulande jedenfalls formell erreicht. Das Nachbarland Deutschland gilt allgemein sogar als Recycling-Weltmeister. [41] Geschlossene Kreisläufe werden in der Regel jedoch nicht erzielt, denn meistens handelt es sich bei den angeführten Recyclingprozessen um sogenanntes *Downcycling*. Der mineralische Abbruch wird gebrochen, stofflich aufbereitet und anschließend überwiegend im Straßenunterbau eingesetzt. Bedingt durch die in der Praxis eingesetzten Recyclinganlagen eignet sich das gebrochene Kantkorn nur in wenigen Fällen zur Wiederverwendung als Recycling-Gesteinskörnung. Doch selbst bei Rezyklaten, die in der Betonherstellung Anwendung finden, werden keine *closed loops*⁴ erzielt. Der höhere Hohlraumgehalt, bedingt durch die Verwendung von gebrochenem Korn, erfordert in der Produktion einen höheren Zusatz von Zement. [42] Aus ökologischer Perspektive liegt hierbei das wesentliche Problem in der energieaufwendigen Zementherstellung, welche maßgebliche Umweltbelastungen verursacht. Die weltweite Zementproduktion gilt mittlerweile als drittgrößte Quelle für durch Menschen verursachte CO₂-Emissionen. [43] Neue Technologien im Bereich der Zementherstellung zielen auf eine radikale Verringerung dieser Emissionen ab. (s. Zementherstellung, S. 138)

Europaweit werden nur sechs Prozent des Betonbruchs zum Sekundärrohstoff verarbeitet und in neuen Betonbauteilen eingesetzt. In Deutschland und der Schweiz findet Recycling-Gesteinskörnung bislang nur bei Betonen bis Festigkeitsklasse C30/37 Anwendung. [44] Der österreichischen Bauwirtschaft fehlt es noch an Bereitschaft Recyclingbeton aus mineralischen Baurestmassen zu forcieren. Die Gründe dafür sind vielseitig. Einerseits erfährt man aufgrund der vorhandenen Rohstoffvorkommen noch keine Dringlichkeit, andererseits sind die Standards der Aufbereitung noch nicht ausgereift und führen zu aufwendigen und kostenintensiven Prozessen. [45] Für die Wirtschaftlichkeit von Recyclingbeton sind hauptsächlich die Transportkosten schlagend. Die Aufbereitung ist also nur dann sinnvoll, wenn die Sekundärrohstoffquelle in unmittelbarer Nähe der Neubaugstelle liegt. Bestenfalls handelt es sich um eine On-Site-Aufbereitung. [46]

4 Anm.: Geschlossene Kreisläufe.

Mauerwerk

Ziegelmauerwerk

Als Baustoff des letzten Jahrhunderts, hat sich der Ziegel vor allem in den Gründerzeithäusern (vor 1945 gebaut) bewährt – und diese machen immerhin die Hälfte der derzeitigen Abbruchobjekte in Wien aus. [47] Aus ökologischer Sicht, ist das „rote Material“ unbedenklich und lässt sich im Vergleich zu anderen Baustoffen gut wieder- oder weiterverwenden. Ziegelsteine die in Tragwerken zum Einsatz kommen sind sehr weich und durch den Lochanteil besonders zerbrechlich. Durch den hohen Zerstörungsgrad beim Abbruch ist eine Wiederverwendung als Mauerstein keine Option.

Vielmehr lässt sich hier Ziegelrezyklat zur Beimengung in anderen Produkten gewinnen. Um sortenreinen Ziegelsplitt zu erhalten, ist ein aufwendiger Aufbereitungsprozess notwendig. Als besonders schwierig im Trennprozess gestalten sich Materialverbünde, zum Beispiel mit Kunststoffdämmung gefüllte Mauerwerksteine. In der Regel ist hier von einer Deponierung auszugehen, weil der Aufwand wirtschaftlich nicht rentabel ist. Die Sprödigkeit des Materials führt außerdem zu massiven Materialverlusten während der Aufbereitung.

Im Sinne des klassischen *Downcyclings* findet Ziegelsplitt vorwiegend in Pflanzsubstraten, in Dachbegrünungssystemen, in Außenanlagen oder als Bodenaustauschmaterial in Trag- oder Dränschichten Anwendung. [48] Experten sprechen aber von einem Überschuss des Materials. Mittlerweile fällt doppelt so viel an Hochbaurestmasse an als vor zehn Jahren. [49] Anders als beim Beton, gibt es kaum Anreize für einen funktionierenden Absatzmarkt. Wenig homogenes Material hat keine hochwertige Verwendungsmöglichkeit. Die niedrigwertigen Optionen wie Baumsubstrat, Dachbegrünungen und Tennisplätze reichen nicht aus, um die anfallenden Mengen in den Kreislauf zurückzuführen.

Die Wiederverwertungspotenziale des Ziegels werden bei weitem nicht ausgeschöpft. In Österreich gibt es bereits einen Testmauerstein, der aus 70 Prozent recyceltem Ziegelsplitt besteht und hinsichtlich Tragfähigkeit, Wärme- und Schallschutz ähnlich gute Werte wie herkömmlicher Mauerstein aufweist. [50] Die österreichische Baustoffindustrie verwertet Ziegel in Form von Splitt als „Klinker-Ersatz“ in der Zementherstellung weiter. Allerdings noch nicht im großen Maßstab, denn angesichts zum Teil großer Transportdistanzen stehen hier vor allem ökonomische und ökologische Bedenken einer umfassenderen Nutzung entgegen. [51]

Kalksandsteinmauerwerk

Wie beim Ziegel, ist die Wiederverwendung von Kalksandsteinmauerwerk eher ausgeschlossen. Eine stoffliche Verwertung im Sinne der Herstellung neuer Kalksandsteine findet im industriellen Maßstab nicht statt. Das grundlegende Problem liegt in der mangelhaften Reinheit des Kalksandsteinbruchs: Durch die Verarbeitung in Mauerverbünden kommt es zu Anhaftungen und Vermischungen mit Fremdmaterialien, wie Gipsresten, Kleber oder Holz. [52] Die Trennung der Verbünde mit gängigen Aufbereitungsmethoden führt zu unwirtschaftlichen Ergebnissen und hohen Materialverlusten. In der Weiterverwendung als Vegetationssubstrat hat sich der Kalksandstein, im Gegensatz zum Ziegel, nicht bewährt. [53] Als Zuschlag für die Herstellung von Beton ist er zwar zulässig, allerdings nur im Ausmaß von zehn Volumenprozent, da ansonsten die Festigkeit des Betons gefährdet wäre. [54]

Porenbetonmauerwerk

Porenbeton besteht aus Quarzsand, Kalk, Zement sowie Aluminiumpulver (als Porenbildner). Aufgrund des hohen Porenanteils (90 Prozent) handelt es sich um sehr leichte, aber hochwärmedämmende Mauerwerksteine. Die geringe Rohdichte erlaubt keine Weiterverwendung als Gesteinsrezyklat für tragende Betonbauteile oder als Schüttgut für Tragschichten. Porenbeton eignet sich, wegen seiner chemischen Zusammensetzung, nur für eine geringe Anzahl von Pflanzenarten als Substratzuschlagstoff. Neue Mauersteine mit hohem Anteil aus Porenbetonrezyklat werden derzeit großtechnisch nicht hergestellt. [55] Diese Art der Weiterverwertung wäre allerdings naheliegend, da Altporenbeton mit einer 100%igen Sortenreinheit die üblichen Zuschläge wie Sand, Brandkalk, Portlandzement und Gips teilweise substituieren könnte. [56]

Verwertung von Baurestmassen

Die nachstehende Auflistung gibt einen Überblick über die Qualitätsbaustoffe gemäß Recycling-Baustoffverordnung und ihre typischen Anwendungsmöglichkeiten:

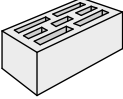
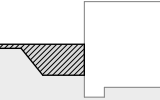
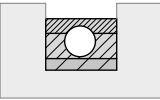
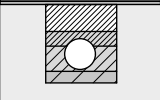
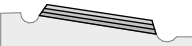
Ziegelbruch Herkunft: Ziegelproduktion, Abbruch	RZ Recycelter Ziegelsand Rezyklierter Ziegelsplitt (vorwiegend Ziegel)	Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton, Drainageschichten, Schüttungen, Dachbegrünung	
Hochbau/Ziegelbruch Herkunft: Wohnbau- und Hochbauabbruch	RHZ Recycelter Hochbauziegelsand Recycelter Hochbausplitt (Ziegelanteil über 30 %)	Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton; Füllungen, Schüttungen, Estriche	
Hochbauabbruch Herkunft: Industriebau und allgemeiner Hochbauabbruch	RH Recycelter Hochbausand Recycelter Hochbausplitt (Ziegelanteil unter 30 %)	stabilisierte Schüttungen, stabilisierte Künettenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen Sportplatzbau	
Mineralische Hochbaurestmassen Herkunft: Industriebau und allgemeiner Hochbauabbruch	RMH Recycelte mineralische Hochbaurestmasse (Beton, Ziegel, natürliches Gestein)	stabilisierte Schüttungen, stabilisierte Künettenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen Sportplatzbau	
Asphaltaufruch Herkunft: Straßenbau	RA Recyciertes gebrochenes Asphaltgranulat (vorwiegend Asphalt)	ungebundene obere und untere Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau, Zuschlagstoff für Asphaltproduktion	
Betonabbruch Herkunft: Straßenbau, Brückenbau, Industriebau	RB Recyciertes gebrochenes Betongranulat (vorwiegend Beton)	ungebundene obere und untere Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau, hochwertiges Künettenfüllmaterial	
Asphalt/Betonabbruch Herkunft: Straßenbau, Brückenbau, Parkplätze	RAB Recyciertes gebrochenes Asphalt/Beton-Mischgranulat	ungebundene obere und untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlicher Wegebau	
Mineralische Restmassen Herkunft: Straßenbau	RM Recyciertes gebrochenes Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein	ungebundene obere und untere Tragschichten, gebundene Tragschichten	
Recyciertes Gestein Herkunft: Eisenbahnbau, Straßenbau, historischer Hochbauabbruch	RG Recyciertes Granulat aus Gestein, Beton und/oder Asphalt	ungebundene obere und untere Tragschichten, gebundene Tragschichten	

Abb.8: Übersicht über die Verwertungsmöglichkeiten und Anwendungen von Baurestmassen

Putz

Anhaftende Zement- und Kalkputze auf mineralischen Trägerschichten stellen bei der Aufbereitung kein Problem dar. Wärmedämmputze hingegen, enthalten wärmedämmende Leichtzuschläge aus expandiertem Polystyrol und/oder Perliten oder Blähglas, wodurch die Verwertungsmöglichkeiten eingeschränkt werden. Unmöglich gestaltet sich derzeit die Verwertung von Außenputzen an Wärmedämmverbundsystemen, die gerade bei Neubauten und Sanierungen immer häufiger zum Einsatz kommen. WDVS⁵ werden beim Rückbau, mitsamt ihres Schichtaufbaus, unmittelbar zu Abfall.

Gips

Beim Innenausbau von Gebäuden sind gipshaltige Baustoffe allgegenwärtig. Gips wird im Trockenbau vielfältig eingesetzt, etwa als Gipsputz oder als Bestandteil von Gipskarton- und Gipsfaserplatten. Neben den natürlichen Gipsvorkommen, fallen große Mengen als industrielles Nebenprodukt (z.B. REA-Gips) bei der Rauchgasentschwefelung in Braun- und Steinkohlekraftwerken an. Seit mehr als 30 Jahren entlastet der REA-Gips den Naturgipsabbau und fördert die Ressourceneffizienz. [57] Die bevorstehende Energiewende wird jedoch, durch die Schließung von kalorischen Kraftwerken, zum Rückgang dieser sekundären Rohstoffquelle führen. Umso mehr steigt das Interesse an Recyclinggips.

In Österreich werden seit den 1970er Jahren jährlich rund 200.000 Tonnen an Gipsprodukten verbaut. [58] In den kommenden Jahren werden, durch verstärkte Abbrüche, größere Teile dieser verbauten Gipsressourcen wieder frei, wodurch sich Möglichkeiten umfassender Nutzung von RC-Gips als Sekundärrohstoff ergeben.

Sortenreiner Gips lässt sich theoretisch beliebig oft recyceln. [59] In der Praxis landet der Baustoff allerdings häufig auf Deponien. Zumal es sich um ein wasserlösliches Material handelt, das durch Abgabe von Sulfat-Ionen das Grundwasser belasten kann, ist die Deponierung ohnehin ökologisch problematisch. [60] Calciumsulfat (Gips) beeinträchtigt jedoch die Betonqualität und wird daher als Störstoff von Betonabbrüchen getrennt. Zudem wird die Wiederverwertung durch anhaftende Materialien (z.B. Tapeten) behindert und dem, vergleichsweise teuren, Recycling stehen niedrige Deponiekosten gegenüber. [61]

Ökologisch sinnvoll ist die Verwertung nur dann, wenn die Transportdistanz sowohl zwischen Rückbaustelle und Verwertungsanlage als auch zwischen Verwertungsanlage und neuem Produktionsort gering ist. Was hierzulande noch Entwicklungsbedarf hat, wird in anderen Ländern bereits großtechnisch praktiziert. Als effektives Beispiel sind hier die mobilen Recyclinganlagen eines dani-

⁵ Abkürzung für Wärmedämmverbundsysteme.

schen Herstellers zu nennen. Gipsabfälle können in diesem System vollständig recycelt und anschließend als reines Gipspulver in der Gipsplattenindustrie wiedereingesetzt werden. [62]

Metalle

Im Vergleich zu anderen Materialien, werden Eisen- und Nichteisenmetalle schon seit langem in geschlossenen Stoffkreisläufen geführt. Stahl ist das weltweit am häufigsten recycelte Material. [63] Dieser werthaltige Stoff ist in fast allen Gebäudebeständen zu finden. Rund 85 Prozent aller im Bauwesen verwendeten Metallbaustoffe sind aus Stahl. [64] In einer 100-Quadratmeter-Wohnung stecken demnach bis zu 7,5 Tonnen an Metallen. [65] Metallschrott kann zu 100% recycelt werden, wobei sich folgende Schrottsorten voneinander unterscheiden:

- Eigenschrott ist sortenreiner Stahlschrott ohne Fremdstoffe, der bei der Stahlproduktion anfällt und direkt wieder eingeschmolzen wird.
- Neuschrott sind Reste die in der Industrie anfallen, etwa beim Stanzen oder Feilen von Stahl. Nach der Aufbereitung kann auch der Neuschrott wieder eingeschmolzen werden.
- Altschrott sind Metalle, die bereits im Umlauf waren. Große Mengen fallen etwa bei Abbrüchen, Verschrottung oder in der Sammlung an. Mit 60 Prozent Altschrottanteil ist Recycling bereits ein etablierter Bestandteil der Stahlproduktion. [66]

Große Bedeutung kommt den Recyclingmetallen vor allem hinsichtlich Umweltauswirkungen zu. Die Erzeugung des Primärrohstoffs ist mit hohem Energieaufwand und gravierenden Umweltbelastungen verbunden. Äußerst negativ fällt der Herstellungsprozess von Aluminium auf. Der dabei als Abfallprodukt anfallende Rotschlamm birgt hohes Gefahrenpotenzial für die Umwelt [67] Recyclingstahl benötigt nur ein Drittel der ursprünglich erforderlichen Primärenergie. [68] Bei recyceltem Aluminium sind es im Vergleich zur Neuproduktion sogar nur fünf bis zehn Prozent der Energiemenge. [69]

Stahlbauten beschränkten sich derzeit noch auf Nichtwohngebäude. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft wäre es jedenfalls sinnvoll den Stahlanteil auch im Wohnbau auszudehnen. So besteht der gesamte Wiener Gebäudebestand zu 90 Prozent aus Wohngebäuden und nur 10 Prozent Nichtwohnbauten. [70]

Die Wiederverwendung ganzer Stahlbauteile ist eher unüblich, aber prinzipiell möglich. [71] Metalle werden überwiegend stofflich verwertet, weil durch *Up-cycling*⁶ neue Produkte mit höherer Qualität, verglichen zum Ausgangsstoff, 6 Beim Upcycling werden Abfallprodukte oder nutzlose Stoffe in neuwertige Produkte umgewandelt. Bei dieser Form des Recyclings handelt es sich um eine stoffliche Aufwertung.

entstehen können. Stahl kann beispielsweise im Umschmelzungsprozess durch Legierungen und weitere Behandlungen beliebig an neue Anforderungen angepasst werden. [72]

Aufgrund seines Brandverhaltens kann Stahl in Form von Tragwerken besondere Brandschutzmaßnahmen, wie Ummantelungen oder Bekleidungen aus mineralischen Baustoffen, erfordern. Um die sortenreine Rückgewinnung des Stahls zu gewährleisten, ist eine rückbaubare Konstruktion erstrebenswert. Zu hinterfragen ist insbesondere der Einsatz von Dämmschichtbildnern.⁷ Diese enthalten unter anderem Vinylacetat als Bindemittel. [73] Dieser Stoff ist nach EG-Kategorie 3 als krebserregend eingestuft. [74]

Holz

Der Holzbauanteil hat sich in den letzten 20 Jahren in Österreich beinahe verdoppelt. Laut einer Studie der Universität für Bodenkultur wird ein Viertel des gesamten Bauaufkommens im Hochbau in Holz errichtet. Das größte Plus verzeichnet der Wohnbau. Im großvolumigen Bau ist auch in Zukunft ein Wachstum des Naturbaustoffs zu erwarten. [75]

Holz gehört zur Gruppe der biotischen Materialien.⁸ Weil es sich dabei um erneuerbare Materialien handelt, wird ihr Einsatz im Bauwesen zunächst von vielen Experten und Vertretern der Bauwirtschaft empfohlen. Bei genauerer Betrachtung der Praxisanwendung von Holzbaustoffen bzw. der Verwertung von Altholz wird deutlich, dass auch hier geschlossene Stoffkreisläufe noch nicht die Regel sind. Die Grundvoraussetzung für einen geschlossenen Kreislauf in der Holznutzung bildet die nachhaltige Forstwirtschaft.⁹ Zertifizierungssysteme wie der *Forest Stewardship Council* (FSC) oder das *Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes* (PEFC) garantieren eigenen Angaben nach, dass dem Wald nicht mehr Holz entnommen wird, als nachwächst. [76] Die Glaubwürdigkeit bzw. die Kontrollstandards derartiger Zertifizierungsstellen wird jedoch mehrfach hinterfragt und kritisiert. Die Umweltorganisation Greenpeace dokumentierte beispielsweise die Abholzung FSC-zertifizierter Urwälder in Russland und im Kongobecken. Dennoch gilt der Forest Stewardship Council weiterhin als das einzige, annähernd glaubwürdige Siegel für ökologische Waldwirtschaft. Laut Greenpeace raten alle großen Umweltverbände vom PEFC-Siegel ab. [77]

Aktuell werden in der Baubranche eingesetzte Hölzer am Nutzungsende entweder stofflich oder energetisch verwertet. Mögliche Schadstoffproblematiken

7 Dämmschichtbildende Brandschutzanstriche sind passive Brandschutzmaßnahmen, die die Stahlkonstruktionen im Brandfall schützen, indem sie die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperatur verlängern

8 Als biotisch werden Materialien bezeichnet, die durch pflanzliches oder tierisches Wachstum entstehen, an ihrem Lebensende verrotten und wieder als Nährstoff dem Wachstumskreislauf zugeführt werden können.

9 Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde bereits zu Beginn des 18. Jahrhunderts von Hans Carl von Carlowitz geprägt.

und mangelnde Gewährleistungsfähigkeit der baustatischen Eignung schließen eine Wiederverwendung von Konstruktionsholz bislang in vielen Fällen aus. Im Interesse der Umweltschonung sollte eine mehrstufige stoffliche Verwertung (Kaskadennutzung) der thermischen Variante vorgezogen werden. Studien belegen, dass die Umweltauswirkungen der Holznutzung umso geringer ausfallen, je länger die Nutzungskaskaden des Materials sind. Beispielsweise gilt Bauholz als langlebiger und damit weniger belastend als OSB-Platten, welche wiederum besser als Spanplatten abschneiden. [78] Die Qualität der Altholzprodukte entscheidet darüber, ob eine höherwertige stoffliche Verwertung zu Holzwerkstoffprodukten zulässig ist. Folgende Altholzkategorien – an denen sich auch einige holzverarbeitenden Betriebe in Österreich orientieren – sind nach der deutschen Altholzverordnung definiert:

Altholzkategorie	Kriterium	Verwertung...
Altholzkategorie AI	naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde	zu Holzwerkstoffprodukten möglich
Altholzkategorie AII	verleimtes und behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel	zu Holzwerkstoffprodukten möglich
Altholzkategorie AIII	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel	zu Holzwerkstoffprodukten eingeschränkt möglich

Abb.9: Altholzkategorien nach deutscher Altholzverordnung

Der stoffliche Wiedereinsatz von Altholz ist besonders für die Spanplattenindustrie von Bedeutung. In Österreich beträgt der Anteil von Altholz in der Produktion mittlerweile 50 Prozent. [79]

Zur Steigerung der Verwertbarkeit auf höheren Qualitätsstufen, ist es sinnvoll möglichst naturbelassenes Holz zu verwenden und chemischen Holzschutz zu vermeiden. Hinsichtlich der Wiederverwendung oder Weiterverwendung stellen auch Holz-Verbund-Konstruktionen ein Hindernis dar, da sie die sortenreine Trennung der verwendeten Stoffe erschweren. Empfehlenswert sind monolithische und homogene Bauweisen (z.B. BBS-Systeme), bei denen eine zusätzliche Materialtrennung weitgehend entfällt.

Glas

Als Baumaterial verwendet wird in der Regel sogenanntes Kalk-Natron-Glas. Das im Floatverfahren hergestellte Floatglas ist die im Hochbau am häufigsten

eingesetzte Glasart. Man findet sie vorwiegend in großflächigen Verglasungen, Fenster- und Türöffnungen.

Obwohl es mittlerweile ein flächendeckendes Sammel-, Aufbereitungs-, und Verwertungsnetz für Baugläser gibt, gilt Recycling auf gleicher Qualitätsstufe als aufwendig. An den transparenten Baustoff werden hohe Anforderungen gestellt: Energieeinsparung, Regulierung des g-Werts, reduzierte Anhaftung von Schmutz, leichte Reinigung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, handelt es sich bei den Isolierverglasungen häufig nicht um reine Floatgläser, sondern hochentwickelte und beschichtete Produkte. Diese Beschichtungen verhindern die Herstellung eines Sekundärfloatglases. Bereits kleinste Verunreinigungen von unter 0,05 Prozent können die Brechzahl oder Farbkonsistenz des Endproduktes derart beeinflussen, dass eine Weiternutzung auf gleicher Qualitätsstufe nicht mehr möglich ist. [80]

Bestandteil	Funktion	Recyclingfähigkeit
Edelgase (z.B. Argon, Krypton)	• Senkung des Wärmedurchgangskoeffizienten bei Dreifachisolierverglasungen • Verbesserung des Schallschutzes	gehen beim Schreddern der Isolierglaseinheiten verloren
Scheibenabstandhalter aus Metall/ Kunststoffkomposit	• Scheibenabstandhalter bei Dreifachisolierverglasungen • Versiegelung u.a. mit Butyl oder Polyurethan	die geringe Masse ist für ein Recycling nicht relevant
Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum	• Schutz vor Sonneneinstrahlung • Tageslichtstreuung und -lenkung	gut rezyklierbare Materialien, wie Holz- oder Aluminiumlamellen, Kunststoffröhrchen aus PMMA/Acrylglas
PVB-Folien	• Einbruchschutz, Sprengsicherheit • hohe Tragfähigkeit und Schallschutz in Verbund sicherheitsgläsern	sortenreine Rückgewinnung des hochwertigen PVB seit kurzem möglich, aber noch nicht Standard

Abb. 10: Auswahl von Bestandteilen einer hochwertigen Verglasung

Weitere Bestandteile der im Hochbau eingesetzten Verglasungen:

Neu hergestellte Floatglas-Isolierscheiben bestehen aktuell aus maximal 30 Prozent Recyclinganteil, wobei ein Großteil davon aus der Rückführung betriebseigenen Ausschussglases stammt. [81] In Forschungsergebnissen konnte jedoch bereits nachgewiesen werden, dass Flachglaserzeugung mit 50 Prozent Altscherben-Anteil möglich wäre. [82]

Alle in Abbildung 10 genannten Komponenten sind Ergebnisse hochtechnisierter Forschung und ermöglichen den Einsatz hochwertiger Glasprodukte im Bauwesen. Recyclingaspekte wurden in der Entwicklung jedoch nicht bedacht. So gerät ein Großteil der Gläser derzeit lediglich in einen Downcyclingprozess:

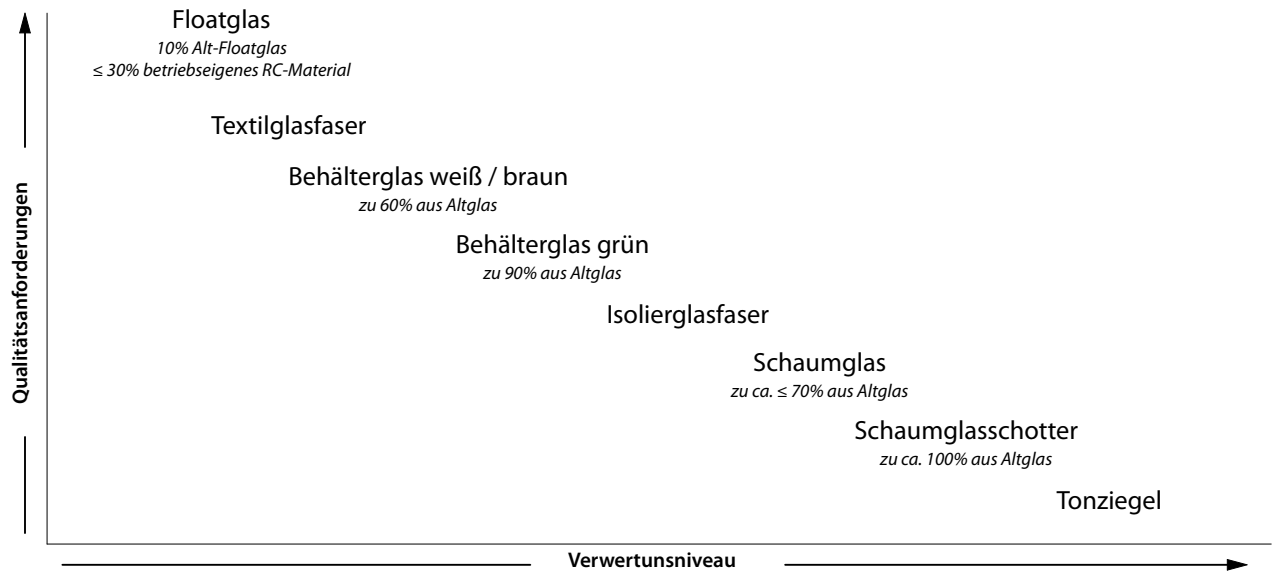


Abb.11: Nutzungskaskade von Glas (sinkendes Verwertungsstufe von oben nach unten)

Ein altes Fenster, wieder als solches in einem Neubau einzusetzen, ist aufgrund der stetig steigenden technischen Anforderungen nicht möglich. Denn der U-Wert einer Isolierglaseinheit verschlechtert sich in den ersten 20 bis 25 Jahren um 0,1W/m²K. Wenn der Argon Gasfüllgrad im Scheibenzwischenraum eines neuen Fensters bei 90 Prozent liegt, verliert er nach 25 Jahren 25 Prozent Gas. [83] Dieser Zeitraum entspricht allgemein der Lebensdauer eines Isolierglases. Gegenwärtig werden Fenster deponiert oder illegal (z.B. nach Südosteuropa) verfrachtet. [84]

Kunststoffe

Neben Bitumen sind erdölbasierte Kunststoffe die im Bauwesen meist verwendeten Materialien fossilen Ursprungs. [85] Europaweit werden jährlich 10 Millionen Tonnen Kunststoff vom Gebäude- und Bausektor verbraucht. Diese Menge entspricht einem Fünftel des gesamten europäischen Kunststoffverbrauchs. [86] Die Materialien besitzen viele geschätzte Eigenschaften wie Stabilität oder Langlebigkeit. Zugleich bergen diese Eigenschaften aber auch Gefahren für die Umwelt. Laut Umweltbundesamt kann die Zersetzung von Kunststoff bis zu 450 Jahre betragen. [87]

Die Anwendungsbereiche von Kunststoffen sind breit gefächert. In Gebäuden findet man sie hauptsächlich in Form von Profilen, Dämmungen, Rohren, Dichtungsbahnen oder Bodenbelägen. Mit einem Marktanteil von über 60 Prozent wird auch das Kunststofffenster in Österreich klar bevorzugt. [88] Im Vergleich zu anderen Baustoffen lässt die baustofftechnische Leistung des fossilen Materials relativ schnell nach. [89]

Die Unterteilung von Kunststoffen in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere ist vor allem hinsichtlich der Recyclingpotenziale der jeweiligen Werkstoffe relevant. Werkstoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyvinylchlorid (PVC) sind Thermoplaste und lassen sich durch mechanisches Zerkleinern und erneutes Einschmelzen im Extruder¹⁰ vollständig recyceln. Somit können thermoplastische Altkunststoffe für die Herstellung neuer Produkte beliebig oft eingesetzt werden. [90]

Die in der Bauwirtschaft am häufigsten eingesetzte Werkstoffart ist PVC. Dieser thermoplastische Kunststoff gilt als besonders kostengünstig und findet daher in Abdichtungsbahnen, Halbzeugen und Profilen Verwendung. Voraussetzung für das wiederholte Recyceln auf gleicher Qualitätsstufe ist die Sortenreinheit des Kunststoffs und eine anhaftungsfreie Rückgewinnung. Minderwertige Kunststoffgemische können nicht mehr stofflich verwertet werden und gelangen auf direktem Weg in die Verbrennung. Eine Studie des Umweltbundesamtes belegt, dass derzeit nur knapp ein Drittel aller Kunststoffabfälle stofflich verwertet wird. [91] Angesichts des hohen Aufwands von Sammellogistik, Reinigung und Sortierung der am Bau anfallenden Kunststoffe, erweist sich die thermische Verwertung als wirtschaftlicher. [92] Eine Ausnahme bilden PVC-Fenster, die im geschlossenen Kreislauf an den Hersteller zurückgeführt werden können, um dort als PVC-Regranulat zur Produktion neuer Fensterprofile eingesetzt zu werden. [93]

Abgesehen vom Recyclingaspekt, ist der Gebrauch dieser Produkte in Bezug auf Umwelt und Gesundheit zu hinterfragen. Mehrere Studien belegen den Gehalt von krebserzeugenden und reproduktionstoxischen Schadstoffen in PVC-Boden- und Wandbelegen. Eine zusätzliche Gefährdung tritt bei PVC-Bränden auf, da in solchen Fällen schwere Dioxinverseuchungen hervorgerufen werden können. [94]

Duroplaste und Elastomere sind, im Gegensatz zu den eben angesprochenen Kunststoffen aus der Gruppe der Thermoplaste, nicht recyclebar. Da die Lebensdauer fossiler Materialien eingeschränkt ist, kommt die Option einer Wiederverwendung kaum in Frage.

Als Alternative zu konventionellen Kunststoffen werden zurzeit Biokunststoffe¹¹ erforscht. Der Verband *European Bioplastics* und auch Branchenexperten schätzen, dass bis zum Jahr 2020 bereits ein Prozent des Kunststoffweltmarkts durch Biokunststoffe gedeckt werden könnte. [95] Ob und in welchem Ausmaß Biokunststoffe im Bausektor eingesetzt werden können, ist noch unklar. Der Beitrag dieser Alternative zum Klima- und Ressourcenschutz ist noch nicht vollständig

¹⁰ Ein Extruder ist eine Schneckenmaschine, in der das Material aufgeschmolzen und homogenisiert wird.

¹¹ Biokunststoffe basieren auf nachwachsenden Rohstoffen wie z.B. Stärke, Cellulose oder Milchsäure. Einige Biokunststoffe sind durch Mikroorganismen biologisch abbaubar.

erforscht und bedarf weiterer Untersuchungen.

Dämmstoffe

Dämmstoffe werden nach der Art ihres Ursprungs in

- mineralische Dämmstoffe (z.B. Mineralwolle, Schaumglas),
- organische Dämmstoffe (z.B. EPS, XPS, PU) und
- natürliche Dämmstoffe aus nachwachsenden Vorkommen

gegliedert.

Steigende Anforderungen an Schallschutz und Energieeinsparung führen zu einem stetigen Wachstum am Dämmstoffmarkt. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an spezifischen Dämmstoffprodukten mit unterschiedlichen bauphysikalischen Leistungsspektren. Dämmmaterialien mineralischen und organischen Ursprungs sind in Bauwerken nach wie vor am stärksten vertreten und werden in diesem Kapitel prioritär thematisiert. [96] Nachwachsende Dämmstoffe kommen vergleichsweise noch sehr selten in Gebäuden vor und werden im Kapitel Materialkreisläufe, Dämmungen S. 126 als alternative Materialien behandelt.

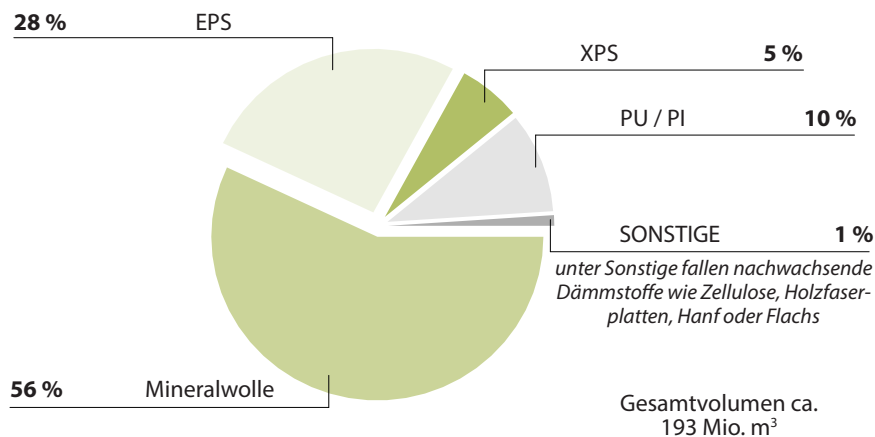


Abb.12: Marktanteile in Europa eingesetzter Dämmstoffe laut einer Markstudie aus dem Jahr 2012 [97]

Mineralische Dämmstoffe

Mineralfasern

Mineralfaserdämmplatten, wie etwa Glas- oder Steinwolle, bestehen aus sogenannten künstlichen Mineralfasern (KMF). Sie sind entweder in weicher und formbarer Gestalt oder als fest gepresste Platten in großem Ausmaß im Gebäudebestand in Verwendung. Steinwolle wird aus Gesteinen (u.a. Dolomit, Diabas, Basalt, Kalkstein) und zementgebundenem Altmaterial (45-60 Prozent) hergestellt und mit Formaldehydharzen gebunden. Glaswolle besteht aus Altglas, da-

von ca. 50–70 Prozent aus Produktionsabfällen, Sand, Kalk und Tonerde. Wobei die Fasern auch meist mit Formaldehydharz gebunden sind.

Sowohl Glas- als auch Steinwolle werden demnach aus Recyclingmaterialien hergestellt. Das Recycling der künstlichen Mineralfasern selbst erweist sich jedoch als schwierig. Wesentliche Hürden liegen in der unzureichenden Sortenreinheit der Abfallchargen, bedingt durch die aktuelle Abbruchpraxis. Anhaftungen aus Wärmedämmverbundsystemen behindern eine sortenreine Trennung. Nachträgliche Auswirkungen auf mögliche Recyclinglösungen haben außerdem ehemals verbaute Produkte, die heute als lungengängig sowie hoch gesundheitsschädigend eingestuft werden und immer noch in großen Mengen vorhanden sind. [98] Im Wesentlichen werden Abfälle aus Mineralfasern auf dafür genehmigten Deponien abgelagert. [99]

Forschungen gehen in Richtung Mikrowellenbehandlung. Dabei werden verunreinigte oder schadstoffbelastete KMF-Produkte zu Schlacken verarbeitet, um daraus ein für Bauzwecke wieder nutzbares Granulat zu erzeugen. [100]

Schaumglas

Recyclingglas ist auch Ausgangsstoff für Schaumglasschotter und Schaumglasplatten. (s. Abb. 11: Nutzungskaskade von Glas, S. 39) Beide Endprodukte werden in einem Schmelzverfahren unter Zugabe von Kohlenstoff hergestellt. Die dabei entstehende Zellstruktur beinhaltet Gase wie Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und Stickstoff, die 95 Prozent des Dämmstoffs ausmachen. Anwendung finden Schaumglasprodukte als lastabtragende Dämmung und Tragschicht unter der Bodenplatte (Dämmschotter) oder als Bodenplatten-, Flachdach- und Kellerdämmung (Dämmplatten). Schaumglasplatten werden üblicherweise vollflächig mit dem Untergrund verklebt wodurch Recycling unmöglich wird. Alternative Befestigungsmöglichkeiten werden in Kapitel Lösbare Verbindungen, S. 95-96 angeführt.

Sofern eine unverklebte Rückgewinnung möglich ist, gelangen Schaumglasprodukte wieder in einen geschlossenen Kreislauf oder werden im Sinne des Downcyclings weiterverwendet. [101]

Organische Dämmstoffe

Polystyrol (EPS, XPS)

Die zweitgrößte Gruppe der dämmenden Materialien im Hochbau, umfasst EPS (expandiertes Polystyrol) und XPS (extrudiertes Polystyrol). Erdölbasierte Dämmstoffe haben, gegenüber anderen Dämmstoffen den Vorteil, beständig gegen Feuchtigkeit zu sein. Aus diesem Grund eignen sie sich besonders gut für die Verwendung in Außenbauteilen (EPS in WDVS; XPS als Dachdämmung) oder

erdberührten Bauteilen (XPS als Perimeterdämmung).

In Österreich werden Polystyrol-Abfälle hauptsächlich in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet. [102] Eine rohstoffliche Aufbereitung und Rückführung in sekundäre Ausgangsstoffe wird gegenwärtig nicht praktiziert. [103] Die Gründe dafür sind verschieden: Einerseits erschweren Materialverbünde, aufgrund teils vollflächiger Verklebungen, die sortenreine Trennung des Dämmstoffes. Andererseits beinhalten Polystyrole risikobehaftete Substanzen, durch die Recyclingverfahren nur schwerlich umzusetzen sind. So kann etwa in EPS- oder XPS-Hartschaumplatten das Flammschutzmittel HBCD enthalten sein, dass von der europäischen Chemikalienagentur im Jahr 2008 als besonders besorgniserregender Stoff eingestuft wurde. [104]

Eine hochwertige Wiederverwertung von Polystyrolen wird in absehbarer Zeit möglich sein. Hierfür hat das *Fraunhofer Institut* das sogenannte CreaSolv®-Verfahren entwickelt, das die Wiederaufbereitung von Styropor aus dem Bauschutt alter Gebäude erlaubt. Dabei wird das EPS in einer speziellen Flüssigkeit aufgelöst. Mineralische Verunreinigungen, wie Putz- oder Klebereste werden mithilfe von Filterung beseitigt. Sogar das problematische Flammschutzmittel kann durch Destillation abgetrennt und anschließend verbrannt werden. Eine Pilotanlage in den Niederlanden wendet das Verfahren bereits an. Ersten Versuchen zufolge wäre ein Rezyklatanteil von 30 Prozent möglich, ohne dabei die Endproduktqualität zu beeinträchtigen. Dennoch ist Polystyrol-Recycling aus heutiger Sicht sowohl wirtschaftlich (geringe Kosten von Dämmstoffen) als auch ökologisch (Transport und Energieaufwand) fragwürdig. [105]

Polyurethan

Polyurethan ist aufgrund seiner bauphysikalischen und technischen Eigenschaften nicht unbedeutend für die Bauwirtschaft. PU-Dämmstoffe verzeichnen einen Anteil von 10 Prozent am Gesamtdämmstoffmarkt. Anwendungsbereiche sind Flachdach- und Perimeterdämmungen, Geschossdecken- und Innendämmungen, sowie WDVS in Form von PUR-Hartschaumplatten oder Ortschaum, der auf der Baustelle eingebracht wird.

Grundsätzlich ist eine stoffliche Verwertung möglich, sofern unverschmutzte PUR-Hartschaumabfälle vorliegen. Diese werden zerkleinert und zu Press- oder Dämmplatten (z.B. Purenit) verarbeitet. Die Praxis zeigt allerdings, dass die im Rückbau anfallenden Polyurethan-Abfälle vorwiegend mit anderen Materialien vermischt sind und anschließend in einer thermischen Abfallbehandlungsanlage verbrannt werden. [106] Zudem können PU-Dämmstoffe heute nicht mehr zugelassene Treibmittel wie HFCKW enthalten, wodurch Recycling unmöglich wird. [107]

Für alle mineralischen und organischen Dämmstoffe gilt: Eine Wiederverwendung ist aufgrund der kostengünstigen Materialbeschaffung wirtschaftlich uninteressant und in absehbarer Zeit sehr unwahrscheinlich.

Schadstoffe

Beim Umbau, der Sanierung oder dem Abbruch von Gebäuden ist das Auftreten von Schadstoffen grundlegend zu erwarten. Unter Schadstoffen sind jene organischen und anorganischen Stoffe zu verstehen, die schädliche Wirkungen auf Umwelt und/oder Mensch haben können. In der Vergangenheit wurden viele dieser Stoffe, aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften, in Bauprodukten eingesetzt. Erst Jahre später erfolgte die Einstufung als gefährliches Material. Im heutigen Gebäudebestand sind Schadstoffe weit verbreitet und bilden für die Kreislaufwirtschaft eine Barriere der besonderen Art.

Die am 01.01.2016 in Kraft getretene Recycling-Baustoffverordnung (RBVO) beinhaltet unter anderem die verpflichtende Durchführung einer Schad- und Störstofferkundung vor dem Abbruch eines Bauwerks. Bei Objekten, bei denen mehr als 750 t Bau- und Abbruchabfälle anfallen, ist eine orientierende Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM B3151 „Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode“, durch eine rückbaukundige Person durchzuführen. Wird darüber hinaus ein Brutto-Rauminhalt von über 3.500 m³ abgebrochen, ist eine umfassende Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM ISO EN16000-32 durchzuführen. [108]

Laut RBVO ist auch die Dokumentation von Bauteilen, die einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können, verpflichtender Bestandteil der Schad- und Störstofferkundung.

Je nach Errichtungszeitraum und Art des Gebäudes kann der Schadstoffanfall bei Bau- und Abbruchtätigkeiten variieren. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Schadstoffe im Baubereich:

Schadstoff	Herstellungs- und Verwendungszeitraum	Abfallart (Beispiele) ⁷	häufigster Entsorgungsweg ⁸
Asbest	1947-1990: Einsatz in großen Mengen 1990: Asbestverordnung untersagt das Inverkehrsetzen asbesthaltiger Gegenstände ¹	Fassaden- und Welldachplatten (z.B. Eternitplatten), Bodenbeläge, Asbestzementrohre, Isoliermaterialien, Brandschutzklappen/-türen	Deponierung
KMF	bis 1998: Produktion von alten KMF-Dämmstoffen (Verdacht auf krebserregende Wirkung) ab 1998: Produktion von neuen KMF-Dämmstoffen, Verwendung von alten KMF auch nach dem Jahr 1998 durch alte Lagerstände oder Importe ²	Dämmwolle als Glas- und Steinwolle	Deponierung
PCB	1955-ca. 1975: Dichtstoffmassen bis ca. 1970: PCB-haltige Anstriche bis 1984: Kondensatoren und Transformatoren ³	PCB-haltige Dicht- und Fugenmassen, Kabelummantelungen, Kitte, Klebstoffe, PCB-haltiges Altholz	Sonderabfallverbrennung
PAK	bis 2000: unterschiedliche Anwendungen (z.B. Bauwerksabdichtungen, Klebstoffe für Stabparkett, Holz- und Bautenschutz, Korrosionsschutzanstriche) ⁴	teerhaltige Dachbahnen, Estrich oder Fliesen mit PAK-haltigem Klebstoff, Altholz mit Parkettklebstoff, teerhaltiger Straßenaufbruch	Verbrennung, oberirdische oder Untertagedeponierung; Aufbereitung (z.B. Straßenaufbruch)
Schwermetalle	bis heute: kein Verbot von traditionell verwendeten Schwermetallen (z.B. Zink, Blei, Kupfer) im Bauwesen ⁵	Schüttungen in Fehlböden oder Ausgleichsmassen, Farbanstriche an Wänden und Putze, Strahlmittelrückstände	Deponierung, oberirdische oder Untertagedeponierung
(H)FCKW	bis 2002: Einsatz in Polystyrol-Hartschaumplatten bis 2003: Einsatz in Polyurethan-Schaumstoffen ⁶	XPS- und PU-Dämmplatten, Kühlgeräte, Kühlanlagen, Klimaanlage	Abtrennung und Zerstörung des (H)FCKW und stoffliche Verwertung der übrigen Teile des Abfalls

Abkürzungen:

KMF = Künstliche Mineralfaser

PCB = Polychlorierte Biphenyle

PAK = Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

(H)FCKW = (Halogenisierte) Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe

Quellen:

1 <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0177.pdf>

2 <https://www.wko.at/branchen/gewerbe-handwerk/bauhilfsgewerbe/kmf-leitfaden.pdf>

3/4 H.-D. Bossemeyer, S. Dolata, U. Schubert, G. Zwiener, Schadstoffe im Baubestand, Erkennen und richtig reagieren - mit Katalog nach Bauteilen und Gewerken, Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 2016, S. 54

5 <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2938.pdf>

6 <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4353.pdf>

7/8 Gesamtverband Schadstoffsanierung (Hrsg.), Schadstoffe in Innenräumen und an Gebäuden, 2. Auflage, Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 2014, S. 523-525

Abb.13: Schadstoffübersicht der wichtigsten Schadstoffe im Bauwesen, deren Herstellungs- und Verwendungszeitraum, sowie Beispiele und Entsorgungswege

Zusammenfassende Übersicht – Bewertung der Kreislaufpotenziale im Vergleich

In Anlehnung an den oben demonstrierten konventionellen Wandaufbau (Abb. 7) werden die Kreislaufpotenziale ausgewählter Materialien grafisch abgebildet und miteinander verglichen. Der Vergleich findet innerhalb folgender Kategorien statt:

Kategorie 1: Konstruktion/Tragwerk

Kategorie 2: Dämmungen

Kategorie 3: Öffnungen und Verglasungen

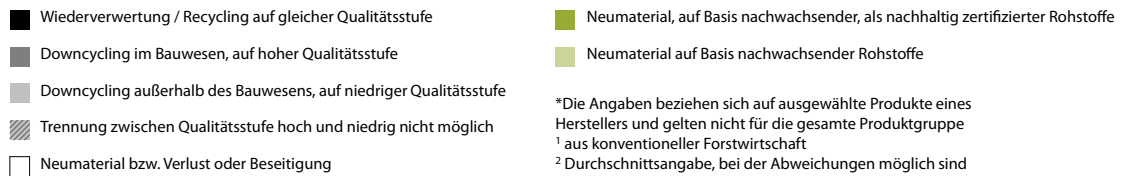
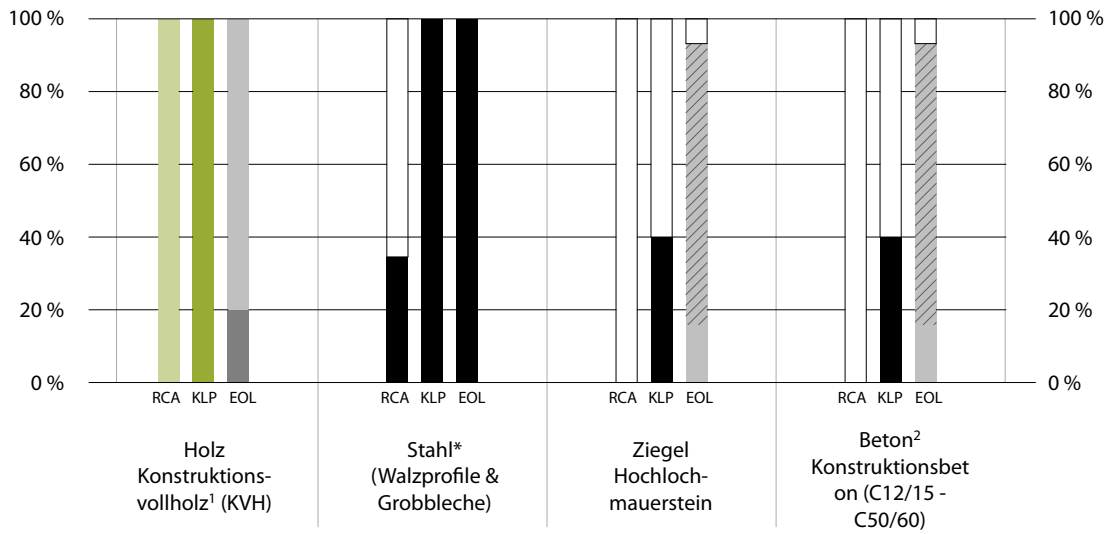
Kategorie 4: Außen- und Innenverkleidungen

Dabei stehen in der heutigen Baupraxis dominierende Baustoffe im Vordergrund. Die Kreislaufpotenziale werden hier anhand eines Balkendiagramms, bestehend aus folgenden drei Balken dargestellt:

- **Recycling-Anteil – RCA:** Der RCA-Balken zeigt an, mit welchem Recycling-Anteil ein Baustoff/Produkt derzeit hergestellt wird.
- **Kreislaufpotenzial - KLP:** Der KLP-Balken stellt dar, wie hoch der Recycling-Anteil eines Materials sein könnte, wenn die Produktion hinsichtlich kreislaufwirtschaftlicher Aspekte maximal optimiert wäre.
- **End of Life – EOL:** Der EOL-Balken visualisiert was aktuell mit einem Baustoff beim Erreichen seines Lebensendes passiert.

Die Darstellungen basieren auf bestehenden Bewertungen und Daten aus allgemeingültigen Quellen und produktspezifischen Angaben (z.B. Herstellerangaben, Produktinformationen, EPDs, Angaben aus Versuchen wissenschaftlicher Institute). [109]

Kategorie 1: Konstruktion / Tragwerk



Kategorie 2: Dämmungen

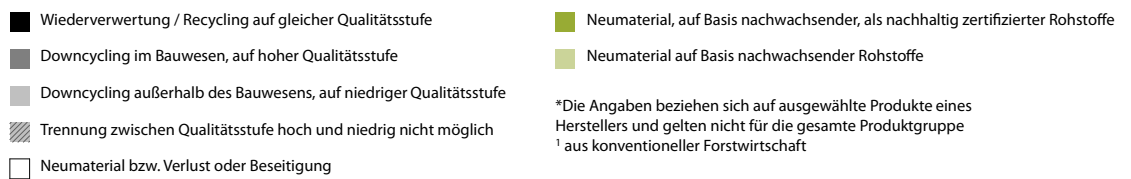
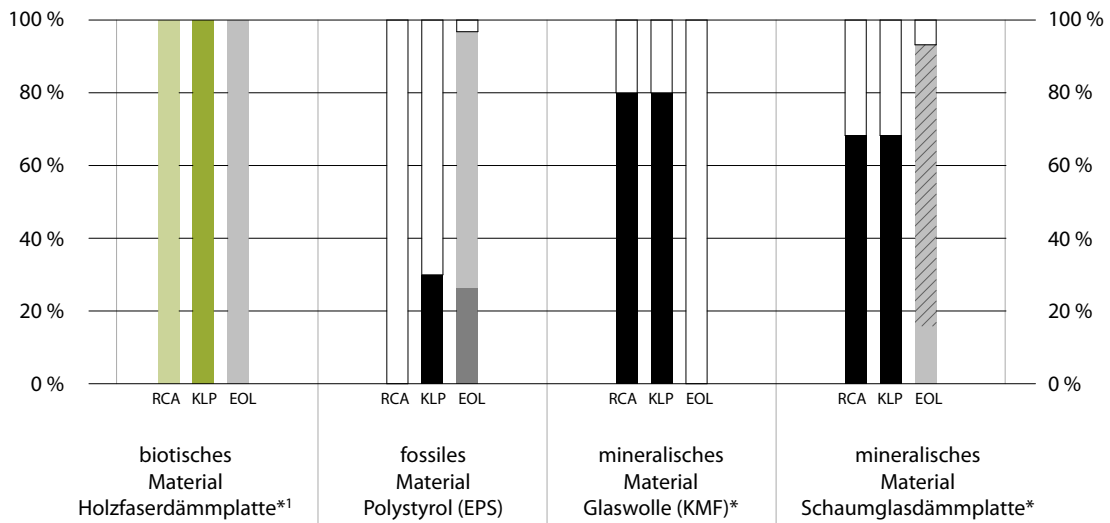
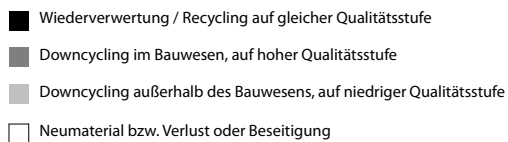
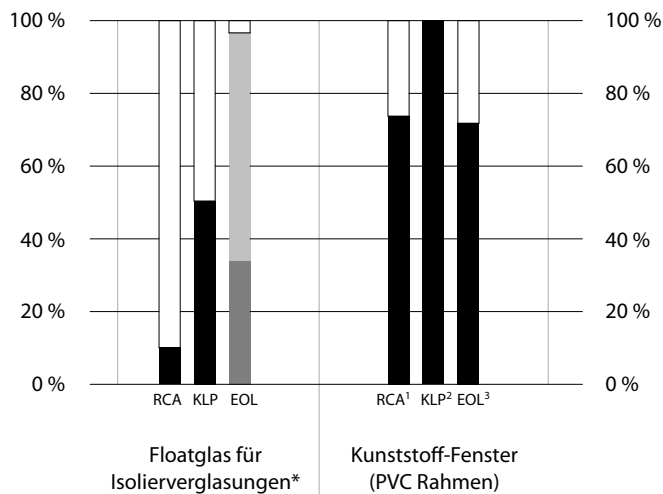


Abb.14: Bewertung der Kreislaufpotenziale von Holz, Stahl, Ziegel und Beton als konstruktive Elemente (Kategorie 1)

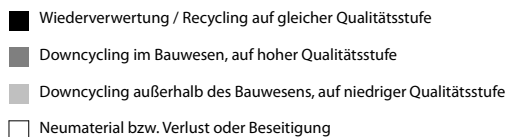
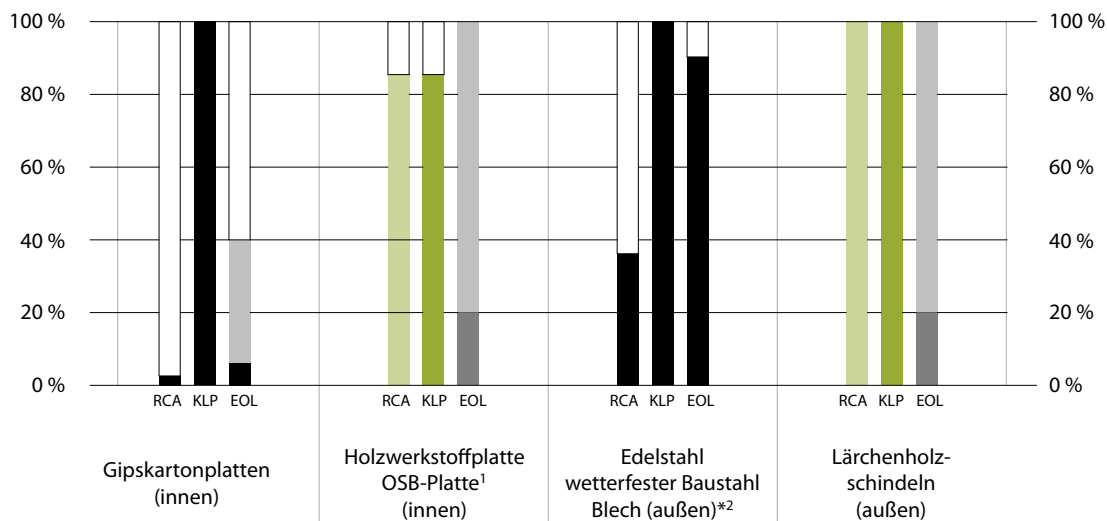
Abb.15: Bewertung der Kreislaufpotenziale von biotischen, mineralischen und fossilen Dämmstoffen (Kategorie 2)

Kategorie 3: Öffnungen und Verglasungen



*Die Angaben beziehen sich auf ausgewählte Produkte eines Herstellers und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe von Anm. 109 abweichende Quellen:
¹ https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ZukunftBauenFP/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2
² wie Anm. 1
³ <https://www.rewindo.de/rewindo-downloads/index.html>

Kategorie 4: Außen- und Innenverkleidungen



■ Neumaterial, auf Basis nachwachsender, als nachhaltig zertifizierter Rohstoffe
 ■ Neumaterial auf Basis nachwachsender Rohstoffe
 *Die Angaben beziehen sich auf ausgewählte Produkte eines Herstellers und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe
¹ aus konventioneller Forstwirtschaft
² RCA UND KLP Annahme wie Konstruktionsstahl allgemein

Abb.16: Bewertung der Kreislaufpotenziale von Glas und Fensterrahmen (Kategorie 3)

Abb.17: Bewertung der Kreislaufpotenziale von Beispielen biotischer, mineralischer und metallischer Außen- und Innenverkleidungen (Kategorie 4)

2.2 Bauabwicklung

Die gegenwärtige Bauabwicklung – insbesondere innerstädtischer Baustellen – trägt in einem wesentlichen Ausmaß zur Umweltbelastung bei. Ein Drittel der Feinstaubemissionen Wiens ist dem Bauwesen anzulasten. Für den Bau einer Wohnung sind 60 LKW-Fahrten erforderlich, für den Bau von 15 Wohnungen werden Strecken zurückgelegt, die insgesamt einmal um den Planeten führen würden.

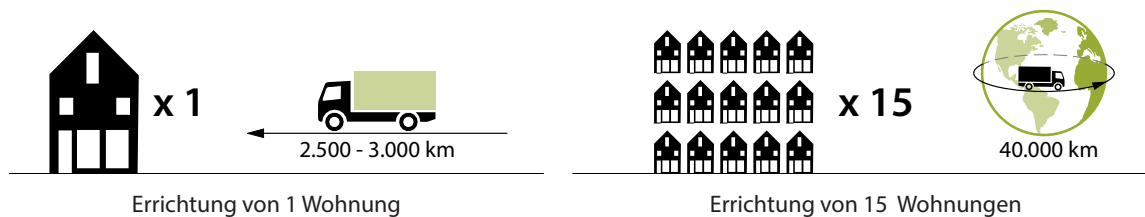


Abb.18: Erforderliche LKW-Fahrten für die Errichtung einer Wohnung in der aktuellen Baupraxis

Neben dem Baustellenverkehr und diffusen Emissionen von Luftschadstoffen, belasten Baulärm und Bauabfälle die innerstädtischen Umwelten. [110]

In den meisten Fällen geht dem Neubau auch ein Abbruch durch denselben Auftraggeber vor. Der Abbruch erfolgt zumeist auf konventionelle Weise, wobei die Abbruchmassen als Baumischabfall entsorgt werden. Im Durchschnitt werden 75 Prozent der Baustellenabfälle in sogenannten Baumix-Mulden als gemischter Abfall entsorgt. In den seltensten Fällen werden die Wertschöpfungspotenziale genützt. [111]

80 Prozent der Stoffströme die bei der Errichtung eines Gebäudes entstehen, fallen beim Erd- und Rohbau an. Im Allgemeinen wird der Erdaushub von der Baustelle abtransportiert. Anstatt das Verwertungspotenzial des lokalen Aushubmaterials als Betonzuschlag zu nutzen, werden Sand, Kies und Beton über eine mittlere Transportdistanz von 15 bis 30 Kilometern bis zur Baustelle geliefert. Dabei könnten 75 Prozent des Erdaushubs vor Ort aufbereitet und die Wertschöpfung dadurch deutlich gesteigert werden. [112] Vor allem im großvolumigen Bau besteht diesbezüglich ein enormes Einsparungspotenzial.

In der Schweiz sind verpflichtende Maßnahmen zur Minimierung umweltrelevanter Emissionen aus Bautätigkeiten in der Baurichtlinie gesetzlich verankert. Dadurch erreicht eine Vielzahl an Schweizer Baustellen bereits eine deutliche Reduzierung baustellenbedingter Umweltbelastungen. [113]

Einige der Pilotprojekte ökoeffizienter Bauabwicklung werden in Kapitel Bauen mit lokalen Ressourcen, S. 165 genauer erläutert.

Für eine klima- und ressourcenschonende Architektur ist die Optimierung in der Ausführungsphase genauso entscheidend wie in der Planungsphase. Ein entsprechendes Umweltmanagement und intelligente Baulogistikkonzepte sind daher notwendige Voraussetzung. Auch in Wien gibt es gegenwärtig einige Konzepte und Pilotprojekte die dieses Ziel verfolgen. Beispielsweise sehen der Leitfaden aus dem Projekt RUMBA (Richtlinien für eine umweltfreundliche Baustellenabwicklung) oder das Arbeitspapier aus dem Projekt ULI (Urbane Luftinitiative Wien) entsprechende Maßnahmen vor. Da sich die Anwendung derartiger Maßnahmen jedoch auf Freiwilligkeit beschränkt, ist nur mit vereinzelter Einsatz zu rechnen. Für einen breiten Einsatz von präzise geplanten Stoffströmen und ihrer Steuerung auf der Baustelle bedarf es folglich verpflichtende Maßnahmen oder klare Ausschreibungsbedingungen, welche von politischer bzw. verwaltungstechnischer Seite forciert werden müssen.

2.2.1 Rechtliche Hintergründe

Zirkuläres Wirtschaften im Bausektor wird bereits seit langem sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene als allgemeines Ziel genannt. Zur Erreichung dieses Zieles wurden diverse Verordnungen und Richtlinien erlassen. Auffallend ist, dass die zwei differenten Begriffe Kreislaufwirtschaft und Recycling in diesem Kontext oftmals nicht voneinander unterschieden bzw. sehr unpräzise verwendet werden. Trotz bestehender Rechtsgrundlagen ist Recycling auf hohem Qualitätsniveau noch nicht gängige Praxis. [114]

Rechtliche Anforderungen werden unter anderem an das Rückbau- bzw. Abbruchverfahren gestellt. Denn der Rückbau stellt hinsichtlich Verwertungsmöglichkeiten eine Kernfunktion dar. Die dabei zur Anwendung kommenden Verfahren werden, nach einem kurzen, rechtlichen Einschub, nach Art und eingesetzter Technik beleuchtet.

Rechtliche Hintergründe auf europäischer Ebene

Bauproduktenverordnung

Die EU-Bauproduktenverordnung legt Grundanforderungen an Bauwerke und wesentliche Merkmale von Bauprodukten fest. Demzufolge muss ein Bauwerk gem. Punkt 7 der BauPVO „derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden.“ Insbesondere müssen „das Bauwerk, seine Baustoffe und -teile nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können.“ und „für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“ [115] Die BauPVO beinhaltet jedoch keine qualitativen oder quantitativen Anforderungen an das Recycling.

Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

Für die EU-Mitgliedsstaaten gilt übergeordnet die europäische Abfallrahmenrichtlinie. Sie legt unter anderem die fünfstufige Abfallhierarchie für den Umgang mit Abfällen fest und gibt den Mitgliedsstaaten eine Prioritätenfolge für ihre national festzulegenden Maßnahmen vor. Außerdem werden darin wichtige Begriffe wie die Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukt oder auch das Ende der Abfalleigenschaft definiert. [116]

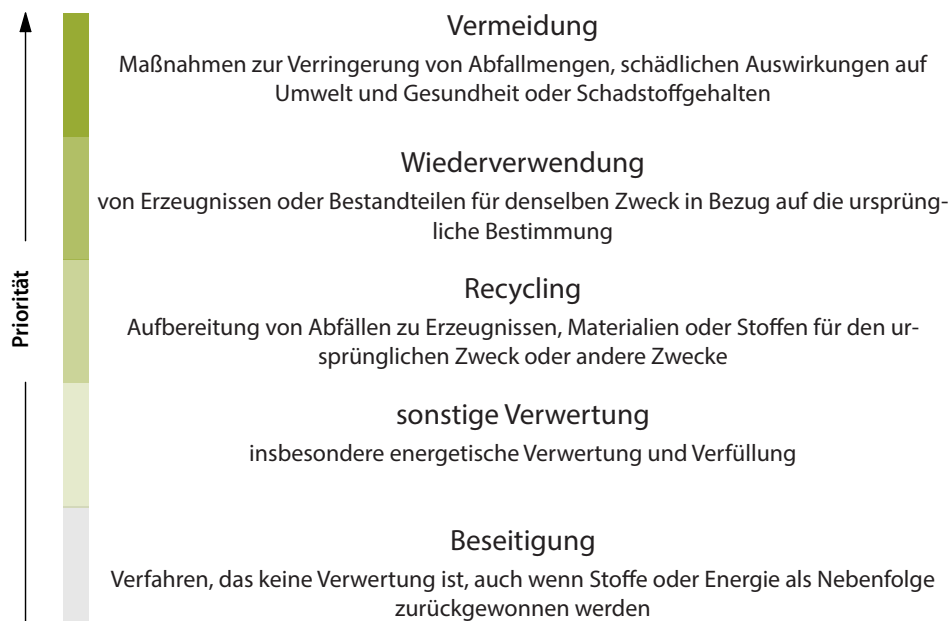


Abb.19: Fünfstufige Hierarchie der europäischen Abfallrahmenrichtlinie

Rechtliche Hintergründe auf nationaler Ebene

In Österreich wird der rechtliche Rahmen für den verwertungsorientierten Rückbau von der Recycling-Baustoffverordnung (RBVO) definiert. Diese Verordnung legt seit 2016 Pflichten für Bauherren und Bauunternehmer bei Bau- und Abbruchtätigkeiten fest. Ihr Ziel ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft, um den unionsrechtlichen Vorgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG zu entsprechen. Die RBVO regelt unter anderem die Herstellung und die Verwendung von Recyclingbaustoffen und gibt deren weitere Verarbeitung vor. [117] Flankiert wird diese Verordnung von der ÖNORM B3151 „Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode“. Auch auf Landesebene wurden hilfreiche Leitfäden zur Umsetzung der Verordnung herausgegeben. Wie etwa in der Steiermark (Leitfaden für eine ordnungsgemäße Abwicklung von Bauvorhaben) [118] oder in Niederösterreich (Leitfaden über den richtigen Umgang mit Baurestmassen und Recycling-Baustoffen). [119]

Ein nächster Schritt seitens der Legislative in Richtung Kreislaufwirtschaft wird voraussichtlich eine Erweiterung der bestehenden bautechnischen Vorschriften, den OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik) Richtlinien sein. Das Ministerium für Nachhaltigkeit hat diesbezüglich die Initiative für eine OIB-Richtlinie 7 aufgegriffen. Diese könnte mit dem siebten Punkt der EU-Bauprodukteverordnung (s. oben) in Einklang gebracht werden. [120]

Grundanforderungen an Bauwerke gem. BauPVO	OIB-Richtlinien
1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit	OIB-Richtlinie 1
2. Brandschutz	OIB-Richtlinie 2
3. Hygiene, Gesundheit und Umwelt	OIB-Richtlinie 3
4. Nutzungssicherheit	OIB-Richtlinie 4
5. Lärmschutz	OIB-Richtlinie 5
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz	OIB-Richtlinie 6
7. Nachhaltige Nutzung d. natürlichen Ressourcen	OIB-Richtlinie 7 ?

Abb.20: Gegenüberstellung der BauPVO und der OIB-Richtlinien

2.2.2 Angewandte Rückbau- und Abbruchverfahren

Entscheidend für die Recyclingfähigkeit in Architektur und Bauwesen ist der Rückbau von Bauwerken. Je selektiver und kontrollierter der Rückbau bzw. Abbruch erfolgt, desto sortenreiner ist die Rückgewinnung der verbauten Materialien und umso höher deren Verwertungsmöglichkeiten. Teil- bzw. Totalabbrüche sind dabei von der Entkernung eines Gebäudes abzugrenzen.

- Teilabbruch: Beseitigung von Bauwerksabschnitten oder vorbestimmten Bauwerksteilen unter Erhaltung der Standsicherheit der verbleibenden Teile.
- Totalabbruch: Restlose Beseitigung eines Bauwerks bis auf die Gründungssohle
- Entkernung: Rückbau eines Bauwerks bis auf den Rohbauzustand, durch den Ausbau von Bauteilen, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit der baulichen Anlage haben. [121]

Je nach Art und Umfang der Separierung können folgende Verfahren voneinander unterschieden werden:

Konventioneller Abbruch

Beim konventionellen Abbruch handelt es sich um eine besonders grobe Art der Beseitigung, die man plastisch auch als „Abbruch mit der Abrissbirne“ beschreiben kann. Zwingende Anforderungen in Bezug auf vorherige Entrümpelung,

Entkernung oder begleitende Separierung und Entsorgung gibt es bei dieser Methode nicht. Durch das „Zertrümmern“ ist eine Vermischung der Abbruchmaterialien unvermeidbar. Die anfallenden Abbruchmassen werden entweder nachträglich getrennt und sortiert oder zu hohen Kosten als Baumischabfall entsorgt. [122] Die hohen Entsorgungskosten haben dazu geführt, dass der konventionelle Abbruch heute nur noch bei kleinen Objekten angewendet wird. [123]

Selektiver Abbruch

Ein selektiver Abbruch ist gekennzeichnet durch das Selektieren anfallender Materialien vor, während oder nach dem Abbruch. Laut Angaben des Deutschen Abbruchverbandes (DA) ist der selektive Abbruch, das gegenwärtig häufigste Abbruchverfahren. [124] Der Gedanke einer möglichst sortenreinen Vorbereitung zur Wiederverwendung oder Verwertung ist hierbei allerdings nicht vordergründig.

Verwertungsorientierter Rückbau

Der verwertungsorientierte Rückbau von Bauwerken erfolgt so, dass die unterschiedlichen Materialien hochgradig sortenrein zurück- bzw. ausgebaut werden. Dabei werden Verunreinigungen, Vermischungen oder Beschädigungen der zu trennenden Materialien minimiert. Um einen möglichst hohen Anteil an verwertbarem Material zu generieren, geht dem eigentlichen Rückbau die Entfernung sämtlicher Schad- und Störstoffe voran. Somit bietet dieses Verfahren die besten Voraussetzungen für ein qualitativ hochwertiges Recycling geeigneter Bau- und Abbruchabfälle.

Demontage als Vorbereitung zur Wiederverwendung

Bauteile mit Wiederverwendungspotenzial werden mit besonderer Sorgfalt in umgekehrter Montagereihenfolge demontiert um an einer anderen Stelle wieder eingesetzt zu werden.

Verfahrenstechniken

Bis in die 1950er Jahre wurde der Rückbau – genauso wie der Hochbau – vorwiegend in Handarbeit ausgeführt. Anders als heute kamen damals einfache mechanische Werkzeuge zum Einsatz. Mittlerweile handelt es sich bei den Abbrucharbeiten um einen hochtechnisierten und energieintensiven Vorgang. Manuelle Verfahren finden heute überwiegende Anwendung in der Gebäudeentkernung. Das Selektieren von Wertstoffen funktioniert durch die manuelle Arbeit besonders gut. [125]

Dort wo Handarbeit nicht mehr möglich oder effizient ist, kommen Abbruchgeräte zum Einsatz. Die Technik im Bereich des maschinellen Abbruchs wurde in den vergangenen Jahrzehnten laufend präzisiert. Bedingt durch das schnelle

Wachstum des urbanen Raumes und der damit zusammenhängenden höheren Grundstückspreise ist ein Abbruch oft wirtschaftlich naheliegend. [126] In Wien herrscht seit einigen Jahren ein regelrechter Abbruchboom, der vor allem Schnelligkeit und effiziente Abbruchverfahren fordert. Besonders beliebt in der Praxisanwendung ist der Hydraulikbagger. Eine Reihe von Anbaukomponenten, wie Ausleger oder Schnellwechselsysteme erleichtern spezifische Abbruchtätigkeiten. Im Sinne der Arbeitssicherheit kommen auch zunehmend ferngesteuerte Abbruchroboter im Gebäudeinneren zum Einsatz, die außerdem mit Strom betrieben werden und als emissionsfrei gelten. [127] Abhängig von den je spezifischen Konstruktionen, Bauteilen und Baustoffen einigen sich nicht alle Verfahren gleichermaßen.

Wirtschaftlicher Aufwand für Rückbau und Abbruch

Die Wahl des Abbruchverfahrens hängt neben den objektiven Verhältnissen (Konstruktion, Material, Abbruchhöhe, etc.) auch stark von wirtschaftlichen Faktoren ab. Die Gesamtabbruchkosten setzen sich aus folgenden Kosten zusammen:

- Rückbau- /Demontagekosten
 - › Personalaufwand (Anzahl und Qualifikation)
 - › Geräte-/Maschineneinsatz (Art und Menge, Betriebsstoffe)
 - › Material (Sicherungsmaßnahmen, Schutzausrüstung)
- Entsorgungskosten

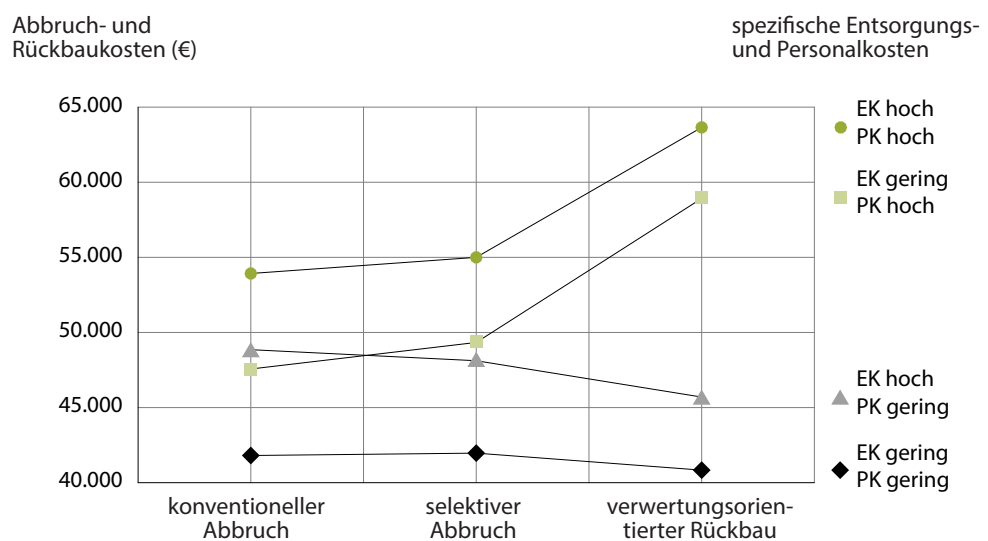


Abb.21: Gegenüberstellung von Abbruch- bzw. Rückbaukosten und deren spezifischer Entsorgungs- und Personalkosten basierend auf vier Modellrechnungen für ein Wohngebäude in Massivbauweise (Baujahr: 1856, Brutto-Rauminhalt: 4.200 m³)

Aus dieser Gegenüberstellung geht klar hervor, dass das Verhältnis von Rückbau- zu Entsorgungskosten, differenziert nach konventionellem Abbruch und selektivem Rückbau, vor allem von Ausgaben für Personal beeinflusst wird. Dies kann mitunter ein Grund dafür sein, dass der verwertungsorientierte aber personalintensive Rückbau, vergleichsweise selten angewendet wird.

In der Regel wird der Abbruch von Gebäuden pauschal ausgeschrieben und die Kosten mit relativ hohen Unsicherheiten geschätzt. Weil nicht ausreichende Informationen über die Bauwerke (z.B. verbaute Materialien) vorliegen, werden die Rückbau- und Entsorgungskosten zumeist anhand des Bruttorauminhaltes pauschal kalkuliert. Man verlässt sich in der Praxis weitgehend auf die Erfahrungswerte des Unternehmers. [128] Im Zuge des Projektes „R-Bau“ zeigt sich, dass der verwertungsorientierte Rückbau unter diesen Umständen immer noch eine untergeordnete Rolle spielt. [129]

Die gesetzlich vorgegebenen Verwertungsquoten werden aktuell zwar eingehalten, allerdings nur auf niedrigem Qualitätsniveau, weshalb geschlossene Stoffkreisläufe nicht erreicht werden. In Anbetracht der wachsenden urbanen, anthropogenen Lagerstätten, der strenger werdenden Trennvorschriften und der steigenden Entsorgungskosten, ist von einer Zunahme des verwertungsorientierten Rückbaus auszugehen. Daher ist auch in der Architekturplanung ein Umdenken erforderlich: Rückbaubare Konstruktionen sind der Schlüssel zu einer sortenreinen Rückgewinnung der Materialien und einer Verwertung auf hoher Qualitätsstufe.

2.3 Bewertungssysteme

Das Thema der Nachhaltigkeit in der Architektur ist schon seit langem präsent. In den letzten Jahren stellte man sich vor allem die Frage, wie sich die Nachhaltigkeit eines Gebäudes messen und an die Öffentlichkeit kommunizieren lässt. Zu diesem Zweck wurde bereits 1990 das weltweit erste Zertifizierungssystem¹² für umweltschonendes Bauen entwickelt. Heute gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Systemen, die darauf abzielen die Nachhaltigkeit in der Architektur transparent und vergleichbar zu machen.

Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Bewertungssysteme gegeben. Inwieweit kreislaufwirtschaftliche- oder Recyclingaspekte in die Bewertungen einfließen, wird anschließend zusammenfassend erläutert.

2.3.1 Gebäudezertifizierung

DGNB / ÖGNI

Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) wurde 2007 gegründet. In Kooperation mit dem damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) entstand im Jahr 2009 das DGNB-Zertifizierungssystem für nachhaltige Bauwerke. Im selben Jahr wurde die Österreichische Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI), zur Anpassung des DGNB an österreichische Regelwerke (Richtlinien, Normen, etc.) gegründet. [130] Die Beurteilung beider Systeme erfolgt nach den Kategorien Ökologie, Ökonomie, soziokulturelle und funktionale Aspekte, Technik, Prozesse und Standort. Je nach Erfüllungsgrad erhält ein Bauwerk in diesem System eine Auszeichnung in Platin, Gold, Silber oder Bronze.

Die Abbildung der Umweltwirkungen eines Gebäudes im gesamten Lebenszyklus erfolgt in einer Ökobilanz. Der erwartete Lebenszyklus wird in vier Modulen (nach DIN EN 15978) beschrieben:

- A – Herstellungs- und Errichtungsphase
- B – Nutzungsphase
- C – Entsorgungsphase
- D – Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen

Das Recyclingpotenzial in der End-of-Life-Phase eines Gebäudes wird hier in Modul D mitbewertet.

Seit 2018 werden Projekte mit sogenannten *Circular Economy Boni* belohnt, etwa für eine recyclingfreundliche Baustoffauswahl oder eine rückbaufreundliche Konstruktion. In mehreren Kriterien können CE-Boni für Recyclingaspekte verge-

12 Die so genannte *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) wurde 1990 vom britischen *Building Research Establishment* (BRE) entwickelt

ben werden. Beispielsweise wird zu Beginn des Lebenszyklus die Wiederverwendung von Bauteilen oder der Einsatz von Sekundärrohstoffen im Kriterium „*Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung*“ positiv gewertet. Auch am Ende des Lebenszyklus gibt es CE-Boni etwa für eine rückbaufreundliche Konstruktion oder die Wiederverwendung bzw. Verwertbarkeit von Bauteilen auf gleichwertiger Stufe. [131]

BREEAM

Die *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) war das weltweit erste Zertifizierungssystem für die Nachhaltigkeit von Gebäuden. BREEAM wurde 1990 vom britischen *Building Research Establishment* (BRE) entwickelt und dient vielen der heutigen internationalen Bewertungsschemata als Orientierung. Das internationale BREEAM-System für Neubauten konzentriert sich stark auf die Planungsphase. Das Zertifikat wird in den zwei Entwicklungsstadien „Design Stage“ (Planung) und „Post-Construction-Stage“ (nach Fertigstellung) vergeben. [132]

Von insgesamt elf Kriteriengruppen werden in nur zwei der Gruppen Recyclingaspekte von Baumaterialien im engeren Sinne berücksichtigt. Kreislaufaspekte im weiteren Sinne sind nur in weiteren vier Kategorien enthalten. In der Kategorie „Materialien“ werden ökobilanzielle Berechnungen im Ansatz berücksichtigt. Der Einsatz von RC-Materialien oder eine gesteigerte Materialeffizienz werden in dieser Gruppe positiv bewertet. Innerhalb der Kategorie „Abfall“ werden Punkte für ein verwertungsorientiertes Bauabfallmanagement (z.B. Vermeidung von Abbruchabfällen durch hochwertige On-Site-Verwertung) oder die Verwendung von rezyklierten Zuschlagstoffen vergeben. [133]

LEED

Leadership in Energy and Environment Design (LEED) sind seit 1998 marktreife Zertifikate, von denen es mehrere Systemvarianten gibt. Weit verbreitet ist die Systemversion *Building Design and Construction* (BD+C), die sowohl Neubauten als auch umfangreiche Sanierungen bewertet.

Die LEED-Systemversion v4 von 2016 zielt vor allem auf die Transparenz und Optimierung von Baustoffen ab. Eine positive Wertung in der Kategorie „Materialien und Rohstoffe“ erhält die Offenlegung von Umweltwirkungen durch den Einsatz von Bauprodukten mit Umweltproduktdeklarationen. In der Bewertung ist die Wiederverwendung oder der Gebrauch von Recyclingmaterialien der Verwendung von zertifizierten Produkten gleichgestellt. Zusätzlich können durch Deklarationen der Materialinhaltsstoffe weitere Pluspunkte erzielt werden.

Die Bewertung der Ökobilanz kann entweder qualitativ oder quantitativ erfol-

gen. Die Sanierung eines denkmalgeschützten Bauwerks oder die Wiederverwendung von Baustoffen kann qualitativ bewertet werden, während für Baumaterialien unter Optimierung der Umweltauswirkungen die Möglichkeit der quantitativen Ökobilanzierung besteht. Die Vermeidung von Bau- und Abbruchabfällen durch eine gezielte Abfallmanagementplanung gilt im LEED-System als Mindestanforderung. [134]

Klimaaktiv

Seit 2005 gibt es in Österreich das Gebäudequalitätszeichen *klimaaktiv* des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW). Nach einem 1.000-Punkte System werden Projekte in den Kategorien Planung und Ausführung, Energie und Versorgung, Baustoffe und Konstruktion, Komfort und Raumqualität bewertet. Aus der ursprünglichen Bewertung für Wohngebäude, entwickelten sich auch Kriterienkataloge für Nichtwohngebäude, Neubau und Sanierung. Klimaaktiv verzeichnet die höchste Anzahl an deklarierten Gebäuden in Österreich. [135]

In der Kriteriengruppe Baustoffe und Konstruktion werden Rückbau-, Recycling- und Entsorgungseigenschaften von Bauteilen mittels des Entsorgungsindikators EI10 bewertet. Der Entsorgungsindikator beschreibt das im gesamten Lebenszyklus anfallende Volumen eines Baustoffs, oder einer Bauteilkonstruktion. Dieses Volumen wird nach Entsorgungs- und Recyclingeigenschaften gewichtet und anhand der Entsorgungswege Recycling, Verbrennung und Ablagerung beurteilt. [136]

TQB

Die Österreichische Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (ÖGNB) entwickelte in Anlehnung an die international verbreiteten Systeme BREEAM und LEED das österreichische Bewertungssystem *Total Quality Building* (TQB).

Die TQB-Kriterien stimmen weitgehend mit den klimaaktiv-Kriterien überein. Um möglichst viele Nachhaltigkeitsaspekte abzudecken wurden im TQB-System zusätzliche Kriterien wie Barrierefreiheit, ökologische Baustelle, Brandschutz sowie ein Entsorgungsindikator etc. in die Bewertung aufgenommen. [137]

2.3.2. Produktzertifizierung

Neben Zertifizierungen auf Bauwerksebene werden auch einzelne Bauprodukte in der Herstellungs-, Nutzungs- und End-of-Life-Phase umfassend bewertet. Umweltzeichen und -deklarationen, wie der *Blaue Engel*, das braubereichenspezifische *natureplus* oder die Holzprodukte-Labels PEFC und FSC, können von Herstellern oder Zertifizierern auf freiwilliger Basis genutzt oder bereitgestellt werden. Als Bewertungssystem besonderer Art gilt das 2005 vom deutschen

Chemiker Michael Braungart und dem US-amerikanischen Architekten und Designer William McDonough entwickelte C2C-Zertifikat. Es ist für jegliche Art von Produkten anwendbar, die nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip („von der Wiege zur Wiege“) konzipiert sind. Bislang wurden mehr als 350 Produkte aus dem Bereich „Bauprodukte und Ausstattung“ mit diesem Zertifikat ausgezeichnet. Das bedeutet, dass alle Materialien eines derartig zertifizierten Produkts als Nährstoff gelten und einem geschlossenen biologischen oder technischen Kreislauf zugeordnet sind. [138]

Für alle Gebäudezertifizierungssysteme gilt: Während Recyclingaspekte umfassend qualitativ abgebildet werden, erfolgt gegenwärtig keine quantitative Bewertung von Kreislaufpotenzialen. Zwar werden entsprechende Potenziale in Bezug auf Recycling in der Ökobilanz wiedergegeben, allerdings nur unzureichend. Auch die wirtschaftliche Relevanz des Recyclings wird aktuell vernachlässigt. Rückbau- und Entsorgungskosten bleiben aufgrund ihres geringen Anteils an den Gesamtlebenszykluskosten oft unberücksichtigt. [139] In Anbetracht der steigenden Ressourcenknappheit sind diese Praktiken zu überdenken. Um die komplexen Zusammenhänge einer kreislauffähigen Architektur vollumfänglich messen zu können, reicht eine auf konstruktive und stoffliche Ebene beschränkte Gebäudebewertung nicht aus. Als zusätzlicher Parameter sollte auch die Umbaubarkeit oder Nutzungsflexibilität in die Bewertung von Bauwerken miteinfließen.

2.4 Schlussfolgerung

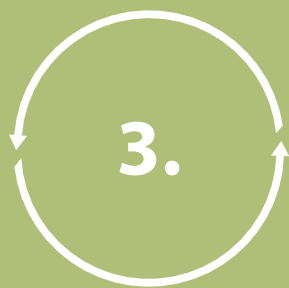
Trotz der sich spürbar verschlimmernden Umweltereignisse, welche in direktem Zusammenhang mit dem Zeitalter des Anthropozän stehen, kann gegenwärtig eine nur sehr geringfügige Anpassung der Architektur an die damit verbundenen Herausforderungen festgestellt werden.

Ein kritischer Blick auf die gegenwärtige Baupraxis zeigt, dass im Umgang mit Ressourcen nach wie vor linearwirtschaftliche Denk- und Verhaltensmuster erkennbar sind. Es kommen überwiegend Materialien zum Einsatz, die am Ende ihrer Nutzungsdauer entweder zu Abfall werden oder bestenfalls einem Downcycling zugeführt werden. Das Potenzial zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Gebäudebeständen ist bei weitem nicht ausgeschöpft. Dieses Potenzial wird durch die heute gängigen Konstruktionsmethoden weitgehend eingeschränkt und verringert.

Mangelnde Nutzungsplanung führt oft zu verkürzten Nutzungsdauern von Gebäuden und in Folge zu deren vorzeitigen Rückbau. Derzeit angewandte Rückbau- und Abbruchverfahren orientieren sich nur unzureichend an den Verwertungsmöglichkeiten der Materialien bzw. an deren Bereitstellung als Sekundärrohstoff. Die Neuerrichtung von Gebäuden findet überwiegend auf sehr CO₂-intensive Weise statt, wodurch sich der anthropogene Klimawandel verstärkt. Obwohl rechtliche Rahmenbedingungen für ein umwelt- und ressourcenschonendes Bauen gegeben sind, werden sie noch nicht flächendeckend umgesetzt.

Um all diese Aspekte in Zukunft bewertbar zu machen, erfordern auch Gebäude-Zertifizierungssysteme verbesserte Kriterien mit kreislaufwirtschaftlichen Schwerpunkten. Dabei sollte, neben den Konstruktionen selbst und den dabei verwendeten Materialien, auch die Nutzungsdauer der Gebäude berücksichtigt werden.

Keine andere Branche erzeugt so enorme Stoffströme wie die Bauwirtschaft. Umso wichtiger ist es diese Materialströme in geschlossenen Kreisläufen zu führen und eine neue verantwortungsvolle Architekturhaltung einzunehmen. Erste Tendenzen der Abkehr von der Linear- in Richtung Kreislaufwirtschaft sind bereits erkennbar. Das erforderliche Know-How ist in vielerlei Hinsicht bereits vorhanden und muss aktiv umgesetzt werden, um Ressourcen zu schonen, Abfall zu vermeiden und einen positiven Beitrag für Umwelt und Klima zu leisten.



3.

Kreislaufwirtschaft im Bauen

3.1 Begriffsbestimmungen

3.1.1 Kreislaufwirtschaft

3.1.2 End-of-Life-Potenziale

3.2 Kreislaufpotenziale als neue Parameter in der Architektur

3. Kreislaufwirtschaft im Bauen

Im vergangenen Jahrhundert ist die menschliche Bautätigkeit, bedingt durch die steigende Bevölkerungszahl sowie Wirtschaftswachstum, exponentiell gewachsen. Gleichzeitig sind die Anforderungen an Baustoffe und die Gebäudeperformance rasant gestiegen. Heute sehen sich die Architekten und Planer mit einer Vielzahl an hochtechnisierten Industrieprodukten konfrontiert, deren stoffliche Zusammensetzung kaum zu überblicken ist. Genauso unüberschaubar ist der *ökologische Fußabdruck*¹ geworden, der durch die florierende Bauwirtschaft hinterlassen wird.

Seit der industriellen Revolution sind technischer Fortschritt und stetiges Wachstum die Grundlage für einen funktionierenden Kapitalismus. Die Tatsache, dass eine Vielzahl der Ressourcen des Planeten begrenzt sind, blieb dabei weitgehend unberücksichtigt. Die Folge ist eine Produktionsweise, welche vor allem in den industrialisierten Staaten einen nicht-nachhaltigen Ressourcenverbrauch mit sich bringt. So verbrauchen die mitteleuropäischen Länder in einem Ausmaß, das dreimal höher als die tatsächliche Kapazität der Erde ist. Für die USA beträgt der Verbrauch sogar das Fünffache dessen, was gerade noch als nachhaltig zu bezeichnen wäre. [140]

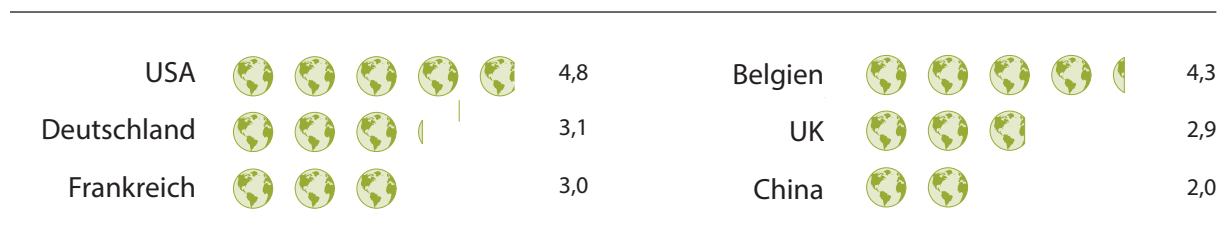


Abb.22: National Footprint Accounts 2016 des Global Footprint networks

Der globale Verbrauch natürlicher Ressourcen und die zugleich beschränkte Kapazität der Erde menschliche Abfallprodukte aufzunehmen, sind zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts geworden. In den vergangenen Jahren wurden vielfältige Lösungsansätze für die Bewältigung dieser Probleme hervorgebracht. Ein vielversprechender Ansatz ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft. Mittlerweile sind zahlreiche nationale, regionale und internationale Strategien um den Übergang von der Linear- zur Kreislaufwirtschaft bemüht.

Die Bauwirtschaft kann ein entscheidender Fixpunkt sein. Das Bauen gilt nicht nur als beschäftigungsintensivste Branche, sondern bezieht zugleich im Input 70 Prozent aller Rohstoffe des jährlichen Stoffstroms. Darüber hinaus ist die Baubranche im Output für mehr als zwei Drittel des Abfallaufkommens verantwort-

¹ Nachhaltigkeitsindikator für die biologisch produktive Fläche auf der Erde die erforderlich ist, um den Lebensstandard eines Menschen auf Dauer zu ermöglichen

lich. [141] Beträchtliche Mengen des atmosphärischen CO₂-Gehaltes sind der Bauwirtschaft anzulasten. Umweltorganisationen warnen schon lange vor der Gefährdung unseres Ökosystems durch zunehmenden Ressourcenraubbau und Umweltverschmutzungen.

Bildet das Bauen also den Fixpunkt, dann kann die Kreislaufwirtschaft als Hebel begriffen werden. Geschlossene Kreisläufe sind der Schlüssel zum klima- und ressourcenschonenden Bauen. Dem Circularity Gap Report von 2018 zufolge sind aber nur 9,1 Prozent der Weltwirtschaft zirkulär. [142] Ähnlich ernüchternd ist das Ergebnis geschlossener Kreisläufe im Bauwesen.

Wie eine Kreislaufwirtschaft funktioniert und welche Strategien zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung besonders wirksam sind wird im Folgenden erläutert.

3.1 Begriffsbestimmungen

3.1.1 Kreislaufwirtschaft

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, dass Rohstoffe am Ende ihrer Nutzungsdauer wiederverwendet oder recycelt werden. Somit werden – im Unterschied zum gegenwärtigen Wirtschaftssystem, welches von der Linearwirtschaft dominiert ist – Abfälle vermieden und Ressourcen geschont. Zirkuläres Wirtschaften beginnt bereits beim intelligenten Design von Produkten und Werkstoffen, die am Ende ihres Lebenszyklus möglichst vollständig verwertet und deren Bestandteile als Sekundärrohstoffe zurückgewonnen werden können.

Ein solches Designkonzept wurde bereits in den 1990er Jahren vom US-amerikanischen Architekten und Designer William McDonough und vom deutschen Chemiker Michael Braungart entwickelt. Das sogenannte *Cradle-to-Cradle-Prinzip* (auch „C2C“ oder „von der Wiege bis zur Wiege“) hat die Natur zum Vorbild und beschreibt eine potentiell unendliche Zirkulation von Materialien und Nährstoffen. Das C2C-Konzept gilt als *ökoeffektiv* und unterscheidet sich somit vom herkömmlichen Recycling und vom Konzept der Ökoeffizienz. Nach Braungart und McDonough sind Produkte dann *ökoeffektiv*, wenn sie entweder als biologische Nährstoffe in biologischen Kreisläufen zurückgeführt oder als technische Nährstoffe kontinuierlich in technischen Kreisläufen geführt werden können. [143]

Biotischer Kreislauf

Im biotischen Kreislauf zirkulieren Verbrauchsgüter, meist biotische Materialien, seltener mineralische Stoffe, die nach ihrem Gebrauch in Kompostierungsanla-

gen verrotten. Dabei entstehen Kompost oder andere Nährstoffe, die auf diese Weise zur „Nahrung“ für ein neues Produkt werden. [144] Dieser Kreislauf lässt sich grundsätzlich als geschlossen betrachten.

Technischer Kreislauf

Im technischen Kreislauf werden Gebrauchsmaterialien einer technisch-industriellen Aufbereitung zugeführt. Von einem geschlossenen Kreislauf ist dann die Rede, wenn die im Verwertungsprozess entstehenden Sekundärrohstoffe die gleiche Qualität wie die Primärrohstoffe aufweisen. Im Gegensatz zum biotischen Verwertungskreislauf muss für jede Art der Verwertung innerhalb des technischen Kreislaufes Energie aufgewendet werden. Priorität hat daher, im Sinne des nachhaltigen Ressourcenschutzes, der Verzicht – die Minimierung des totalen Materialeinsatzes. [145]

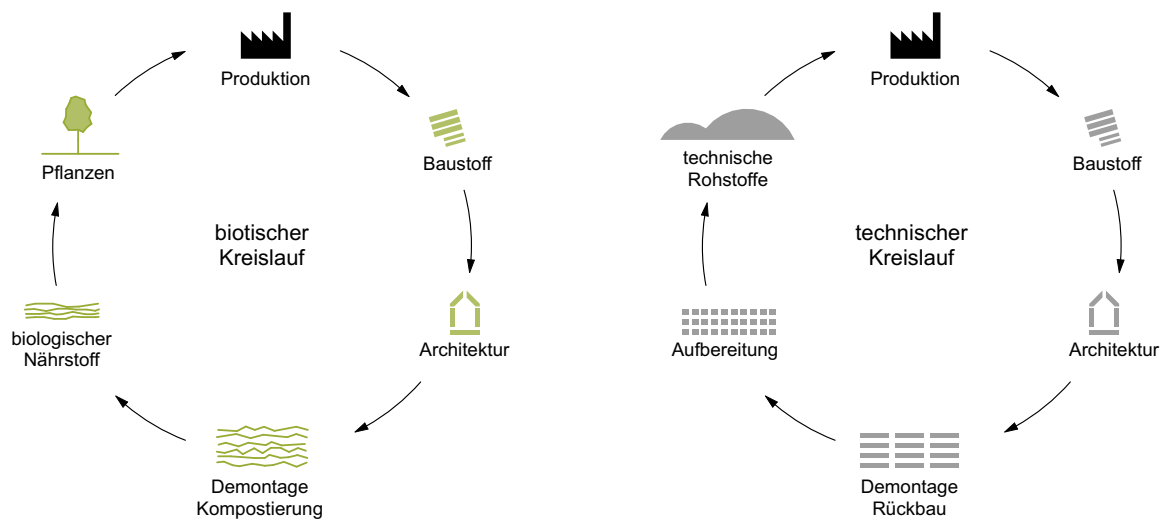


Abb.23: biotischer und technischer Verwertungskreislauf im Bauwesen in Anlehnung an die C2C-Strategie

3.1.2 End-of-Life Potenziale

Entscheidend für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft ist das Nachnutzungspotenzial von Produkten und Materialien am Ende ihres Lebenszyklus. Demnach sind folgende vier Strategien, nach ihrer Wirksamkeit gereiht, besonders geeignet um Ressourcen zu schonen und Abfall zu vermeiden: [146]

- Verzicht
- Wiederverwendung / Re-Use
- Wiederverwertung / Recycling
- nur eingeschränkte Weiterverwendung und Weiterverwertung / Further Use und Downcycling

Sowohl für den biotischen als auch den technischen Verwertungskreislauf gilt: Recycling auf gleicher Qualitätsstufe ist nur dann möglich, wenn die Altstoffe in sortenreinem Zustand vorliegen.

Die restlichen, in der EU-Abfallrahmenrichtlinie definierten, Entsorgungswege passen nicht in das Konzept einer Kreislaufwirtschaft:

- sonstige Verwertung (energetische Verwertung / Verbrennung)
- Beseitigung



Wiederverwendung / Re-Use

Wird ein Bauteil oder Bauprodukt mit seinem ursprünglichen Zweck an einer anderen Stelle erneut eingesetzt, spricht man von Wiederverwendung bzw. Re-Use. Ein solches End-of-Life-Potenzial weisen vor allem Baustoffe auf, die langlebig, modular oder großformatig sind und/oder für die ein Markt vorhanden ist. Das können zum Beispiel hochwertige Hölzer, Bodenbeläge (modulare Doppelbodensysteme), Naturstein- und Glasplatten oder Klinker sein.



Wiederverwertung / Recycling

Beim Recycling werden Abfallprodukte oder Altstoffe aus der ursprünglichen Produktgestalt aufgelöst und in einem nahezu geschlossenen Verwertungskreislauf zu Werkstoffen aufbereitet, die als Ausgangsstoffe für neue Produkte auf gleicher Qualitätsstufe eingesetzt werden. Dafür kommen insbesondere Closed-Loop-Materialien, also Materialien die in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden können, in Frage. Solche Materialien sind beispielsweise Metalle, aber auch biotische und mineralische Stoffe wie Kork oder Lehm.



Weiterverwendung / Further Use

Besteht die Möglichkeit einen Altstoff oder ein gebrauchtes Bauprodukt ein weiteres Mal zu verwenden, allerdings nicht für den ursprünglichen Zweck, handelt es sich um Weiterverwendung bzw. Further Use. Alle Bauteile, die als Re-Use-fähig gelten, können ohne Weiteres auch für einen anderen Zweck weiterverwendet werden. Eine Verwendung auf geringerer Qualitätsstufe ist dabei nicht ausgeschlossen.



Weiterverwertung / Downcycling

Unter Downcycling versteht man einen Verwertungsprozess, bei dem ein End-

produkt mit geringerer Qualität und Funktionalität, gegenüber dem Originalmaterial, entsteht. Zum Qualitätsverlust kommt es häufig durch die Ansammlung von Fremdelementen in Altstoffen oder Bauteilen. Eine hochwertige Anwendung (=Recycling) wird dadurch in den meisten Fällen ausgeschlossen. Dieses End-of-Life-Potenzial weisen zum Beispiel Betonbaustoffe, stofflich verwertbare Althölzer, oder sortenreine Kunststoffe auf.



Herstellerrücknahme

Neben den üblichen Nachnutzungspotenzialen besteht die Möglichkeit, dass Produkte oder Materialien nach ihrer Nutzung durch den Hersteller wieder zurückgenommen und in einem geschlossenen Produktionskreislauf recycelt werden.



Kompostierung

Naturbelassene Baustoffe können in Kompostierungsanlagen kompostiert und in den biotischen Kreislauf zurückgeführt werden. Die Kompostierung zählt heute noch nicht zu den gängigen Verwertungswegen, wird aber in Zukunft an Bedeutung zunehmen. [147]



Energetische Verwertung

Kommt keine der oben genannten stofflichen Verwertungsmöglichkeiten in Frage, werden Bauabfälle energetisch verwertet. In diesem Fall werden Altstoffe in dafür vorgesehenen Anlagen (z.B. Müllverbrennungsanlagen) verbrannt und in Energie umgewandelt. Eine energetische Verwertung kommt zum Beispiel bei Kunststoffen (Polystyrol), der Witterung ausgesetzten Hölzern und Holzwerkstoffen oder in geringen Mengen anfallenden Baustoffen (Klebebänder, Dübel, Silikon, Abdichtungsbahnen) vor. [148]



Beseitigung / Deponierung

Als letzte abfallwirtschaftliche Maßnahme erfolgt die Beseitigung von Abfällen auf Deponien. Wenn eine umweltschonende Verwertung der Materialien nicht mehr möglich ist, werden die Abfälle endgültig abgelagert. Je nach Schadstoffgehalt der Abfälle erfolgt deren Beseitigung in Österreich gemäß Deponieverordnung (DVO 2008; BGBl. II Nr. 39/2008) in unterschiedlichen Deponieklassen. [149]

3.2 Kreislaufpotenziale als neue Parameter in der Architektur

In Anbetracht der globalen Ressourcenproblematik und der Tatsache, dass die Bauwirtschaft ein fundamentaler Mitverursacher ist, ist ein Paradigmenwechsel in Architektur und Bauwesen dringend erforderlich. Die Kreislauffähigkeit von Bauwerken muss als Entwurfsparameter in der Architektur verstanden werden. Die Berücksichtigung von Kreislaufpotenzialen im Entwurf erfordert neue, quantitative Bewertungsmaßstäbe um die Ressourceneffizienz von Gebäuden und Baukonstruktionen messbar zu machen. Eine rein qualitative Bewertung von Recycling- und Kreislaufaspekten, wie es bislang in den meisten Bewertungssystemen der Fall ist, reicht nicht aus.

Für eine quantitative Bewertung sind folgende drei Faktoren maßgebend:

- technisches bzw. biologisches Recyclingpotenzial der Materialien
- der Wert der rückgewonnenen Stoffe
- der Aufwand für den verwertungsorientierten Rückbau

Demnach kann das Kreislaufpotenzial einer Konstruktion wie folgt definiert werden:

„Das Kreislaufpotenzial einer Konstruktion prognostiziert den Anteil an Materialien und Baustoffen, die unter Berücksichtigung ihres Werts und der Lösbarkeit der Fügung am Ende der Nutzungsdauer in einen mehr oder weniger geschlossenen Materialkreislauf zurückgeführt werden können.“ [150]

„Mehr oder weniger geschlossener Materialkreislauf“ bedeutet hierbei, dass sich grundsätzlich zwei Kreislaufpotenziale voneinander unterscheiden lassen:

Closed-Loop-Potenzial: Das Closed-Loop-Potenzial beschreibt die Fähigkeit der Baustoffe bzw. Materialien einer Konstruktion, ohne Qualitätsverlust in geschlossenen Kreisläufen geführt zu werden.

Loop-Potenzial: Ein Loop-Potenzial weisen all jene Materialien und Baustoffe auf, die eine stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (Downcycling) ermöglichen oder zumindest energetisch verwertet werden können. [151]

Neben ökologischen Aspekten stellt sich vor allem auch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit. Eine Verwertung auf hohem Qualitätsniveau kann marktwirtschaftlichen Gesetzen zufolge nur dann erfolgen, wenn dieses End-of-Life-Szenario auch entsprechend wirtschaftlich ist. Ausschlaggebend dafür ist, in welchem Verhältnis der Wert der rückgewonnenen Stoffe zum Rückbauaufwand steht. Der Wert eines Materials errechnet sich aus den Verwertungserlösen einerseits und den Entsorgungskosten andererseits. Der Aufwand für den verwer-

tungsorientierten Rückbau wird, abgesehen von baustellenbedingten Faktoren, überwiegend vom Personal- und Maschineneinsatz bestimmt. [152]

An der Bergischen Universität Wuppertal wird derzeit eine Systematik zur quantitativen Ermittlung der Kreislaufpotenziale erprobt und entwickelt. Die Berechnungsmethode stützt sich dabei auf die oben genannten Faktoren und berücksichtigt somit materialtechnische, aber auch ökonomische Aspekte. Unter anderem wurde von der Universität untersucht, inwiefern der Rückbauaufwand einer Konstruktion gemessen werden kann. Zu diesem Zweck wurden, in Kooperation mit Ausbildungsstätten und Herstellern, diverse Fassaden- und Dachaufbauten konstruiert und anschließend rückgebaut. Um eine einfache und schnelle Demontage zu ermöglichen, wurden für die Konstruktionen nach Möglichkeit lösbare Materialverbindungen verwendet. Lösbare Verbindungen minimieren nicht nur den physischen Rückbauaufwand, sondern stellen auch eine hohe Sortenreinheit nach dem Rückbau sicher.

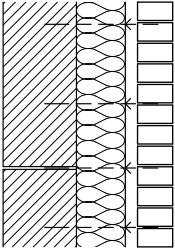
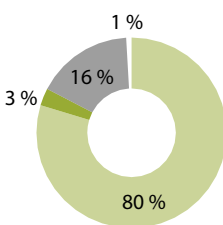
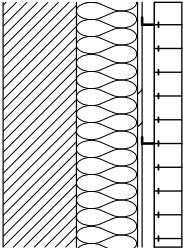
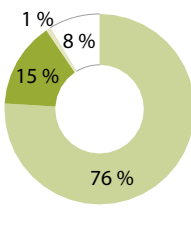
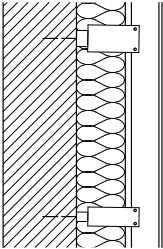
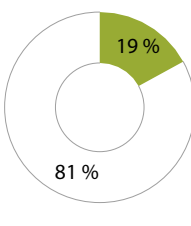
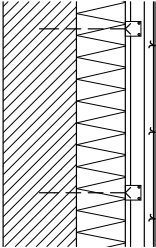
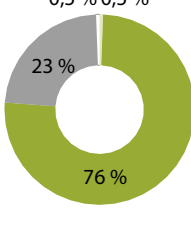
Eine Auswahl aus dieser Versuchsreihe wird nachstehend abgebildet und zeigt wichtige Aspekte zur Wirtschaftlichkeit des verwertungsorientierten Rückbaus auf. Die hier dargestellte Auswahl beschränkt sich auf Wand- bzw. Fassadenkonstruktionen. Im Fokus der Untersuchung steht hierbei die Fassadenbekleidung, nicht das tragende Bauteil. [153]

Aus der Übersicht geht hervor, dass die gezeigten Konstruktionen größtenteils kreislauffähig bzw. für recyclinggerechtes Bauen gut geeignet sind. Mit diesem Bewertungsschema gelingt es der Bergischen Universität Wuppertal die Kreislaufpotenziale sowohl auf konstruktiver als auch auf stofflicher Ebene zu messen. Das Potenzial der Konstruktion wird anhand der Parameter Demontageaufwand und Verwertungserlöse bzw. Entsorgungskosten dargestellt, während das Materialrecycling die Konstruktion auf stofflicher Ebene bewertet.

Ökonomisch vertretbar ist ein hoher Aufwand für die Demontage nur dann, wenn dabei Erlöse generiert oder Entsorgungskosten gespart werden. Verwertungserlöse können in der Regel nur mit Wertstoffen erzielt werden. Ein Abfallstoff bringt dann Erlöse ein, wenn dafür ein Markt existiert, wie zum Beispiel für Metallschrotte oder hochwertige Klinker. [154]

Fassadenart:

- A Vormauerschale an massiver Außenwand
B Vorhangfassade an massiver Außenwand
C WDVS an Außenwand aus Porenbeton
D Holzbekleidung an Außenwand in Holzständerbauweise

Nr.	Konstruktion	Aufbau	Wandstärke [mm]	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m ² K]	Personenaufwand Demontage [Min./m ²]	Energieaufwand Demontage [MJ/m ²]	Verwertungserlöse (+) Entsorgungskosten (-) [€/m ²]	Material-Loop-Potenzial
A01		240 mm Außenwand massiv, 160 mm Mineralwolle, verdübelt 40 mm Luftschicht 115 mm Wasserstrichklinker auf Edelstahlkonsole je zur Hälfte mit Kalkmörtel und Kalkzementmörtel	555	0,20	50,7	0,21	+35,8	
A02		240 mm Außenwand massiv, 200 mm Hanfdämmung geklemmt zwischen Holzleiterträgern 15 mm MDF-Platte 40 mm Luftschicht 90 mm Ziegel im Trockenstapelsystem	585	0,20	13,6	0,13	-0,76	
B01		240 mm Außenwand massiv, 160 mm Mineralwolle, verdübelt 12 mm Faserzement verklebt auf Aluminium-Unterkonstruktion an Gleitpunktschwert	485	0,20	8,5	0,10	-1,20	
B02		240 mm Außenwand massiv, 160 mm Schaumglas auf Krallenplatten 1 mm Aluminiumblechkassetten an Rasterklickschiene, Aluminium-Unterkonstruktion an Edelstahlkonsole	530	0,20	20,2	0,21	+4,07	

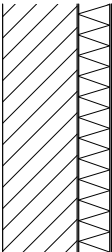
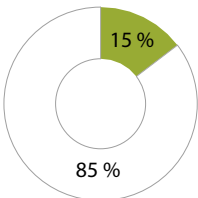
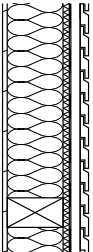
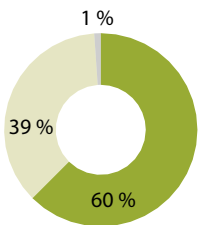
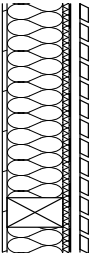
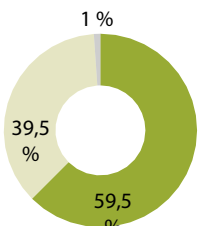
Nr.	Konstruktion	Aufbau	Wandstärke [mm]	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m ² K]	Personenaufwand Demontage [Min./m ²]	Energieaufwand Demontage [MJ/m ²]	Verwertungserlöse (+) Entsorgungskosten (-) [€/m ²]	Material-Loop-Potenzial
C01		240 mm Porenbeton 5 mm Leichtmörtel 100 mm Mineraldämmplatte 5 mm Leichtmörtel mit Glasfaserarmierung 2 mm Oberputz aus Leichtmörtel	352	0,19	0,6	0,09	-1,86	 85 % 15 %
D01		15 mm OSB-Platte 180 mm KVH mit flexibler Holzfaserdämmung 20 mm Holzweichfaserplatte 0,5 mm PP-Vlies mit TEEE-Membran, getackert 30 mm Lattung Fichte 27 mm Schalung Lärche	273	0,21	11,4	0,15	-0,93	 60 % 39 % 1 %
D02		15 mm OSB-Platte 180 mm KVH mit flexibler Holzfaserdämmung 20 mm Holzweichfaserplatte 0,5 mm PP-Vlies mit TEEE-Membran, getackert 30 mm Lattung Fichte 30 mm Rhombusleisten	273	0,21	12,2	0,17	-0,92	 59,5 % 39,5 % 1 %

Abb.24: Übersicht der ausgewählten Wandaufbauten und deren Kreislaufpotenziale



4.

Architektur- kreisläufe

4.1 Städtebauliche Ebene

4.1.1 Schutzgut Boden

4.1.2 Regenwassermanagement

4.1.3 Ökonomie des Teilens

4.2 Bauwerksebene

4.2.1 Anpassungsfähiges Bauen

4.2.2 Ephemeres Bauen

4.3 Gebaute Beispiele

4. Architekturkreisläufe

Der Wertewandel einer *Circular Architecture* beruht auf kreislaufwirtschaftlicher Planung über den gesamten Lebenszyklus und umfasst sowohl die städtebauliche als auch die Bauwerksebene. In diesem Sinne müssen Städte und Gebäude als Rohstoffzwischenlager begriffen, genutzt und als solches zukünftig geplant werden. Eine kreislaufwirtschaftliche Planung verringert nicht nur den Primärrohstoffverbrauch, sondern schützt vor allem auch die natürlichen Lebensgrundlagen Boden, Luft und Wasser.

4.1 Städtebauliche Ebene

Der erste Schritt zur Ressourcenschonung ist die Nachnutzung von Flächen und Gebäudebeständen. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft hat eine Weiternutzung jedenfalls Vorrang vor der Bebauung neuer Gebiete. Städtebauliche Strategien hierfür sind zum Beispiel die Nachverdichtung urbaner Räume oder das Brachflächenrecycling.

Durch die Nachverdichtung verzichtet man auf die, nach außen gerichtete, Inanspruchnahme bisher unbebauter Flächen und somit auf den Ressourcenaufwand für die Konstruktion neuer Infrastrukturen. Die Innenentwicklung urbaner Räume erfolgt in Form von Aufstockungen, Baulückenschließungen, Nachverdichtung von überdimensionierten Abstandsflächen oder innerhalb von Blockrandbebauungen. [155] Für alle Formen der Verdichtung gilt es, im Interesse der Nachhaltigkeit, dem Klimawandel oder seinen Auswirkungen durch entsprechende Maßnahmen entgegenzuwirken.

Brachflächen und Bestandsbauten können zunächst auf ihre Nachnutzungspotenziale überprüft werden. Die Revitalisierung der Baulichkeiten im Sinne eines Re-Use steht dabei an erster Stelle. Wenn diese Möglichkeit nicht besteht, ist eine Kernsanierung anzustreben, bei der das Tragwerk des Gebäudes weitergenutzt wird. Dabei werden die restlichen Materialien demontiert und mögliche Schadstoffe entfernt. In den meisten Fällen sind die Altbestände jedoch technisch und/oder energetisch nicht mehr leistungsfähig und werden abgebrochen. Unter diesen Umständen kann das sogenannte Haus-im-Haus-Konzept angewendet werden, um einen Abbruch zu vermeiden. [156] Große ungedämmte Bestandshallen können durch dieses Konzept erhalten werden. Umgesetzt wurde diese Art der Nachnutzung beispielsweise bei der Technischen Fachhochschule in Wildau, Deutschland.

HÖRSAAL UND LABORGEBÄUDE HALLE 14 TECHNISCHE FACHHOCHSCHULE WILDAU

WILDAU, DEUTSCHLAND

ANDERHALTEN ARCHITEKTEN

2007

Die gründerzeitliche Produktionshalle des ehemaligen Betriebsgeländes der Schwartzkopff-Werke wurde im Zuge der Errichtung eines neuen Campus revitalisiert. Unabhängig von der Hallenkonstruktion wurden Hörsäle, Seminar- und Laborräume in die leere Montagehalle eingefügt. Um den ästhetischen Charakter der Werkhalle beizubehalten, wurden die Einbauten mit transparenten Hüllen versehen. [157]

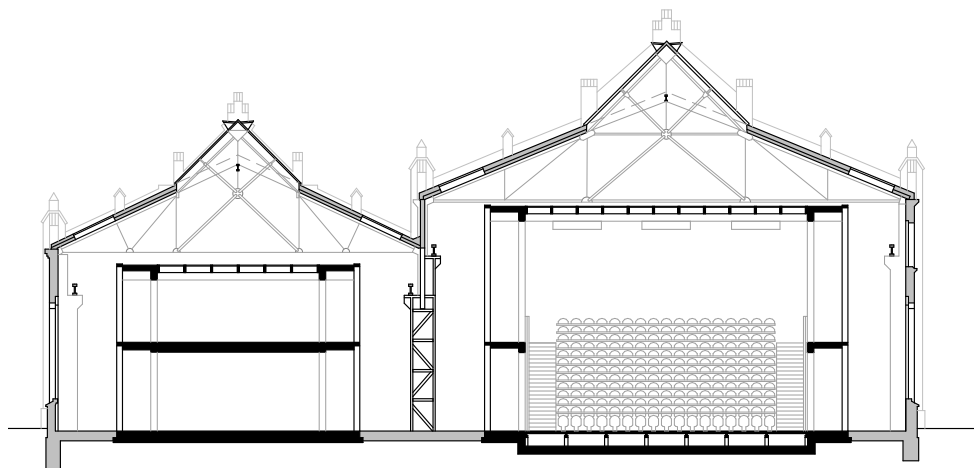


Abb.25: Schnitt durch den Hörsaal und Laborgebäude Halle 14, Technische FH Wildau



Abb.26: Innenraumansicht Halle 14, Technische FH Wildau

4.1.1 Schutzgut Boden

Die Umwandlung bisher baulich ungenutzter Flächen in Bauland wird sich langfristig auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft gefährdend auswirken. Der Boden ist eine endliche Ressource, deren Bodenorganismen einen wichtigen Bestandteil des Ökosystems bilden und dementsprechend geschützt werden müssen. In Österreich werden täglich mehr als 10 ha Flächen verbaut. [158] Die Neubildung von einem Zentimeter Boden dauert durchschnittlich 100 Jahre, womit der gegenwärtige Flächenverbrauch sehr weit über eine nachhaltige Nutzung hinausgeht [159] Der Verzicht stellt dabei den maximalen Ressourcenschutz dar. Dies kann etwa durch Einsparung der Unterkellerung von neu erschlossenen Flächen oder den Einsatz bodenschonender Gründungskonstruktionen (s. Kapitel Lösbare Verbindungen, S. 95-96) bewerkstelligt werden.

4.1.2 Regenwassermanagement

In Bezug auf die zunehmenden klimatischen Veränderungen ist ein Umdenken der innerstädtischen Planung von versiegelten Flächen erforderlich. Das Konzept einer Schwammstadt führt zum verbesserten Umgang mit Niederschlagswasser im urbanen Raum. Es vereint unterschiedliche Methoden um Regenwasser lokal halten und zeitlich versetzt abgeben zu können. Konkret wird hierbei die Versickerungsfähigkeit und Wasserspeicherkapazität von Dachbegrünungen und Bodenbelägen im Außenraum optimiert. Dies kann beispielsweise durch das Zuführen von Ziegelsplitt im Erdaushub und dessen Wiedereinbringung, intensive Begrünung von Dächern oder das Anlegen von Schotter-schichten unter Baumscheiben (*Structural Soil*) erfolgen.

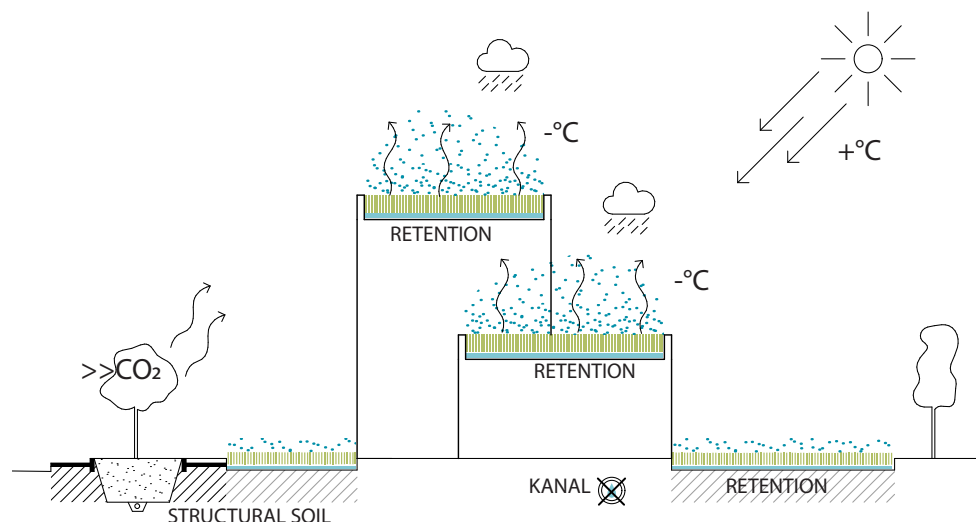


Abb.27: Prinzipskizze Schwammstadt / nachhaltiges Regenwassermanagement

Durch Regenwassermanagement vor Ort kann auf eine konventionelle Entwässerung verzichtet werden. Das Kanalnetz wird dadurch entlastet und durch das Wegfallen von Kanalinfrastruktur werden zugleich ökonomische Einsparungspotentiale genutzt. Die sukzessive Verdunstung des oberflächlich angereicherten Regenwassers trägt zusätzlich zu einem kühleren Mikroklima bei und kann somit der Entwicklung städtischer Hitzeinseln entgegenwirken. Auch längere Trockenzeiten können somit lokal vermieden werden. [160] Der Kreislaufgedanke wird insbesondere durch Substrate aus wiederverwendetem Abbruchmaterial unterstützt. Dazu wird das Sekundärmaterial mit diversen Zuschlagstoffen nach entsprechenden Mischungsverhältnissen ergänzt und aufbereitet. Ziegelsplitt eignet sich beispielsweise als Zuschlagstoff in Dachsubstraten, während Betonabbruch für die Herstellung des sogenannten Structural Soil verwendet werden kann. Diese On-Site-Substrate gewährleisten eine nachhaltige Nutzung von Regenwasser und sparen zugleich Ressourcen.

4.1.3 Ökonomie des Teilens

Das Konsumverhalten der digitalisierten Gesellschaft orientiert sich in den letzten Jahren vermehrt an der Idee „*teilen statt besitzen*“. Jüngsten Entwicklungen zufolge gewinnt die temporäre Nutzung oder das Teilen von Gebrauchsgütern für die Konsumgesellschaft an Attraktivität. [161] Befürworter der neuen Verbrauchskultur sehen darin hohes Potenzial für Ressourceneinsparung und Umweltentlastung, bei gleichzeitiger Vernetzung der Menschen auf sozialer Ebene. Während Konsumkritiker keinen nachhaltigen Zusammenhang sehen, sondern eher eine „...*Stimulierung von multioptionalem Konsum für jedermann zu jeder Zeit an jedem Ort.*“ beschreiben. [162] Bezogen auf die Architektur kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Suffizienz die sicherste Methode zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung ist. Die sogenannte *Sharing Economy* nimmt daher auch in der Planungsphilosophie an Bedeutung zu. *Shared Space* Konzepte zielen auf eine Reduktion von Flächen für Einzelpersonen, bei gleichzeitiger Maximierung von Gemeinschaftsflächen, ab. Die durchschnittliche Wohnfläche pro Person in Österreich liegt mittlerweile bei 45,2 Quadratmetern und ist im Vergleich zu 2008 um sechs Prozent gewachsen. [163] Ein steigender Flächenverbrauch pro Kopf steht, im Hinblick auf die Ressourceneffizienz, einer nachhaltigen Entwicklung entgegen.

Kaum genutzte Stauraumflächen in Kellergeschossen können mithilfe von Space Sharing optimiert, oder sogar zur Gänze weggelassen werden. Auch auf Tiefgaragen kann verzichtet werden, wenn am Standort eine gute Anbindung an das öffentliche Verkehrsnetz besteht, oder ausreichend Shared-Mobility-Angebote zur Verfügung stehen. Das Schaffen intelligenter Konzepte zur Mehrfachnut-

zung von Flächen und zur Vermeidung temporärer Leerstände im Tagesverlauf wird künftig zur wesentlichen planerischen Herausforderung. Der durchschnittliche Leerstand eines Bürogebäudes liegt bei 60 Prozent der Zeit eines gewöhnlichen Arbeitstages. ¹Das Konzept des *Co-Working-Space* und andere innovative Plattformen können in Zukunft dazu beitragen, verfügbare Flächen besser zu nutzen. Dabei werden Arbeitsplätze für Freiberufler oder Start-ups entweder in aktiven Bürogebäuden außerhalb der Bürozeiten oder in leerstehenden Gewerbeobjekten (z.B. in Form einer offenen Bürostruktur) eingerichtet und zur Verfügung gestellt. [164]

4.2 Bauwerksebene

Wie Gebäude künftig konkret gebaut werden müssen, kann angesichts einer unklaren Zukunft nicht punktgenau benannt werden. Deshalb macht es Sinn die Architektur in veränderbaren Szenarien zu denken. „*Lasst uns so bauen, dass unsere Häuser jederzeit schadlos und mit Anstand von der Erde verschwinden oder aber auch 1000 Jahre bestehen können*“, lautet ein Satz von Werner Sobek, Präsident der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. [165] Eine solche Art des Bauens würde auf die Langlebigkeit von Gebäuden einerseits, und die Ephemisierung der Architektur andererseits, gleichermaßen abzielen. Die Grundvoraussetzung für eine möglichst lange Nutzungsdauer von Bauwerken ist ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit. Ephemere Bauten hingegen setzen einen effizienten Einsatz von Material- und Energieressourcen voraus.

4.2.1 Anpassungsfähiges Bauen

Langfristige Gebäudenutzungen sind prinzipiell erstrebenswert, weil sie auf direkte Weise Ressourcen schonen und Abfall vermeiden. Die Langlebigkeit eines Gebäudes hängt dabei stark von seiner Anpassbarkeit auf Nutzungsänderungen ab. Die Veränderbarkeit wird im Wesentlichen von der Gebäudestruktur bestimmt. Die Essenz einer anpassbaren Gebäudestruktur liegt in der Flexibilität von Grundriss und Schnitt. [166]

Ein Grundriss, der frei von tragenden Wänden ist, kann beliebig oft räumlich aufgeteilt werden. Das Reduzieren tragender Elemente auf Stützen und Träger ermöglicht eine freie Raumdefinition, sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Fläche. Diesen Vorteil sichert sich der Skelettbau gegenüber dem Massivbau und bietet dabei die gleiche Leistung bei deutlich geringerem Materialeinsatz. [167] Der Skelettbau entwickelte sich aus pragmatischen Überlegungen bereits Ende des 19. Jahrhunderts. William LeBaron Jenney entwarf den ersten reinen Skelettbau in Chicago und setzte damit neue Maßstäbe in der

¹ gemessen an einer Normalarbeitszeit von 8 Stunden/Tag.

Architektur. Durch die Trennung von tragender Konstruktion und nicht-tragenden Raumelementen konnte nicht nur schneller und rationeller gebaut, sondern auch die Raumaufteilung nachträglich an den jeweiligen Bedarf der Nutzer angepasst werden. Schon damals wurde dieser technisch-konstruktive Fortschritt sowohl für Wohnungs- als auch Gewerbebauten genutzt. Der Begriff des *freien Grundrisses* schaffte eine neue architektonische und vor allem räumliche Dimension. Das tragende Skelett bietet seither die Möglichkeit mit umbauvariablen Raumelementen oder umbaubaren Leichtbauelementen auf sich verändernde Nutzungsbedingungen zu reagieren. Der Gebrauchswert eines Gebäudes kann somit über einen längeren Zeitraum erhalten werden. [168]

Bei umfassendem Umbaubedarf kann ein Skelettbau bis auf den Rohbauzustand rückgebaut, dessen Tragstruktur erhalten und weitergenutzt werden. Somit ist das Bauwerk nicht nur flexibel in der Binnenstruktur, sondern auch nach außen erweiterbar. Daher ist es sinnvoll die Konstruktionselemente als eigenständige, voneinander unabhängige Gebäudeteile zu betrachten, die jederzeit eine Entkernung und Adaptierung des Gebäudes ermöglichen. Im übertragenen Sinne kann die Gebäudehülle einem innenliegenden Tragwerk wie ein Hut übergestülpt werden, der sich ohne weiteres wieder abnehmen lässt. Alternativ können auch die tragenden Gebäudeteile nach außen verlagert werden, was zur maximalen Flexibilität der vertikalen und horizontalen Binnenstruktur führt.

Standardisiertes Bauen birgt vor allem die Gefahr auch in der Planung den tatsächlichen Verlauf von Prozessen auf ein funktionales Schema zu reduzieren. Die Folge davon sind homogene Baustrukturen die nur noch ein Minimum an formalen Nutzungsqualitäten zulassen. Was nützlich ist, bestimmt nicht mehr der Nutzer selbst, sondern ein allgemein abstrakter Standpunkt, der primär die Interessen der Produktion und des Marktes bedient. [169] Dieses Phänomen lässt sich zum Beispiel verstärkt im sozialen Wohnbau wiederfinden. Teilweise entstanden und entstehen immer noch Standardgrundrisse, die vom überholten Idealbild einer Kleinfamilie ausgehen und kaum Handlungsspielräume zulassen. Seit der Moderne sind Architekten darum bemüht gewesen, diese Idealvorstellungen mithilfe von nachfunktionalistischen Architekturkonzepten zu überwinden. [170]

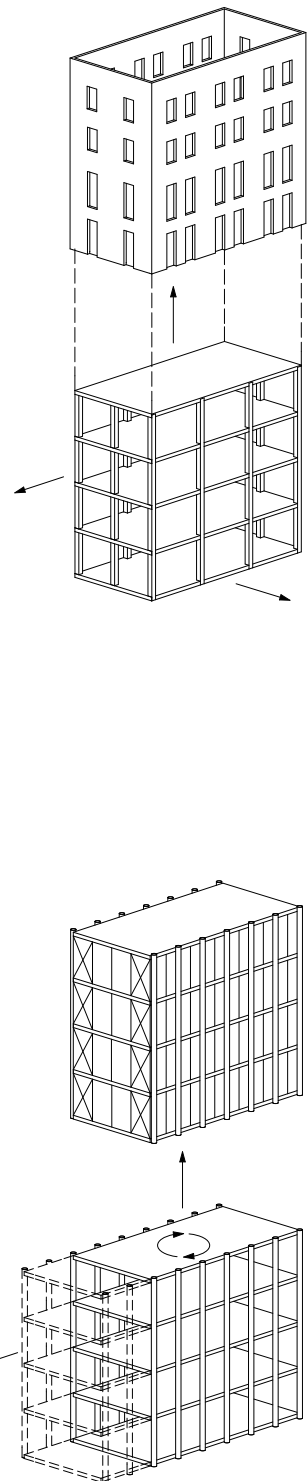


Abb.28: Prinzipskizzen flexibler/umbaubarer Strukturen

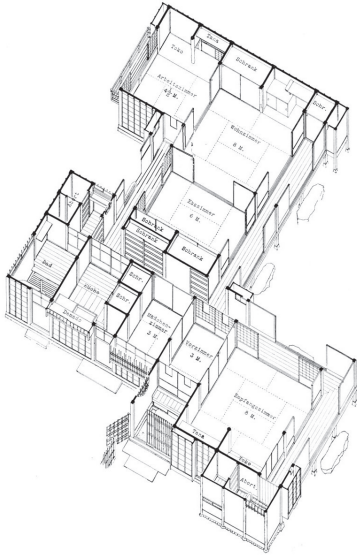


Abb.29: traditionelles japanisches Wohnhaus

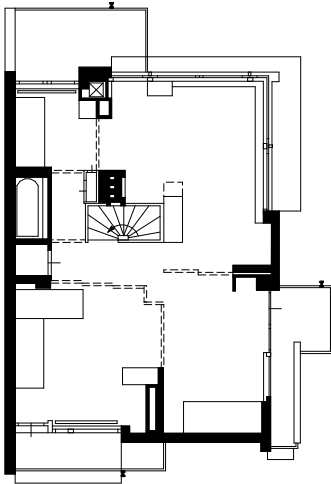


Abb.30: Schröder-Haus in Utrecht Obergeschoss mit offenen Raumteilern

Auf der Suche nach machbaren Nutzungsanpassungen und der vielschichtigen Bedeutung von Nutzungsflexibilität lohnt sich der geschichtliche Exkurs in die traditionelle Architektur des Wandels. Dabei lassen sich drei Prinzipien baulicher Strukturen festmachen, die eine Nutzungsanpassung ermöglichen:

- Flexibilität: die Veränderbarkeit der Binnenstruktur.
- Variabilität: die Veränderbarkeit der Gesamtstruktur.
- Mobilität: die Ortsgebundenheit der Struktur.

Die Darstellung dieser Strukturen erfolgt hier mit Beispielen, die überwiegend auf den Wohnbau konzentriert sind.

Flexibilität

Die Veränderbarkeit des Grundrisses bei konstanter Wohnfläche umreißt zwei Teilbereiche: Die zyklische Anpassungsfähigkeit des Grundrisses an die verschiedenen Wohnbedürfnisse bei Tag und bei Nacht (Tag-Nacht-Rhythmus) und die Anpassungsfähigkeit des Grundrisses an unterschiedliche Bewohnerbedürfnisse (Angebots- und Gebrauchsflexibilität). [171]

Ein nennenswertes Beispiel für die Tag/Nacht-Anpassung des Raumbildes ist das Japanische Wohnhaus. Sowohl Grundriss als auch Wände sind durch ein modulares Maß vereinheitlicht. Als Raumbildner dienen die sogenannten *Tatamis* (Bodenmatten) und *Fusuma* (verschiebbare Zwischenwand, beidseitig mit transluzidem Papier beklebt) und erlauben einen ständigen Wechsel der Raumzusammenhänge. [172]

1924 setzte Gerrit Rietveld dieses Konzept beim Schröder-Haus in Utrecht um. Das Obergeschoss des Hauses ist mit Schiebeelementen ausgestattet, welche separate Schlafräume bei Nacht und eine zusammengefasste Wohnzone am Tag bilden können.

Die Veränderbarkeit des Grundrisses als Angebots- und Gebrauchsflexibilität entwickelte sich aus dem Modell des Industriebaus mit seinen Prinzipien der Skelettbauweise und einer modularen Grundrissordnung. Um auch im Wohnbau eine größtmögliche Grundrissvielfalt innerhalb eines rationalisierten Bausystems zu erhalten, wurde die Idee regelmäßiger Achsabstände, durchgehender Fensterbänder und konstanter Raumhöhen übernommen. Die Grundrisseinteilung erfolgt dabei durch leichte Trennwände und erlaubt eine Anpassung an unterschiedliche Bedürfnisse. Ziel dieses Konzepts ist es nicht nur eine hohe Angebotsflexibilität zu schaffen, sondern vor allem eine nachhaltige Gebrauchsflexibilität zu ermöglichen.

Mies van der Rohe formuliert 1927 eine ähnliche Zielsetzung:

„Der Skelettbau ist hierzu das geeignetste Konstruktionssystem. Er ermöglicht eine rationelle Herstellung und läßt der inneren Raumaufteilung jede Freiheit. Beschränkt man sich darauf, lediglich Küche und Bad ihrer Installation wegen als konstante Räume auszubilden und entschließt man sich dann noch, die übrige Wohnfläche mit verstellbaren Wänden aufzuteilen, so glaube ich, daß mit diesen Mitteln jedem berechtigten Wohnanspruch genügt werden kann.“

Diesen Denkansatz setzt er erstmals in seinem Wohnblock in der Stuttgarter Weißenhofsiedlung um. Während die installationsabhängigen Räume (Küchen, Bäder und WC) an die Treppenhauswand gebunden sind, kann der Rest der Grundrissfläche frei eingeteilt werden.

Im selben Jahr stellt Adolf Rading in der Zeitschrift „Die Form“ ein Bausystem vor, welches auf einem Achsmaß von 5 m und einer Gebäudetiefe von 2 x 4,50 m beruht. Zwischen zwei Treppenhäusern können wahlweise zwei bis fünf Achsen angeordnet werden. Wie bei Mies van der Rohe befinden sich die Nassräume im Anschluss an das Treppenhaus, wodurch sich eine flexible Restflächenunterteilung ergibt. [173]

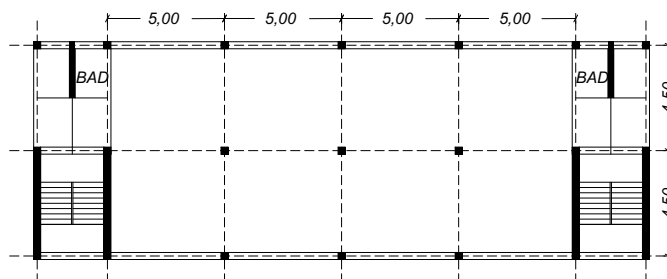


Abb.31: Bausystem mit Betonskelett, Typ C, Normalgeschoss (Adolf Rading 1927)

Variabilität

Im Gegensatz zur wohnungsinternen Anpassbarkeit wird im Fall der Variabilität die bauliche Veränderbarkeit nach außen fortgesetzt: Veränderbarkeit durch An-, Auf- oder Ausbauen. Als historischer Vorläufer für die vorausplanbare Erweiterbarkeit der baulichen Struktur gilt das amerikanische Siedlerhaus. *Salt box* war die Bezeichnung für das, aus der Notwendigkeit schnellstmöglich Notunterkünfte zu errichten, hervorgebrachte Minimalhaus. Es zeichnet sich durch seine charakteristischen Erweiterungsmöglichkeiten über Anbauten nach dem *lean-to* Prinzip aus.

1921 konzipierte der Gartenarchitekt Leberecht Migge das Modell der *Etap-*

penbauweise. Dabei werden Haus und Garten zu einem geschlossenen System des Selbstbaus und der Selbstversorgung verknüpft. Darüber hinaus nimmt Migge wesentliche Zielsetzungen eines heutigen Ökologieverständnisses um mehr als ein halbes Jahrhundert vorweg. Denn die *Etappenbauweise* Migges bezieht sich auf Aspekte des Recyclings von Baustoffen und Abfällen sowie der passiven Nutzung von natürlich vorhandenen Wärmequellen.

Die Idee des „wachsenden Hauses“ orientierte sich zehn Jahre später verstärkt an urbanen Formen des Einfamilienhauses. Mitunter war der vom Berliner Stadtbaurat Martin Wagner initiierte Wettbewerb „Das wachsende Haus“ im Jahr 1932 ein Anlass dafür. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang der Wettbewerbsbeitrag von Eiermann und Jaenecke. Diesem System liegt ein Kernhaus mit 30 Quadratmetern Wohnfläche zugrunde, welches durch drei Erweiterungsstufen in der Abfolge Aufbau-Anbau-Aufbau auf 60, 90 und 120 Quadratmeter vergrößert werden kann. Den oberen Abschluss bilden flachgeneigte Pultdächer, die in der Aufbaustufe um ein Geschoss angehoben werden und am Schluss ein Satteldach ergeben. [174]

Besonders in den Niederlanden entwickelten sich nach dem Krieg die Wachstums- und Zonungsmodelle, speziell für Reihenhäuser. Bekannt geworden ist vor allem das SAR-System², das zunächst eine Individualisierung durch Trennung des Bauvorgangs in Trägersystem (support) und Einbausystem (infill) vorsieht. [175] Das Prinzip der Grundrisszonierung bildet zugleich die Grundlage für Wachstums- und Erweiterungsmodelle. Zur Weiterentwicklung eines solchen Modells kam es im Jahr 1970 durch die Architekten De Jonge, Van Olphen und Bax für ein Projekt in Linschoten in den Niederlanden. Das Zonungsprinzip hat zunächst die Variabilität des Primärangebots zum Ziel, definiert darüber hinaus aber auch An- und Aufbaumöglichkeiten für eine spätere, stufenweise Erweiterung. Vorherbestimmte Erweiterungszonen finden sich wenige Zeit später auch bei den Reihenhäusern der Kollektivsiedlung Saettedammen in Dänemark. Hierbei werden die Haustrennwände über das für den Primärbedarf erforderliche Maß nach außen verlängert und geben somit mögliche Anbauzonen vor. [176]

Im Zusammenhang mit der Nutzungsvariabilität sind auch jene Ideen und Konzepte zu nennen, die in Form von Megastrukturen eine Art vierdimensionalen Städtebau zum Ziel haben. Die wandelbaren Großstrukturen reichen von Le Corbusiers *plan obus*, über die Metabolisten

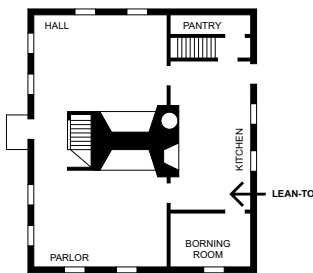


Abb.32: Neuengland/USA Siedlerhaus „Salt-box“ (ca. 1670)

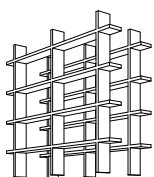
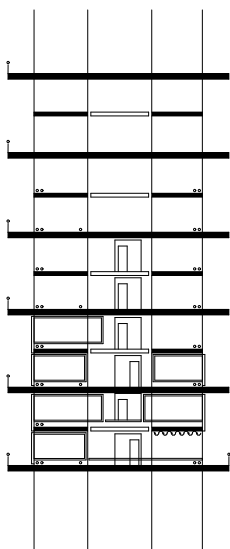


Abb.33: Support und Infill System (SAR)

² SAR: De Stichting Architecten Research, Niederlande.

in Japan bis zum Gedanken der *totalen Wohnung* von Roland Frey und Norbert Schmidt-Relenberger.

Während Le Corbusiers Masterplan einer ausbaubaren Stadt in Algier niemals Wirklichkeit wurde, galt die Veränderbarkeit von baulichen Strukturen in Japan als Regelfall. Den japanischen Metabolisten gelingt eine Synthese traditioneller und moderner Architekturtheorie, die sich auf den Shintoismus, die Lehre vom ewigen Wandel der Dinge, bezieht. [177] Im Gegensatz zu den utopischen Visionen von gigantischen Raumstädten schienen die Pläne des Architekten Frey und des Soziologen Schmidt-Relenberg realisierbar zu sein. Das Grundkonzept der totalen Wohnung sieht vor, dass die Siedlungsfirma einen mehrgeschossigen, terrassenförmig gegliederten Komplex von Bauflächen errichtet, die anschließend von „Baulustigen“ erworben und nach persönlichem Vermögen und Geschmack zu Wohnzwecken bebaut werden können. [178]

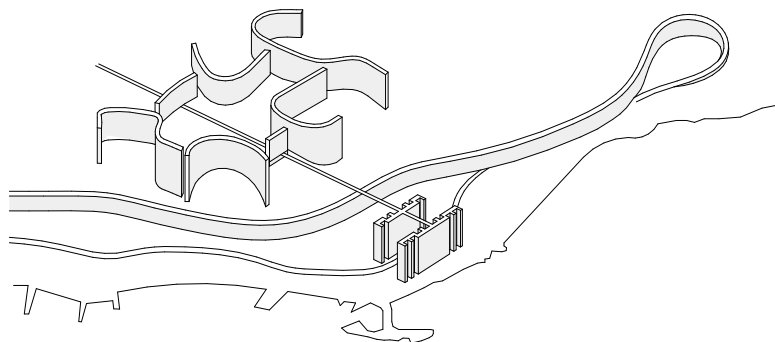


Abb.35: Algier/Algerien - Plan obus (Le Corbusier 1931)

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass sowohl die nutzungsflexiblen als auch nutzungsvariablen Architekturkonzepte, trotz ihrer Verschiedenheit, eine Gemeinsamkeit haben: Den Architekten ist es gelungen eine vitale Vielfalt und Expressivität innerhalb der Regeln des standardisierten Bauens zu schaffen.

Mobilität

Eine weitere, aber sehr spezielle Form der Nutzungsanpassung stellt die Veränderbarkeit der Ortsgebundenheit dar. Der Grundgedanke einer Behausung, die einen Ortswechsel ermöglicht, geht zurück auf die Anfänge menschlicher Bautätigkeit. Die Bautechniken von Zelten, Tipis und Jurten haben bis heute nicht an Relevanz verloren. Die Funktionsweise von Beduinenzelten – Druckstäbe und auf Zug beanspruchte

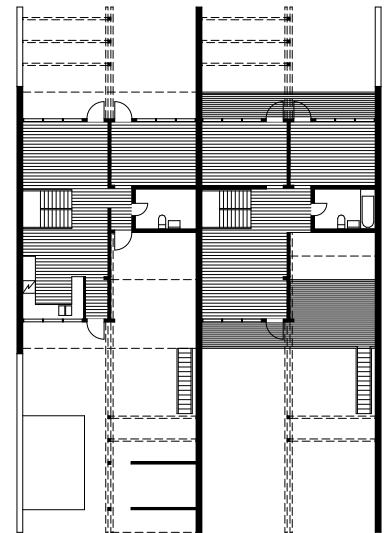


Abb.34: Hammersholt / DK, Saettedammen (Bjerg + Dyreborg, 1973)

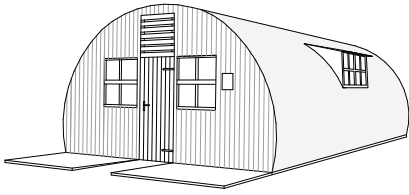


Abb.36: Nissenhütte (Peter Norman Nissen 1916)

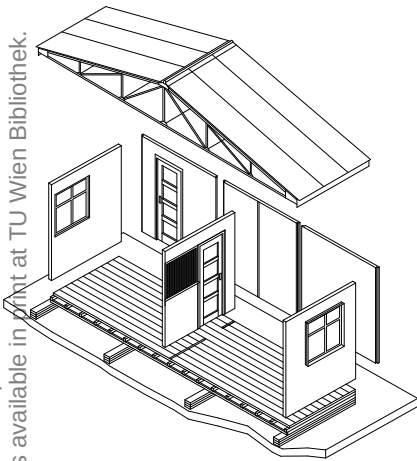


Abb.37: AIROH-Haus (Aircraft Industry Research Organization on Housing 1944)

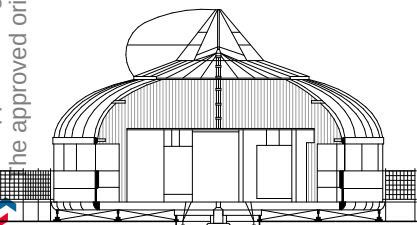


Abb.38: Dymaxion Haus (R. Buckminster Fuller, 1944)

Membrane – beruht beispielsweise auf denselben Prinzipien, die auch modernen statischen Konstruktionssystemen zu Grunde liegen. Das Tipi der nordamerikanischen Indigenen gleicht einem einzelnen Element eines Raumfachwerkes, welches Trennwände ohne Eigenstabilität und Doppelwandsysteme integriert. [179]

Die Wahrnehmung des mobilen Bauwerks als Teil der Architektur geht aber erst mit der Rationalisierung von Fertigung und Montage einher. Die industrielle Fertigung ermöglicht die Optimierung von Baulogistik und -koordination und bildet den Ursprung des modernen Leichtbaus. Zum ersten Mal wird die Idee der rationalisierten Fertigung und auch der Mobilität in großem Maßstab bei der Weltausstellung 1851 umgesetzt. Der Kristallpalast von Joseph Paxton wurde in nur neun Monaten errichtet, nach der Weltausstellung im Londoner Hyde Park demontiert und im Londoner Stadtteil Sydenham wiederaufgebaut. Das Gewächshaus aus vorgefertigten Eisen- und Glaselementen gilt seither als Ikone in der architektonischen Geschichte. [180] Angesichts der zur damaligen Zeit boomenden Stahlproduktion und der Entwicklung des Wellblechs kamen neue Behausungskonzepte im Typus der Halbtonne auf. Wie etwa das Portable Cottage von Morewood and Rogers oder die Nissenhütte des kanadischen Armeeingenieurs Peter Norman Nissen 1916, die sich in nur vier Stunden montieren lässt. Die hohen Produktionsreserven aus der Flugzeugindustrie und die gleichzeitige Wohnungsknappheit nach dem zweiten Weltkrieg hatten die Entstehung des britischen AIROH-Hauses (Aircraft Industry Research Organization on Housing) zur Folge. Das Serienhaus gleicht einem Flugzeug in Form eines Hauses, das aus vier transportierfähigen Einheiten besteht. Die Einheiten werden am Zielort durch Steckverbindungen zu geschlossenen Systemen vereint. [181]

Den Höhepunkt dieser Entwicklung erreichte Richard Buckminster Fuller, als er 1944 das Wichita-Haus entwarf. Es ist der letzte Entwurf seiner Dymaxion-House-Serie und basiert auf einer Hängekonstruktion, die an einem zentralen Mast befestigt ist. Der Tragemast beherbergt zugleich alle Ver- und Entsorgungssysteme und bildet so das funktionelle Zentrum. Die gesamte Konstruktion besteht aus gebündelten Stahlrohren, -seilen und doppelt gekrümmten Aluminiumblechen, die ein optimiertes Gewicht-Volumenverhältnis aufweisen, was sich im Sinne der Mobilität als großer Vorteil erweist. [182]

Mobile Strukturen finden sich auch bei Richard Neutra wieder: Diatom Prefabricated Houses 1923, One plus two Prefabricated Houses 1926,

Plywood Model House 1936. Sie sind modular aufgebaut, flexibel und demontierbar. Die Besonderheit von Neutras Fertighäusern liegt in den Metallfundierungen, die sich an jeden beliebigen Baugrund anpassen können. In gewisser Weise nimmt er die Idee einer „gehenden Architektur“, die Jahre später von Archigram weiterentwickelt wird, vorweg. [183] Die britische Gruppe Archigram befasst sich auf einer visionären und technologiebasierten Ebene in den 1960er Jahren mit beweglichen Strukturen in der Architektur. Mit Projekten wie Instant-City, Walking-City oder Plug-in-City entwerfen sie Ideen für eine „nicht auf Dauer angelegte, dezentralisierte, von der Technik beherrschte Umwelt“. [184]

Eine mobile und anpassungsfähige Architektur war schon immer stark verbunden mit dem Gedanken der Ressourceneffizienz. Architekten wie Frei Otto und Buckminster Fuller waren „auf der Suche nach Formen und Konstruktionen, die sich mit minimalen Material- und Energieaufwand für maximale Effizienz herstellen ließen“. [185] Aus dieser Erkenntnis heraus, prägte Fuller den Begriff der *Ephemerisierung*.

4.2.2 Ephemerer Bauen

In der Zoologie wird die Eintagsfliege als *Ephemera* bezeichnet. Die Tafeln, die die täglichen Stellungen der Gestirne festhalten, werden in der Astronomie *Ephemeriden* genannt. Ephemer ist daher in der Bedeutung gleich zu setzen mit dem Eintägigen, Vorübergehenden, Vergänglichen, Fließenden oder Transitorischen; im Gegensatz zum Dauerhaften, Beständigen und Ruhenden. [186]

R. Buckminster Fuller war einer der ersten ökologischen Systemdenker und beschäftigte sich sehr früh mit der funktionalen Effektivität der irdischen Ressourcen. Unter anderem untersuchte er die zivilisatorische Entwicklung der Menschheit und ging dabei von einer tiefenwirksamen Gesetzmäßigkeit aus: „Die Entwurfsenergie der Menschheit war seit je auf die Frage gerichtet, wie man das Gesuchte leichter, schneller und besser haben kann...“, [187] ganz gleich ob es darum geht, die Transportzeiten zu verkürzen, ein Gerät zu verfertigen, oder ein Werkzeug zu schmieden. Fuller nennt diesen Prozess Ephemerisierung. In diesem Zusammenhang hinterfragte er auch die Grundprinzipien der Architekten und deren „Häuser“, die über Jahrhunderte hinweg unverändert blieben. Für ihn galt die herkömmliche Hausbauweise als reine Verschwendung natürlicher Ressourcen, zumal sie meist sehr lange dauerte und die arbeitskraftintensive Materialverarbeitung vor Ort stattfand. Seine Vision basiert auf einer strukturellen Neuinterpretation nicht nur des Bauwesens, sondern auch einer universellen Anwendbarkeit dieser Strukturen. Diese Neuinterpretation verlangt eine industrialisierte Produktion, rasche und einfache Montage, möglichst wenig Materialaufwand und Gewicht, Demontierbar- und Wiederverwendbarkeit, Transpor-

tierfähigkeit, die Eignung für unter Umständen extreme Klimaverhältnisse, usw.
[188]

Diesen Grundprinzipien unterliegt auch eine *Circular Architecture*. Die Minimierung des Material- und Energieaufwandes einerseits, und die Kreislauffähigkeit der Konstruktion (Montage – Demontage – Wiederverwendung) andererseits, tragen effektiv zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei.

4.3 Gebaute Beispiele

Kreislaufwirtschaftliche Planung

AKTIVHAUSSIEDLUNG WINNENDEN



Abb.39: Aktivhaus-Siedlung Winnenden

AKTIVHAUS-SIEDLUNG WINNENDEN

WINNENDEN, DEUTSCHLAND

WERNER SOBEK

2016

Am Beispiel der Aktivhaus-Siedlung in Winnenden beweisen Werner Sobek Architekten, dass es möglich ist das Bauen in neuen Dimensionen zu denken. Mit dem Ziel den Ressourcenverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren und bezahlbares, aber individuell anpassbares, Wohnen zu ermöglichen, entwarfen die Architekten eine Fertighaus-siedlung in variabler Raummodulbauweise. Die in serieller Holztafelbauweise gefertigten Raummodule weisen einen außerordentlich hohen Vorfertigungsgrad auf. Mit Ausnahme der Stahlbetonfundamente wird vollständig auf Verbundwerkstoffe verzichtet. Die Konstruktion basiert auf dem Prinzip der immer gleichen Fügung der Bauteile und erlaubt dadurch eine Variabilität in der Anpassung an veränderte Bedürfnisse. Die Bauteile können nicht nur beliebig oft neu zusammengesetzt werden, sondern sind darüber hinaus maximal recyclingfähig. [189]

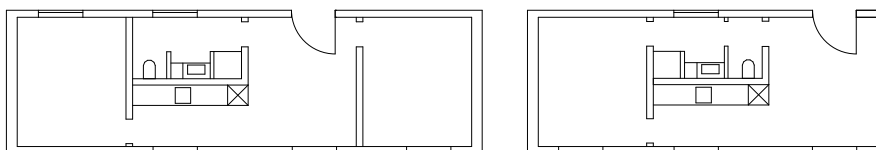


Abb.40: Grundrisse Raummodule M 1:200



5.

Kreislauffähige Konstruktionen

5.1 Lösbare Verbindungen

5.1.1 Gründung

5.1.2 Tragwerk

5.1.3 Gebäudehülle

5.1.4 Innenwandkonstruktionen

5.1.5 Fußbodenkonstruktionen

5.2 Einstoffliche Bauweisen

5.2.1 Biotischer Baustoff Holz

5.2.2 Mineralische Baustoffe

5.3 Gebaute Beispiele

5. Kreislauffähige Konstruktionen

Eine rückbaufreundliche Konstruktion und die Verwendung recyclingfähiger Materialien bilden zusammen die Basis kreislaufwirtschaftlichen Bauens. Geschlossene Kreisläufe sind nur dann möglich, wenn ein Großteil der Baustoffe sortenrein – ohne Anhaftungen anderer Materialien – rückgewonnen werden kann. Als rückbaufreundlich gelten Konstruktionen mit lösbaren Verbindungen und einstoffliche Bauweisen. Die vereinfachte Lösbarkeit der Bauteile fördert die Nachhaltigkeit eines Gebäudes auch dadurch, dass Reparaturen und Modernisierungsvorhaben leichter umgesetzt werden können. [190]

5.1 Lösbare Verbindungen und Konstruktionen

Die sortenreine Trennung von Baustoffen ist in der Regel die Grundvoraussetzung für ein hochwertiges Recycling. Besonders im Rückbau eines Bauwerks ist die Art der Fügung entscheidend. Je sortenreiner die Rückgewinnung eines Materials, umso höher ist sein Potenzial zur Rückführung in den Stoffkreislauf. Durch die Verwertung der demontierten „Sekundärrohstoffe“ können wirtschaftliche Gewinne erzielt werden. Bei der Entsorgung von Bauabfällen hingegen entstehen Kosten. Aber auch in der Errichtungs- und Nutzungsphase erweisen sich lösbare Konstruktionen als vorteilhaft. Etwa durch eine schnellere und witterungsunabhängige Montage oder den Entfall von Trocknungszeiten während der Errichtung. Bei notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen im Laufe des Lebenszyklus können einzelne beschädigte Elemente oder Funktionsschichten einfach ausgetauscht werden. [191]

In diesem Kapitel wird eine Auswahl von beispielhaften lösbaren Verbindungen und Konstruktionen als Alternative zu den konventionellen Konstruktionsprinzipien gezeigt. Die Lösbarkeit der ausgewählten Beispiele wird hierbei nicht im Speziellen untersucht und bewertet. Vielmehr steht die Auflistung möglicher Alternativen in den verschiedenen Konstruktionsebenen im Fokus.

5.1.1 Gründung

Fundamente

Fundamente werden üblicherweise als Betonfundamente ausgeführt. Dabei bieten sich hierfür auch lösbare und recycelbare Konstruktionen wie Schraubfundamente an, die sich im Übrigen auch schneller und flexibler montieren lassen.

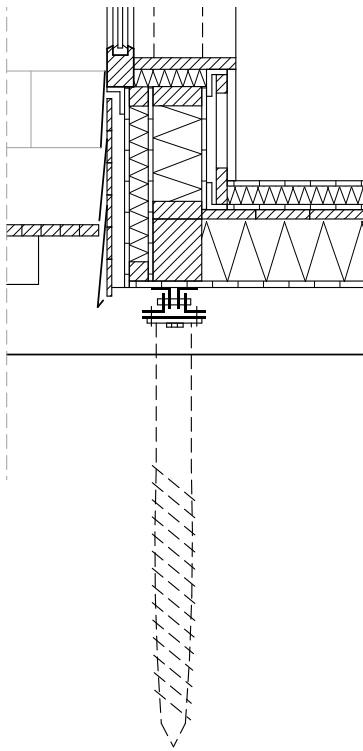


Abb.41: Fundamentdetail mit Schraubfundamenten

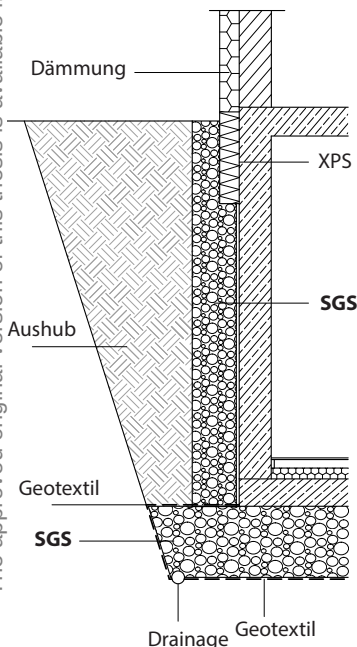


Abb.42: Schaumglasschotter (SGS) als Perimeterdämmung unter der Bodenplatte und an der Kellerwand

Schraubfundamente

Die Schraubengewinde aus feuerverzinktem Stahl werden in den Boden gedreht und dienen als Punktfundament. Sie können für Gebäude aus Holz und Stahl mit bis zu drei Geschossen und für Außenanlagen (Zäune, Photovoltaik, etc.) eingesetzt werden. [192] Sie sind in einer Größe von 55 bis 300 cm mit einer Tragfähigkeit von bis zu 12 Tonnen je Fundament erhältlich. Die Erdschrauben sind für die Anwendung in den Bodenklassen 1 (Mutterboden) bis 7 (Schwerer Fels) geeignet. [193] Als Vorteil ist auch die witterungsunabhängige und schnelle Montage zu gewichten. Die Verwendung solcher Fundamente bedeutet gleichzeitig den Verzicht auf Erd- und Betonbauarbeiten bzw. Flächenversiegelung.

Pfahlgründung aus Stahl

Bei Bauwerken mit höheren Lasten gibt es die Möglichkeit Verdrängungsrammpfähle aus Rohr- oder Doppel-T-Profilen aus Stahl zu verwenden. Sie sind relativ kostengünstig und lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand wieder entfernen. Allerdings eignen sich die Pfähle aufgrund von Erschütterungen nur begrenzt für dicht besiedelte Gebiete. Werden sie dauerhaft eingesetzt, ist zudem ein entsprechender Korrosionsschutz erforderlich. [194]

Perimeterdämmung

Als Alternative zu den geschlossenzelligen Dämmungen im erdberührten Bereich, bietet sich Schaumglas aus aufgeschäumtem Altglas als rückbaufreundliche Dämmvariante an.

Perimeterdämmung unter der Bodenplatte

Schaumglasschotter wird sackweise auf die Baustelle geliefert, in der Baugrube auf einem Geotextil ausgelegt und anschließend verdichtet. Anstelle des Granulats können auch Schaumglasplatten in Trockenbauweise auf einer dünnen Splittschicht unter der Bodenplatte verlegt werden. Beide Dämmsysteme sind schnell und witterungsunabhängig zu montieren. Aufgrund der kapillarbrechenden und lastabtragenden Eigenschaften des Schaumglases kann auf beidseitig gedämmte Streifenfundamente, Sauberkeitsschichten und Frostschränken verzichtet werden. Im Falle eines Rückbaus ermöglichen die Platten bzw. das Granulat eine sortenreine Rückgewinnung und somit eine gleichwertige Wiederverwendung.

Perimeterdämmung an der Kellerwand

Recycling-Schaumglasschotter findet auch als vertikale Kellerdäm-

mung in einer Montagehilfe aus Gewebesäcken Anwendung. Die herkömmliche, geklebte Perimeterdämmung aus Polystyrol mit verklebter Abdichtung kann somit vermieden werden. Die zu befüllenden Säcke sind bis zu 3 Meter hoch und werden an der Kellerwand temporär befestigt. Da unterhalb der Säcke eine Drainage vorzusehen ist, ist die Kombination mit einer Dämmung aus Schaumglasschotter unterhalb der Bodenplatte sinnvoll.

Kellerabdichtung

Bei erdberührten Bauteilen kommen häufig Bitumendickbeschichtungen oder sonstige betonkontaminierende Abdichtungen zum Einsatz. Als Alternativlösung bieten sich lose verlegte Kellerabdichtungssysteme oder die Konstruktion einer so genannten Weißen Wanne an. Speziell für den Tank- und Deponiebau wurde ein Abdichtungssystem aus drei Schichten entwickelt: Ein außenliegendes Schutzvlies, eine Abdichtungsbahn aus PE-HD¹ sowie eine innenliegende Hinterlüftungsbahn mit Drain-Composit aus druckstabilem PE-HD-Drainkörper mit Polypropylen-Vlies. Das System wird lose verlegt und ist im Gegensatz zu den verklebten Systemen rückbaufreundlich und erfordert keine Trocknungszeiten. Die Abdichtungsbahn ist in der Höhe mit 2,80 Meter begrenzt. Erfolgt die Kellerkonstruktion in Form einer Weißen Wanne, entfällt eine gegebenenfalls betonkontaminierende Abdichtung komplett. Um die Recyclingfähigkeit des Betons nicht zu beeinträchtigen ist anstatt der epoxidharzgefüllten Injektionsschläuche, ein Fugenblech aus verzinktem Stahl oder Edelstahl zur Abdichtung der Bauteilfugen empfehlenswert. [195]

5.1.2 Tragwerk

Während Holztafelbauten und Stahlskelettbauten als gut lösbare Tragwerkskonstruktionen gelten, müssen mineralische Massivbauten diesbezüglich eher negativ bewertet werden. Werden mineralische Bauwerkskonstruktionen jedoch im Monomaterialsystem ausgeführt, wird die Lösbarkeit der Verbindungen obsolet, da ohnehin alle Komponenten des Bauwerks denselben Verwertungsprozess durchlaufen.

Holzmassivbau

Die Entwicklungen der vergangenen Jahre haben im Holzmassivbau Systeme hervorgebracht, die zunehmend auf Verklebungen und Metallfügeteile verzichten. Die Verbindungen erfolgen über geometrisches Ineinandergreifen einzelner Bretter oder durch monomaterielle Fügeteile aus Hartholz. Mittlerweile gibt es einstoffliche Wand-, Decken- und Dachelemente mit unterschiedlichen Holzkonstruktionsprinzipien, die besonders recyclingfähig sind.

¹ High-Density Polyethylen = thermoplastisches Polymer mit hoher Dichte.

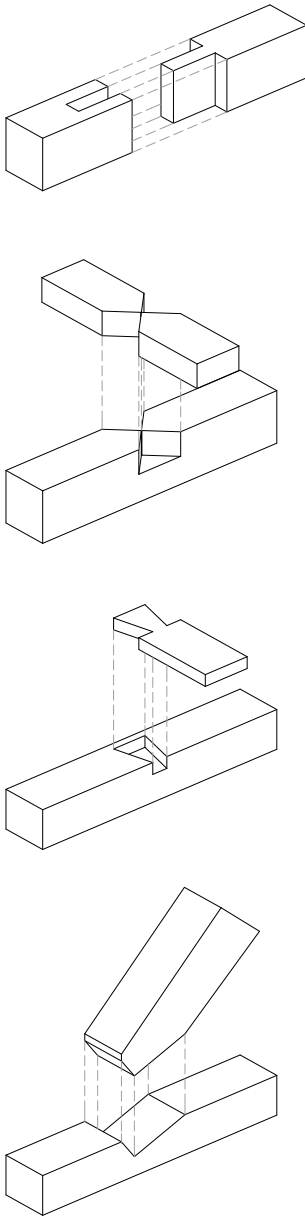


Abb.43: Zimmermannsmäßige Verbindungen

Holzskelett- und Holztafelbau

Im Sinne der Recyclingoptimierung ist im Holzskelettbau auf die übliche Fügung durch schwer lösbare Nagelplatten zu verzichten. Stattdessen sind einfach lösbare Schraubverbindungen oder zimmermannsmäßige Holzverbindungen anzustreben. Letztere beruhen auf jahrhundertealter Tradition, die bislang mit viel Aufwand verbunden war. Heute ist die Fügung durch traditionelle Verbindungsarten wie Stoß, Zapfen, Blatt, Kamm oder Versatz, mithilfe computerunterstützten Formfräsens wieder wirtschaftlicher durchführbar.

Werden zur Aussteifung keine Zug- oder Druckelemente, sondern Plattenwerkstoffe (Scheibenwirkung) verwendet, kann die herkömmlich verleimte OSB-Bepankung durch eine Platte aus Massivholzschalung ersetzt werden. Eine solche leimfreie Holzverlegeplatte basiert auf der traditionellen Schwalbenschwanzverbindung. Durch das minimale Aufquellen der Bretter bei Luftfeuchtigkeit schließen sich die Zwischenräume und die Platte ist damit luft- und winddicht.

Stahlbau

Der Stahlbau übernimmt eine Vorbildrolle, wenn es um geschlossene Stoffkreisläufe geht. Lösbare Verbindungen sind im Stahlskelettbau gängige Praxis. Selbst bei nicht zerstörungsfrei lösbaren Verbindungen, wie Schweißen oder Nieten, wird ein hochwertiges Recycling aufgrund der Materialhomogenität sichergestellt. [196]

5.1.3 Gebäudehülle

Die Außenbekleidung eines Gebäudes hat viele Anforderungen zu erfüllen und besteht dementsprechend aus mehreren Funktionsschichten. Um die einzelnen Schichten – Oberfläche, Unterkonstruktion, Winddichtung und Dämmung – beim Rückbau voneinander trennen zu können, ist eine lösbare Konstruktion erforderlich. Da es sich bei nicht hinterlüfteten Fassaden in der Regel um schwer lösbare Verbundkonstruktionen wie WDV-Systeme handelt, sind aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht hinterlüftete Konstruktionen sinnvoller.

Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

Die Konstruktionen von VHF-Fassaden lassen sich in vielen verschiedenen Ausführungen leicht lösbar gestalten. Daher gelten sie als besonders rückbaufreundlich und eignen sich für Außenwände in gleichem Maße wie für Schrägdächer. Als Bekleidungselemente sind jegliche Arten von Platten, Schindel-, Kassetten- und Stehfalzdeckungen, aber

auch Membrane, Gewebe oder Netze verwendbar. Deren Befestigung an der Unterkonstruktion kann entweder sichtbar oder verdeckt durch Verschrauben, Stecken, Einklemmen oder Einhängen erfolgen. Die Unterkonstruktionen sind im Grunde gut lösbar ausgebildet und ermöglichen eine schnelle Montage bzw. Demontage des Systems. [197]

Eine spezielle Lösung fordern VHF in Form von Natursteinfassaden mit einer verdeckten Befestigung. Eine zerstörungsfreie Entfernung der eingeklebten Hinterschnittanker aus der Natursteinplatte ist nicht möglich. Da für Natursteinplatten ein hohes Wiederverwendungspotenzial besteht bzw. ein Absatzmarkt existiert, kann eine lösbare Konstruktion auch wirtschaftliche Vorteile bringen. Zur verdeckten Befestigung von Natursteinplatten bietet sich daher ein mechanisches System an. Dabei werden die werkseitig auf der Rückseite geschlitzten Natursteinplatten in spezielle Aluminium-Klammerprofile der Unterkonstruktion eingehängt und durch die Federspannung der Klammer fixiert. Mithilfe dieses Montageprinzips lassen sich die Platten bei Bedarf austauschen. Das mechanische System bietet somit eine rückbau- und reparaturfreundliche Alternativlösung. [198]

Hinterlüftete Vormauerschalen

Auch für gebrauchte Vollziegel gibt es einen guten Absatzmarkt. Die Vorbereitung zur Wiederverwendung ist bei traditionell gemörtelten, hinterlüfteten Vormauerschalen jedoch mit viel Aufwand verbunden. Die Mörtelanhaftungen müssen manuell von den Backsteinen abgelöst werden. Die rückbaufreundliche Variante stellt das Trockenstapelsystem dar. Das mörtelfreie Fügen von Backsteinen wurde ursprünglich für eine schnelle und witterungsunabhängige Montage entwickelt. Die Backsteine werden dazu versetzt aufeinandergestapelt und über Edelstahlclips (= Verbindungsbleche), die in eine vorgefertigte Nut gesteckt werden, miteinander verbunden. Rückseitig werden sie mittels Luftschichtdübelankern am Tragwerk fixiert. Nur die unterste Backsteinschicht muss in ein Mörtelbett gesetzt und die Schicht, die den oberen Abschluss bildet, verklebt werden. [199]

Nicht hinterlüftete Fassaden

Auch auf dem Gebiet der Wärmedämmverbundsysteme zeigen sich Entwicklungen in Richtung Rückbau- bzw. Recyclingfähigkeit. In Kooperation mit der TU Graz hat ein Hersteller ein Klettsystem für WDVS-Fassaden entwickelt. Auf der Dämmschicht werden Putzträgerplatten aus Recycling-Schaumglas mit Klettverschlüssen befestigt. Anschließend

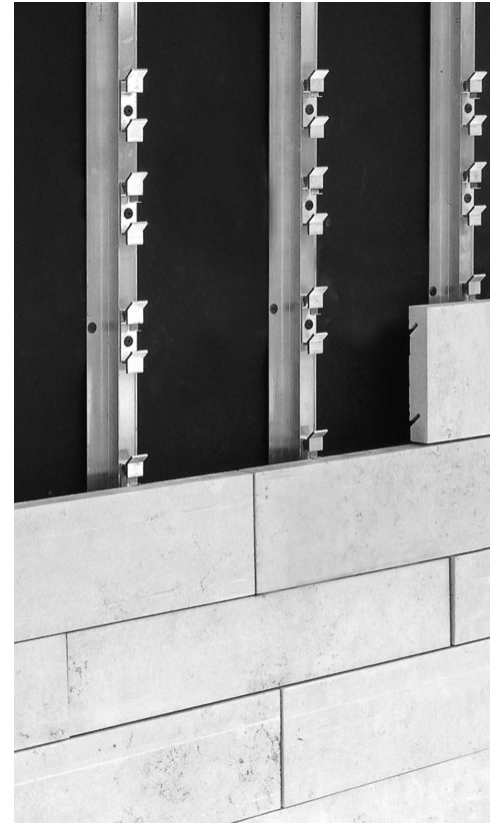


Abb.44: Rückbaufreundliche verdeckte Befestigung von Natursteinplatten

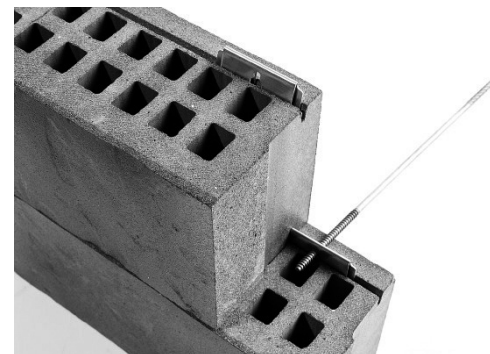
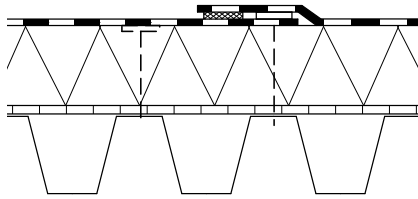
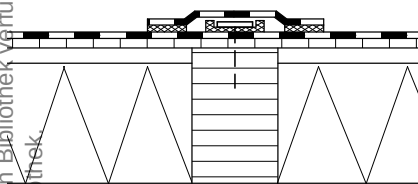


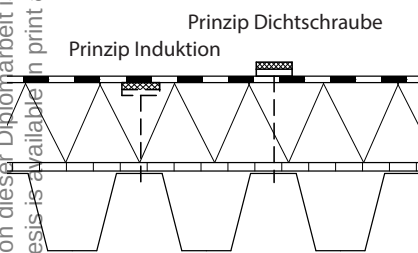
Abb.45: „Click Brick“ Trockenstapelsystem



Saumbefestigung



Linienbefestigung



Feldbefestigung

Abb. 46: Lösare Befestigung von
Dachabdichtungsbahnen

wird der Putz auf die Trägerplatten aufgebracht. Der Dämmstoff ist durch dieses Klettsystem frei wählbar und kann sortenrein rückgebaut werden. [200]

Dachkonstruktionen – Flachdach, Dachterrasse

Besonders im Bereich von Flachdächern oder Dachterrassen sind oft geklebte Verbundkonstruktionen vorzufinden. Es handelt sich zumeist um Flüssigkunststoffe oder geklebte Dachbahnen, die hier zum Einsatz kommen. Aber auch diese Art des Konstruierens lässt sich durch rückbaubare Alternativen ersetzen.

Dachabdichtungen

Für gewöhnlich enthalten Bitumen- oder Kunststoffabdichtungen Trägereinlagen aus Glasgewebe, Polyester- oder Glasfaservlies. Zusätzlich werden sie, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, von oben mit Kunststoffgranulat oder mineralischen Stoffen bestreut. Durch die Vermischung verschiedener Materialien verringert sich das Recyclingpotenzial. Daher sind für Abdichtungen und Trennlagen homogen aufgebaute, d.h. aus einem Material bestehende Systeme zu bevorzugen. [201]

Anstelle des verklebten Verbundes aus Abdichtung, Dämmung, Dampfbremse und Tragkonstruktion können Abdichtungen auch lose verlegt werden. Dafür ist eine mechanische Windsogsicherung mit entsprechender Auflast (z.B. Kies, Terrassenbelag oder ein Gründach) erforderlich. Weil das Prinzip der Windsogwirkung durch Auflast statisch beschränkt ist, kann die Abdichtungsbahn durch mechanische Befestigungen kraftschlüssig in der Tragkonstruktion verankert werden. [202]

Saumbefestigung: Die jeweils am Rand einer Bahn angeordneten Befestigungselemente werden durch die nächste Bahn überdeckt. Die Abdichtung erfolgt anschließend durch das Verschweißen der Bahnen miteinander.

Linienbefestigung: Die Lagesicherung der verlegten und verschweißten Bahnen geschieht anhand von verschraubten Metallprofilen in Abständen von maximal fünf Metern. Zusätzlich wird über diesen Profilen ein Abdichtungsstreifen mit der Dachabdichtung verschweißt. Diese Maßnahme soll ein Durchdringen der Dachbahn im Bereich der Schraubverbindungen sichern.

Feldbefestigung: Die Abdichtungsbahn wird durch Induktion mit rasterförmig verlegten Dübeln, entweder durch die Abdichtung hindurch

oder unterhalb der Dichtungsebene, verschweißt. [203]

Klettsystem: Von einem deutschen Hersteller wurde ein System entwickelt, bei dem die Dachabdichtung mit Klettverbindungen befestigt wird. Dazu werden mit kleinen Häkchen versehene Klettbänder auf der Oberseite der Dämmung ausgerollt und mit Dachschrauben in der Unterkonstruktion fixiert. Im Anschluss wird die, mit einem Spezialvlies versehene, Abdichtungsbahn ausgerollt und angedrückt. Zuletzt werden die Längs- und Querüberlappungen mit einem Heißluftgerät verschlossen. [204]

Dachkanten

An den Dachkanten wird die Dachabdichtung mechanisch durch Dachrandabschlussprofile gesichert. Dachrandabdeckungen werden aus mehrfach gekanteten Aluminiumblechen oder Verbundblechen hergestellt. Die beste Lösung für einen einfachen Rückbau bietet die Befestigung über das Haftenblech. Dabei wird das Blech über ein, zuvor an der Dachrandaufkantung verschraubtes, Haftenprofil geklemmt. Eine zusätzliche Verschraubung von oben und die daraus resultierende Abdichtung der Durchdringung des Blechs, werden durch das Klemmprinzip hinfällig.

Durch Anpressen und Festklemmen der Dachabdichtung am Dachrandabschlussprofil ist nicht nur eine einfache und witterungsunabhängige Montage, sondern auch ein nachträglicher Austausch mit geringem Aufwand gewährleistet. [205]

5.1.4 Innenwandkonstruktionen

Nicht nur im Sinne der Nutzungsoptimierung, sondern auch zum Zwecke der Lösbarkeit, sind leichte Ständerwände im Innenbereich vorteilhafter als mineralische Massivwände. Auf einer Tragkonstruktion aus Metallprofilen oder Holzständern werden Gipskarton-, Holzwerkstoff- oder Lehmbauplatten verschraubt. Der Ständerzwischenraum dient zum Einklemmen der Dämmung. Ständerwände sind reparaturfreundlich und vereinfachen nachträgliche Installationsmaßnahmen.

Innenwandbekleidungen sind hinsichtlich ihrer Rückbaubarkeit bzw. Recyclingfähigkeit unterschiedlich zu werten. Mineralische Massivbauwände sind in der Regel mit Gipsputz verkleidet. Aufgrund seines schwer lösbaren Verbundes mit dem Untergrund gilt der Gipsputz aktuell als Störstoff und verhindert ein hochwertiges Recycling der mineralischen Tragkonstruktion. Im Skelettbau hingegen sind innenseitige Bekleidungen an Decken und Wänden durchaus rückbaufreundlich. Im Deckenbereich sind Rasterabhangdecken mit einer Aluminium-Unterkonstruktion und Bekleidungen aus Gipskarton, Lehmbauplatten oder

Streckmetall zu empfehlen. Auf Innenverkleidungen verzichtet werden kann beispielsweise im Holzmassivbau. Hier wird die Innenseite, oft mit werkseitig integrierten Installationen, bereits in Sichtqualität gestaltet. [206]

Neue Entwicklungen zeigen weitere Möglichkeiten speziell lösbarer Befestigungen von Innenbekleidungen auf:

Metallklettbander:

Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München wurden zwei Befestigungssysteme aus Federstahl entwickelt, die nach dem Prinzip des Klettverschlusses funktionieren. Beide Systeme setzen sich aus je einem Hakenband und einem Ösen- bzw. Lochband zusammen. Die Metallklettbander wurden für besondere Ansprüche an Haltekraft und Wärmebeständigkeit konzipiert. Das Entenkopfmodell ist dem etablierten Kunststoff-Klettband nachempfunden. Zahlreiche filigrane Stahlhaken können in jedem beliebigen Winkel in die Ösen eines Stanzflauschbandes greifen. Die stabilere Variante besteht aus breiteren Hakenelementen, die in die Durchbrüche eines Lochbands einschnappen. Sie sind so gekrümmt, dass sie sich auf leichten Druck hin elastisch verformen und in die Löcher gleiten. Anschließend kehren sie sofort zu ihrer Ausgangsform zurück. Die Bauteile lassen sich nahezu beliebig oft Lösen und erneut Zusammenfügen. Die Klettbander sind somit nicht nur stabil und beständig gegen chemische und thermische Einflüsse, sondern ermöglichen ein werkzeugloses und nahezu unbegrenztes Lösen und Fügen von Bauteilen. [207]

Magnet- und Schienenbefestigungssysteme für Wandbekleidungen im Nassbereich:

Eine Alternative zu geklebten Fliesenbelägen im Nassbereich bieten lösbar befestigte, großformatige Glasscheiben. Die 6-8 mm dicken ESG-Scheiben werden entweder mittels Standard-Schienen- oder Magnetbefestigungssystem an die Wand montiert. Das Schienensystem besteht oben und unten aus aufgeklebten Metallbefestigungsprofilen, die in an der Wand eingeschraubte Gegenstücke einzuhängen sind. Durch das Eigengewicht der Glastafeln und die Verzahnung im Profil werden die Glaselemente in ihrer Lage gesichert. Beim Magnetbefestigungssystem werden Magnete punktuell an die wandseitige Befestigungsschiene geschraubt, während das Gegenstück rückseitig auf der Glasplatte verklebt wird. Bei beiden Systemen erfolgt die Abdichtung der Fugen zwischen den Glasscheiben mit Silikon. Beim Rückbau können Metall

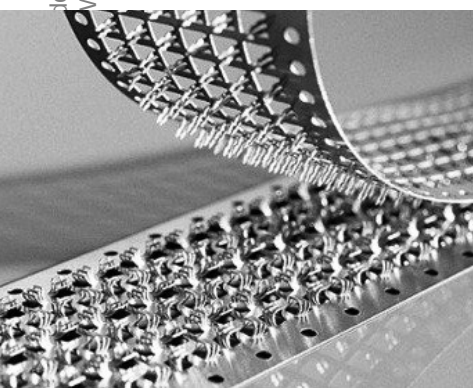


Abb.47: Metallklettband als Schnappverschluss

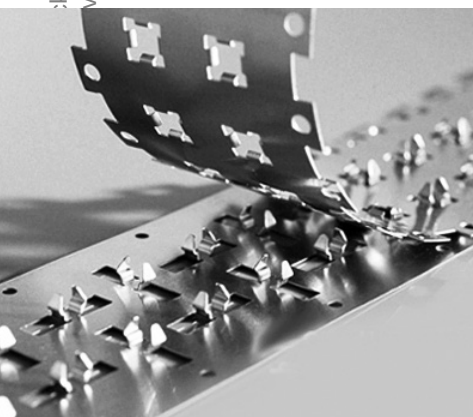


Abb.48: Metallklettband als Haken-Ösen-System

und Glas sortenrein rückgewonnen werden. Magnethalterungen eignen sich auch für andere Bekleidungsmaterialien außerhalb des Nassbereiches. [208]

5.1.5 Fußbodenkonstruktionen

Bei herkömmlichen Fußbodenaufbauten handelt es sich zumeist um schwer trennbare Verbundkonstruktionen. So etwa gehen die Komponenten eines typischen Bodenaufbaus mit Fußbodenheizung einen schwer lösbaren Verbund miteinander ein. Der hierfür verwendete mineralische Heizestrich ist mit dem Bodenbelag verklebt und lässt sich kaum von den (Kunststoff-)Rohren und der darunterliegenden Trittschalldämmung lösen. Aber auch Fußbodenkonstruktionen lassen sich mit zerlegbaren Aufbauelementen (Beläge, Estrich, Fußbodenheizung, Schüttungen) rückbaubar konstruieren. [209]

Fußbodenbeläge

Die schwimmende Verlegung von Parkett mit Nut-und-Feder-Verbindungen oder geschraubte Massivholzdielen sind bereits bekannte Möglichkeiten für lösbare Bodenbeläge. Darüber hinaus gibt es mittlerweile auch demontierbare Verlegesysteme für keramische, kunststoffbasierte oder textile Beläge.

Linoleum-Fußbodenpaneele im Klicksystem

Linoleum wird in der Regel mit dem Untergrund vollflächig verklebt und verspachtelt, um eine möglichst ebene Oberfläche zu erhalten. Mit einem Klicksystem wird dieser Verbund überflüssig. Wegen der geringeren Anforderungen an die Ebenheit sind Linoleum-Fußbodenpaneele im Klicksystem sind auch auf nicht-spachtelbaren Untergründen anwendbar. Ein Paneel besteht aus dem Linoleum, einer Holzfaserplatte auf der das Linoleum aufgebracht ist und einem Gegenzug aus Kork auf der Unterseite der Platte. Die Paneele werden schwimmend verlegt und mit einer speziellen Nut-und-Feder-Verbindung zusammengesteckt. Die Linoleumfliesen eignen sich für die Verlegung von bis zu 100 Quadratmeter großen fugenlosen Flächen. Sie können mit Fußbodenheizungen kombiniert, nicht jedoch in Feuchträumen verwendet werden. [210]

Trockenverlegesystem für keramische Fliesen

Auch bei Keramikfliesen funktioniert das System der Trockenverlegung. Anstelle von Mörtelschicht und Klebers kommt eine Korkschicht zum Einsatz, die sich fest an den Boden ansaugt. Die 2,5 mm starke Kork-

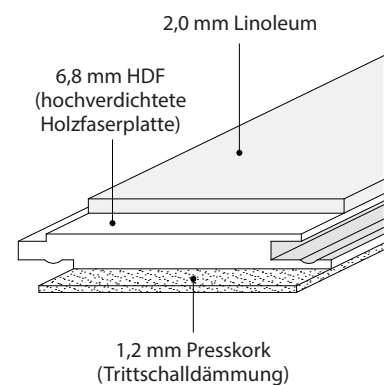


Abb.49: Linoleum-Fußbodenpaneele mit Klicksystem



Abb.50: Keramische Fliesen im Trockenverlegesystem



Abb.52: Schwimmende Verlegung von Teppichfliesen

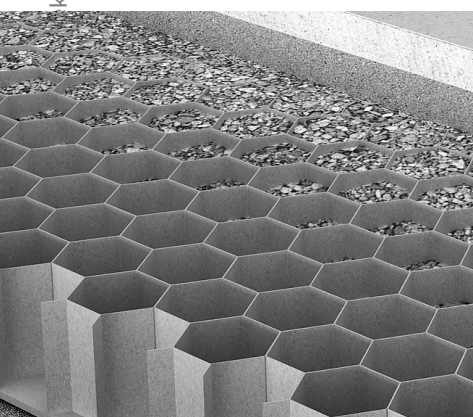


Abb.51: Pappwabenplatte als Einbringhilfe für Masseschüttungen

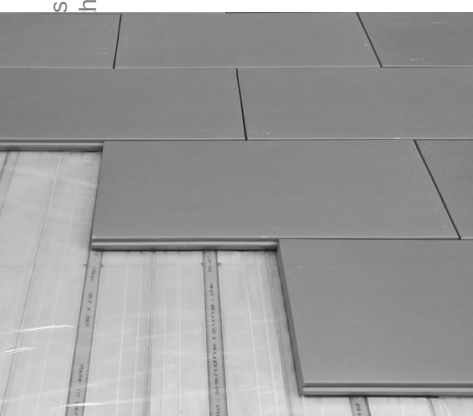


Abb.53: Trockenestrich als Sichtoberfläche: Estrichziegel

schicht wird auf der Unterseite der Fliese aufgesintert und weist zudem trittschalldämmende Eigenschaften auf. Das Eigengewicht der Fliese drückt die Korkschicht an den Untergrund und sorgt für die Lagesicherung. Bei der Verlegung entsteht eine 3 mm starke Systemfuge, bedingt durch das umlaufende Überstehen des Korks um 1,5 mm. Mit einer speziellen Dispersionsfugenmasse werden die Fugen anschließend ausgefüllt. Die Vorteile des Trockenverlegesystem gegenüber der konventionellen Fliesenverlegung liegen in der, vergleichsweise geringen, Montagezeit und der Austauschbarkeit einzelner Fliesen. Bei der Demontage wird die Fuge aufgeschnitten und die Fliesen mit einem Saugheber herausgenommen. [211]

Selbstliegende Teppichfliesen, schwimmend verlegt

Die ÖNORM EN 1307 legt fest, dass ab einem Flächengewicht von mehr als 3,5 kg/m² eine Verklebung der Teppichfliese mit dem Untergrund nicht mehr notwendig ist. Dieses erforderliche Eigengewicht kann durch eine Schwerbeschichtung des Teppichrückens erzielt werden. An den Ecken, im Türbereich und an gewissen Zwischenbereichen müssen die Fliesen durch doppelseitiges Klebeband oder ein Klettband festgemacht werden. Mittlerweile werden Teppichfliesen mit hohem Anteil an RC-Material, PVC-freiem Rücken und einer Schwerbeschichtung aus Kreide (z.B. Nylon-Teppichfliese) hergestellt. [212]

Schüttungen

Im Skelettbau sind zwischen Rohdecke und Trittschalldämmung üblicherweise Schüttungen vorzufinden. Sie erhöhen die Masse und tragen somit zur Verbesserung der Schalldämmung bei. Eine besonders rückbaufreundliche Lösung für die Masseschüttung stellen Pappwabenplatten dar. Sie vereinfachen das gleichmäßige Einbringen des Schüttguts und erlauben – da sie vorsichtig begehbar sind – die Montage der nächsten Bauteilschicht ohne weitere Lastverteilungsmaßnahmen. [213] Eine einfache Konstruktion besteht aus einer Papp-Sinuswabenplatte (erhältlich in 5-100 mm Höhe), einem darunter aufgebrauchten Rieselschutz aus Graupappe und einer, die Waben bündig füllenden, Schüttung, z.B. aus Sand. Beim Rückbau kann die Schüttung einfach abgesaugt und die Pappe sowie das Schüttmaterial sortenrein recycelt werden. [214]

Trockenestriche

Im Vergleich zum Nassestrich zeichnet sich der Trockenestrich durch das Wegfallen der Trocknungszeiten und die geringere Aufbauhöhe aus. Zusätzlich zu diesen ökonomischen Vorteilen in der Errichtung ist der

Trockenestrich sehr einfach zu lösen und im Rückbau sortenrein trennbar. Als gängige Trockenvariante des Estrichs gilt die schwimmende oder verschraubte Verlegung von Holzwerkstoff- oder Gipsfaserplatten.

Estrichziegel aus Ton

Eine weitere Alternative sind Tonziegel, die als keramischer Sichtbelag (unglasiert oder glasiert) oder als Unterkonstruktion für diverse Beläge (z.B. Parkett, Teppich, Linoleum, etc.) eingesetzt werden können. Die Tonziegel sind 20 mm stark und in zwei Größen (400/180 mm und 500/250 mm) sowie in mehreren Farben erhältlich. Ist der Untergrund nicht eben, kann eine Trockenschüttung aus Blähton-schiefer zum Ausgleichen verwendet werden. Die Unterkonstruktion bildet entweder die Trittschalldämmung oder ein Fußbodenheizungssystem. Nachdem die Estrichziegel schwimmend verlegt wurden, werden sie mit Nut und Feder untereinander verriegelt und zusätzlich miteinander verklebt. Aufgrund ihrer wasserfesten Eigenschaften sind die Tonziegel feuchtraumgeeignet, jedoch nicht frostsicher und somit nicht für den Außenraum nutzbar. [215]

Die meisten der oben genannten Systeme sind bauaufsichtlich zugelassen oder verfügen über eine Europäische Technische Bewertung (ETA). Eine Zulassung im Einzelfall² erfordern etwa Schraubfundamente, mechanische Systeme zur verdeckten Befestigung von Natursteinfassaden oder Abdichtungsbahnen mit Klettverbindung. Nicht genormte oder geregelte Produkte sind zum Beispiel die Estrichziegel aus Ton oder die Metallklettbander und Schienenbefestigungssysteme zur Innenwandbekleidung. [216]

² Angaben beruhen auf den Zulassungspflichten und aktuellen Genehmigungsverfahren in Deutschland.

5.2 Einstoffliche Bauweisen

Die Monomaterialität von Bauwerkskonstruktionen ist neben deren Lösbarkeit ein ebenso bedeutendes kreislauffähiges Konzept. In den vergangenen Jahren werden zunehmend Bauweisen erprobt, bei denen Tragkonstruktion und bauphysikalische Anforderungen in einem Material zusammengeführt werden können. Die Einstofflichkeit fördert nicht nur die Recyclingfähigkeit der Materialien, sondern überzeugt durch die Ablesbarkeit der Konstruktion auch mit ästhetischer Qualität. Der wirtschaftliche Vorteil liegt vor allem im Rückbau des Gebäudes, da eine aufwendige manuelle Demontage und die Nachsortierung der Materialien kaum oder gar nicht anfällt. Allerdings stößt die Umsetzung dieser Bauweisen häufig an ihre Grenzen, wenn es um erdberührte oder andere abdichtende Bauteile, wie Flachdächer, geht. Im Folgenden werden biotische und mineralische Baustoffe auf ihre konstruktiven Potenziale und ihren Optimierungsbedarf im Hinblick auf einstoffliches Bauen untersucht. [217]

5.2.1 Biotischer Baustoff Holz

Holztafelbau

Im Holztafelbau ist es möglich alle funktionalen Schichten der Konstruktion aus holzbasierten Materialien umzusetzen. Für das tragende Ständerwerk kann Bau-schnittholz verwendet werden. Die Aussteifung erfolgt über raumseitig angeordnete OSB-Platten, die zugleich auch als Dampfbremse dienen. Für die Dämmebene eignen sich beispielsweise Holzfaserplatten (die kleberlos hergestellt und nur durch das stoffeigene Bindemittel Lignin stabilisiert werden), eine Einblasdämmung aus Holzspänen oder Zellulose. Zur Verbesserung des Wärmeschutzes und zur Abdichtung wird das Bauwerk nach außen mit, mehrere Zentimeter starken, mitteldichten Faserplatten beplankt. Die Beplankung überdämmt das Ständerwerk und hindert kalte Luft daran die Dämmung zu durchströmen. Den erforderlichen Witterungsschutz gewähren Holzelemente in Form von Latten, Schalungen oder Schindeln. Zu beachten ist die Dauerhaftigkeitsklasse der im Außenbereich verwendeten Holzart. Im Holztafelbau können durch die Mehrschaligkeit hohe Schalldämmmaße und ein guter Wärmeschutz erzielt werden, bei verhältnismäßig geringen Wandstärken. Nach diesem Aufbauprinzip lassen sich Wände, Geschossdecken und geneigte Dächer konstruieren.

Holzmassivbau

Seit einigen Jahren entwickeln sich im Holzmassivbau diverse Systeme, die auf leim- und metallfrei miteinander verbundene Vollholzelemente abzielen. Neben verleimten Brettsperrholzplatten für Wände, Decken und Schrägdächer gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Einzelelemente, die auch in der Fügetechnik eine

Monomaterialität erlauben. Für die Verbindung der Einzelelemente kommen zumeist Hartholzdübel zum Einsatz, wie zum Beispiel bei Brettstapeldecken oder -wänden aus verzahnten Lamellen sowie bei Brettsperrholzsystemen. Die Verzahnung der Elemente untereinander führt zur Winddichtigkeit des Systems. Je nach statischem Erfordernis können die Wände zwischen 12–16 cm stark sein. Verbesserten Wärmeschutz bieten außenseitig aufgebrachte Holzfaserplatten. Als Witterungsschutz kann eine hinterlüftete Fassade vorgehängt werden. Sollen Außenwände ohne zusätzliche Schichten aus Holzfaserdämmung auskommen, müssen sie so stark dimensioniert sein, dass der erforderliche Wärmeschutz ohne Zusatzmaßnahmen gewährleistet ist. Die größte verfügbare Standarddicke entspricht ca. 35 Zentimetern und erzielt einen Wärmedurchgangskoeffizient von $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für das Schalldämmmaß gilt: Je schwerer das Bauteil, desto besser der Schallschutz. Mit nur $60\text{--}150 \text{ kg/m}^2$ ist die schalldämmende Wirkung von Brettsperrholzplatten relativ gering im Vergleich zu massiven Mauerwerks- und Betonwänden. Eine Erhöhung des Schallschutzes kann durch zusätzliche Schalen, wie zum Beispiel einer raumseitig federnd vorgesetzten Platte herbeigeführt werden. Bei Geschossdecken ist sogar eine Kombination aus Beschwerung, schwimmendem Estrich und eventuell federnd abgehängter Decke erforderlich, um ein Mindestmaß an Schallschutz zu erreichen.

5.2.2 Mineralische Baustoffe

Lehm

Einstoffliches Bauen mit Lehm ist nicht bei allen Bauwerksteilen möglich. Unbewehrte Lehmteile sind nur auf Druck, nicht aber auf Zug belastbar und daher als einstofflich hergestellte Decken nicht geeignet. Eingeschränkt möglich sind auch erdberührte Böden aus Stampflehm sowie Abdichtungen aus Lehm. Tragende Wände hingegen sind monomateriell gut ausführbar. Sie lassen sich aus gefertigten Lehmsteinen unter Verwendung von Lehmmörtel mauern, in Stampftechnik vor Ort oder als Fertigteil herstellen. Außenwände aus Lehmsteinen müssen vor Schlagregen geschützt werden, da es ansonsten durch das ablaufende Wasser zur Erosion des Materials kommt und Frostabplatzungen eintreten können. Hierfür ist ein entsprechender Witterungsschutz – z.B. eingebettete Ziegelstreifen oder Trasskalkleisten, die den Ablauf von Schlagregen aufhalten – vorzusehen. Reiner Lehmputz ist nicht witterungsbeständig. Aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit muss Lehm zusätzlich gedämmt werden. Auch die dämmende Schicht kann

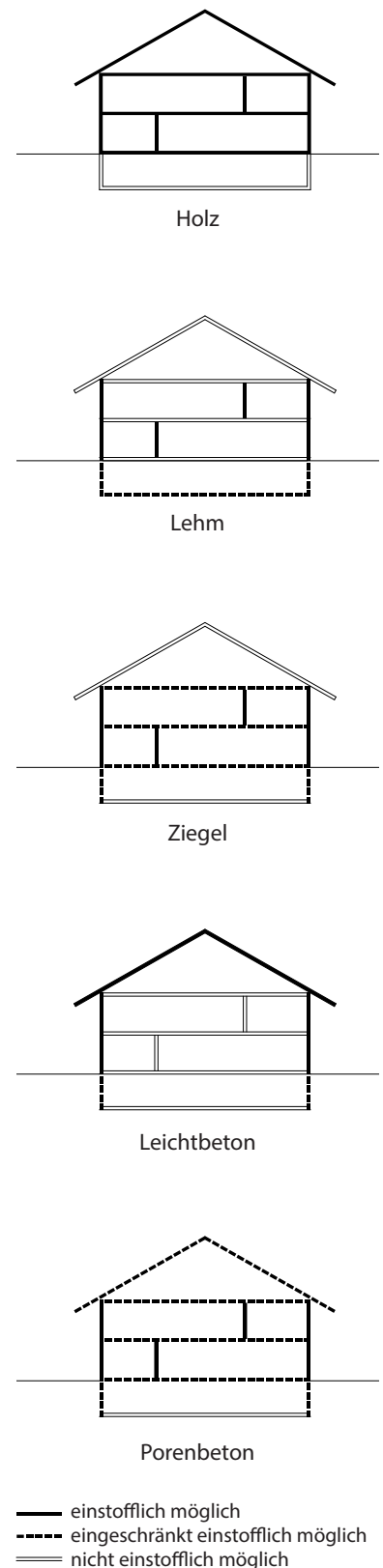


Abb.54: Ausführungsmöglichkeiten in einstofflicher Bauweise

aus Leichtlehmsteinen oder Lehmputzen hergestellt werden. In Abhängigkeit zur Wandstärke weisen Lehmwände sehr gute Schalldämmwerte auf, sind gute Wärmespeicher und stabilisieren außerdem die Raumluftfeuchte.

Ziegel

Einschalige Mauerwerkswände lassen sich heute mit besonders leistungsfähigen Ziegeln und einer erstaunlich niedrigen Wärmeleitfähigkeit bis $0,07 \text{ W/(mK)}$ realisieren. Zur Erreichung einer solchen Dämmwirkung werden die Ziegelsteine oft mit Dämmstoffen verfüllt. Im Sinne der Monomaterialität ist eine Durchmischung von Materialgruppen – z.B. durch Einfüllung von Styropordämmstoffen – zu vermeiden. Besonders gute Dämmwerte erreichen Ziegel mit hoher Porosierung und einer extremen Minimierung der Stegquerschnitte, ohne dass dafür zusätzliche Dämmverfüllungen notwendig wären. Allerdings leidet die Druckfestigkeit darunter. Dämmziegel sind für einschalige, beidseitig verputzte Wände zugelassen, sind aber in der Anwendung durchaus auch als Hintermauerziegel mit einer außenseitigen Klinkerschale (Witterungsschutz) zu finden. Sowohl Innen- als auch Außenputz sollten rein mineralisch und frei von Gipsanteilen sein. Wärmedurchgang und -speicherung können gezielt durch eine Kombination von hintereinander angeordneten Ziegeln unterschiedlicher Wärmespeicher- und Wärmeleitfähigkeit beeinflusst werden. Das Bürogebäude 2226 von Baumschlager Eberle in Lustenau stellt dieses Konstruktionsprinzip unter Beweis. (s. Gebaute Beispiele, S. 117) Die einstoffliche Ausbildung der Decken

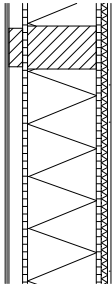
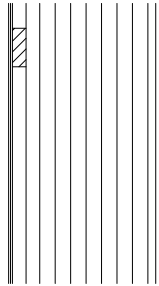
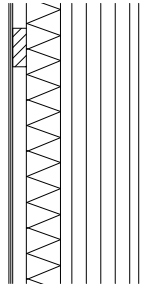
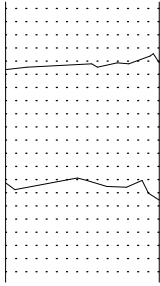
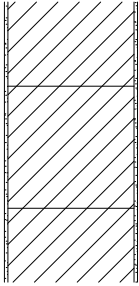
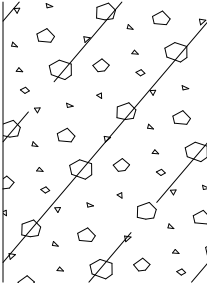
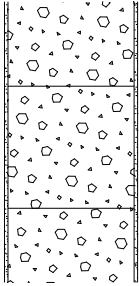
	Holzständerwand mit 40 mm Installationsebene und vorgehängter Fassade	Massivholzwand mit Witterungsschutz	Massivholzwand mit 12 cm Holzweichfaserdämmung und Witterungsschutz
			
Wandstärke gesamt [cm]	31	43	38
Schalldämmmaß R'_w [dB]	42-45	39	45
Wärmedurchgangskoeffizient U [$\text{W/m}^2\text{K}$]	0,20	0,34	0,24
Wärmespeicherkapazität [$\text{Wh/m}^2\text{K}$]	6	8	8

Abb.55: U -Werte und Schalldämmmaße ausgewählter einstofflicher Außenwandkonstruktionen

ist jedoch eingeschränkt. Die sogenannten Hourdisdecken (Tonziegelplatten) werden meist vor Ort mit Aufbeton vergossen und erfordern eine Tragkonstruktion aus Holz oder Stahl. Die Fußbodenkonstruktion kann mithilfe von Ziegelabbruchmaterial als Trittschalldämmung und Trockenestrichsystemen aus Ton im Monomaterialsystem ausgeführt werden.

Porenbeton

Porenbeton eignet sich lediglich für die Tragkonstruktion eines Gebäudes; Decken und Dächer können nicht vollständig einstofflich hergestellt werden. Außenwände können aus Porenbetonsteinen oder Montagebauteilen errichtet werden. Als Dämmung sind Mineraldämmplatten aus dem gleichen Baustoff aber mit geringerer Dichte einsetzbar. Kalk- und Zementputze kommen außen als Witterungsschutz und innen als Raumabschluss in Frage. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit (zwischen 0,08 und ca. 0,20 W/(mK) verdanken Bauteile aus Porenbeton ihrer Porosität. Hochporosierte Mauersteine haben aber immer mit geringer Wärmespeicherfähigkeit und geringer Schalldämmwirkung zu kämpfen. [218]

Stamflehmwand	Mauerwerkswand aus hochporosierten Ziegeln, beidseitig verputzt	Leichtbetonwand	Porenbetonwand beidseitig verputzt
			
45	39	60	39
57	48	58	47
2,1	0,24	0,6	0,24
20	8	12	7

5.3 Gebaute Beispiele

Kreislauffähige Konstruktionen

KRAFTWERK LAUSWARD

GEMEINDEZENTRUM ST. GEROLD

BÜROGEBÄUDE 2226



Abb.56: Kraftwerk Lausward

KRAFTWERK LAUSWARD

DÜSSELDORF, DEUTSCHLAND

KADAWITTFELDARCHITEKTUR

2015

Die lösbar konstruierte Fassade des Kraftwerks hat nicht nur die Montagezeit deutlich verkürzt, sondern ermöglicht auch eine effiziente Rückbaubarkeit. Die innenliegenden Stahlkassetten sind aufeinander gesteckt und rückseitig an der Stahlkonstruktion verschraubt. Die Fugen sind mit geklemmten Dichtbändern verschlossen. Wärme- und Schalldämmung sind in die Kassetten gepresst und werden durch die verschraubte Stahlunterkonstruktion der Außenhülle befestigt. Die Stahlprofile des Tragwerks sind durch Verschraubung miteinander verbunden. Am Nutzungsende lässt sich das Gebäude leicht demontieren und die einzelnen Stoffgruppen können ohne großen Aufwand sortenrein getrennt werden. Somit ist das Kraftwerk als urbane Mine zu betrachten: Es kann entweder als vollständiges Bauwerk oder in Form einzelner Teile wiederverwendet werden. Durch den Verkauf des Stahls sind auch wirtschaftliche Gewinne im Rückbau zu erzielen. Dieses Gebäude entspricht den Prinzipien des Technischen Kreislaufs.

[219]

- 1 Außenwandaufbau „Rahmen“:
Träger Stahlprofil IPE 260
Fassadensystemkassette
Stahlblech gekantet
160/200 x 1,0/1,25 mm
Wärmedämmung 160 mm
Thermische Trennung 60 x 3 mm
Unterkonstruktion Modulleiste
Fassadenbekleidung Stahlkassette,
RAL 9006 400/1,0 mm
- 2 Wandaufbau „Fuge“:
Lochblech-Kassette RV 12/16-
600/1,5 mm RAL 9005
Stahlkassette als Refraktionsfläche
RAL 9016
Unterkonstruktion Modulleiste
Thermische Trennung 60 x 3 mm
Wärmedämmung 160 mm
Stahlblech gekantet
160/600 x 1,0/1,25 mm
Fassadensystemkassette
Träger Stahlprofil IPE 260 mm

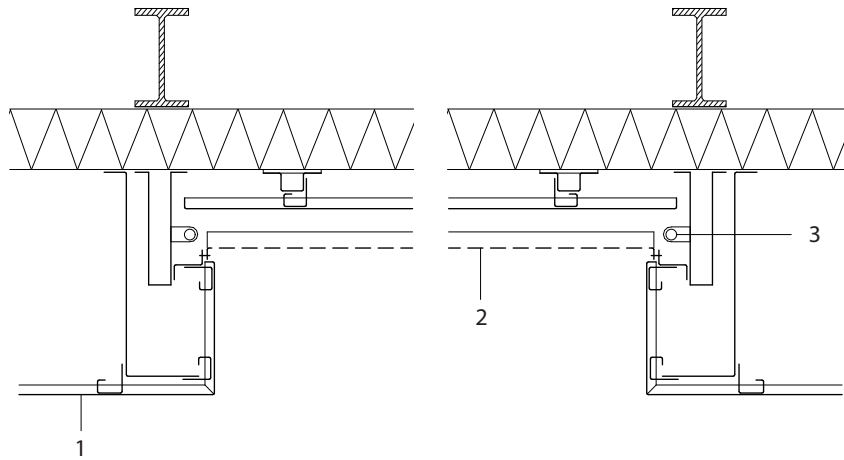


Abb.57: Horizontalschnitt M 1:20

- 3 Leuchstoffröhre



Abb.59: Innenansichten Stadtfenster

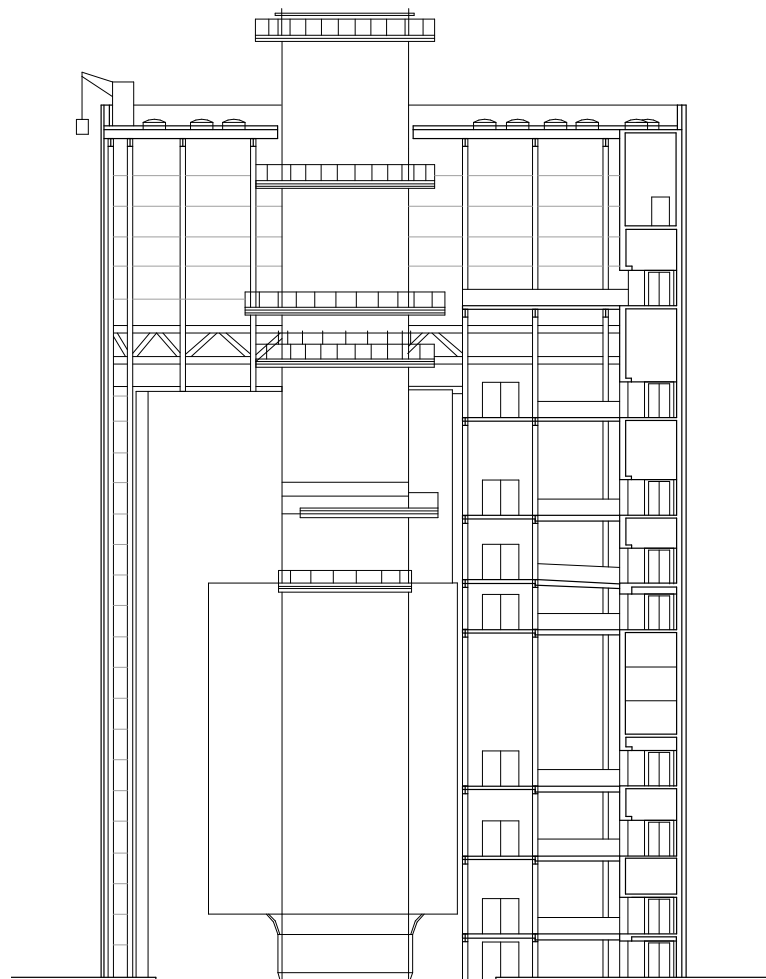


Abb.58: Schnitt durch das Stadtfenster M 1:500



Abb. 60: Gemeindezentrum St. Gerold

GEMEINDEZENTRUM ST.GEROLD

ST.GEROLD, ÖSTERREICH

CUKROWICZ NACHBAUR ARCHITEKTEN

2009

Beim Gemeindezentrum in St. Gerold handelt es sich um das erste derartige Bauwerk dieser Art, welches in konstruktiver Holzbauweise errichtet wurde. Der für das viergeschossige Gebäude verwendete Holzbaustoff entstammt den umliegenden Wäldern und wurde von regionalen Zimmereien verarbeitet. Außenbekleidungen, Fensterahmen, aber auch Bodenbeläge, Türen, sowie Decken- und Wandbekleidungen im Inneren wurden aus behandelter Weißtanne hergestellt. Die verleimten Holzwerkstoffe wurden hier durch verdübelte Brettstapeldecken und diagonale Brettschalungen (zur Aussteifung) ersetzt. Die vorgefertigten, geschosshohen Tafelbauelemente bestehen aus Vollholz-Stützen und -Trägern. Mit Ausnahme der Schafwolle als Akustikdämmung und einer vertikalen Perimeterdämmung, wurde für die gesamte Gebäudedämmung (Hülle und Geschossdecken) ausschließlich Holzfaserdämmstoff verwendet. Die Bauweise des Gemeindezentrums kann weitgehend als einstofflich bewertet werden. Lediglich die Ausführung der erdberührten Bauteile erfolgte als reine Betonkonstruktion.

[220]

TU
WIEN

Bibliothek

Your knowledge hub

- Abb.62: Grundriss und Schnitt M 1:250

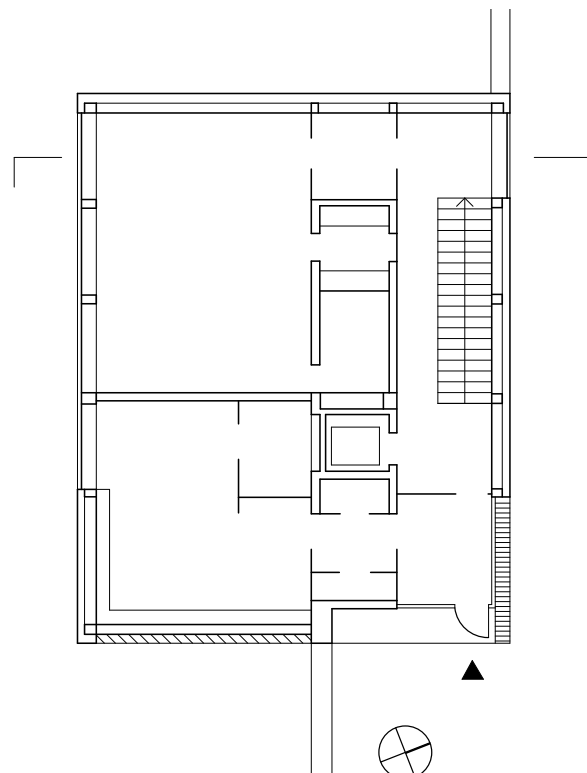
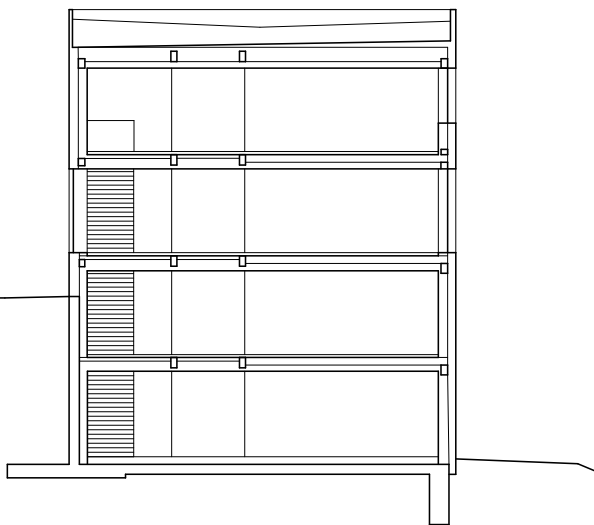


Abb.61: Vertikalschnitt M 1:20

Abb.62: Grundriss und Schnitt M 1:250



Abb.63: Bürogebäude 2226

BÜROGEBÄUDE 2226

LUSTENAU, ÖSTERREICH

BE BAUMSCHLAGER EBERLE

2013

Die Architekten verzichteten auf Dämmstoffe im Wandaufbau und schufen dennoch ein Gebäude, das dem höchsten Stand der Technik entspricht. Die Außenwände sind zweischalig konstruiert: Eine großporige und auf hohe Dämmwerte ausgelegte Außenschale kombiniert mit statisch wirksamen Ziegeln mit kleineren Löchern auf der Innenseite. Der Witterungsschutz wird durch einen Außenputz aus Löschkalk erreicht. Das Gebäude kommt vollständig ohne Heizung, Lüftung und Kühlung aus. Der entscheidende Unterschied zur gängigen Praxis liegt in der technischen Intelligenz eines jeden Bauteils: Wände, Decken, Grundriss und Fassade. Die hohen, innenbündig gesetzten Fenster sind weitgehend verschattet durch die 75 cm starke Außenwand, die wiederum mit 22 Prozent maßvoll befenstert ist (in heutigen Bauwerken sind 50 Prozent üblich). Die Temperierung der Räume erfolgt lediglich durch die Abwärme der Nutzung: Von Kaffeemaschinen über Computer bis zur Körperwärme der Nutzer. Es herrschen gesicherte Temperaturen von 22–26° Celsius, daher auch der Name des Projekts: „2226“. [221]

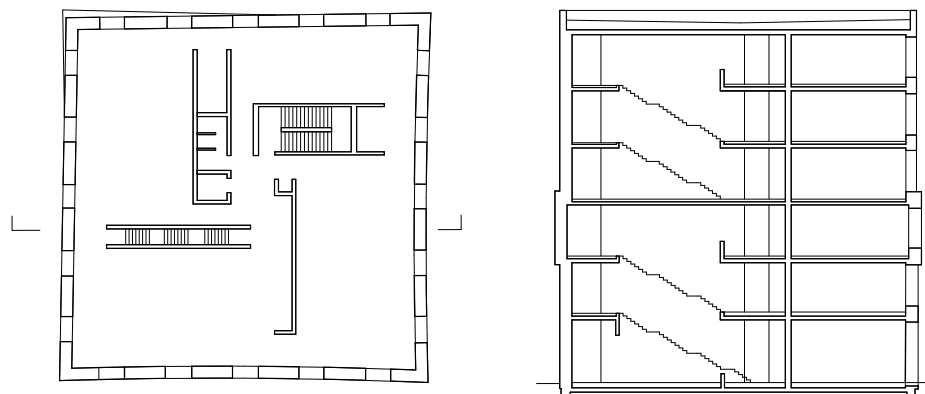
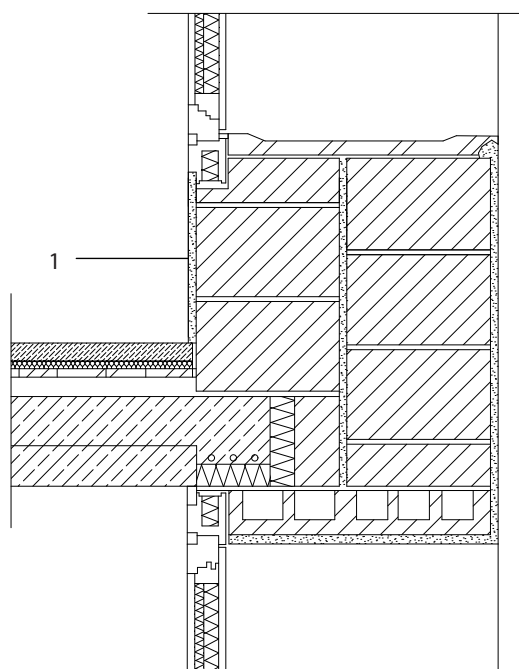


Abb.64: Schnitt und Grundriss M 1:500



- 1 Außenwandaufbau:
 gelöschter Kalkputz, 8 mm
 Kalkzement-Grundputz, 12 mm
 gelochter Ziegel, U-Wert = 0,24 W/m²K, 380 mm
 Mörtelfuge, 18 mm
 gelochter Ziegel, U-Wert = 0,34 W/m²K, 380 mm
 Kalkzement-Grundputz, 15 mm
 Kalkputz-Spachtelung, 5 mm

Abb.65: Vertikalschnitt M 1:20



Abb.66: Außenwand im Rohbau



6. Materialkreisläufe

6.1 Biotischer Kreislauf

6.1.1 Gründung und Tragwerk

6.1.2 Gebäudehülle

6.1.3 Bauplatten außen/innen

6.1.4 Oberflächen innen

6.1.5 Dämmungen

6.1.6 Gebaute Beispiele biotischer
Kreislauf

6.2 Technischer Kreislauf

6.2.1 Metallische Materialien

6.2.2 Mineralische Materialien

6.2.3 Gebaute Beispiele technischer
Kreislauf

6.2.4 Gebaute Beispiele technisch-bio-
tischer Kreislauf

6.2.5 Gebaute Beispiele Materialkreis-
läufe durch Re-Use

6.3 Bauen mit lokalen Ressourcen

6.3.1 Gebaute Beispiele

6. Materialkreisläufe

6.1 Biotischer Kreislauf

Mit biotischen Materialien zu bauen, entspricht dem Leitbild der Ressourcenschonung und Abfallvermeidung. Beim Einsatz unbehandelter biotischer Materialien handelt es sich von Natur aus um einen geschlossenen Stoffkreislauf. Eine Vielzahl dieser Baustoffe kann in nahezu allen Konstruktionsebenen und in ganz unterschiedlichen Ausführungen verwendet werden. Welche Materialien wofür eingesetzt werden können, wird nachstehend erläutert.

6.1.1 Gründung und Tragwerk

Der Baustoff Holz hat sich als konstruktives Material für Tragwerke in jüngster Zeit besonders stark etabliert. Jedoch besteht hinsichtlich seiner kreislaufwirtschaftlichen Potenziale noch Optimierungsbedarf. Die konstruktiven und verwertungstechnischen Herausforderungen wurden bereits in vorangehenden Kapiteln behandelt und werden hier nicht mehr diskutiert. Weiters sind in diesem Zusammenhang Holzschutzmaßnahmen zu erwähnen. Für Tragwerke mit längerer Nutzungsdauer sind entsprechende Maßnahmen zum Holzschutz vorzusehen. Je nach Holzfeuchte wird Holz in erster Linie durch Pilzbefall zerstört. Gegen Insektenbefall ist ein konstruktiver Holzschutz einem Unzugänglichmachen durch Verbauen und Abdecken vorzuziehen. Der Einsatz von chemischen Holzschutzmitteln ist, wenn möglich, weitestgehend zu vermeiden. Holzbauteile werden üblicherweise mit schwer entflammbaren Bekleidungen oder nicht brennbaren Plattenbaustoffen vor Bränden geschützt. Hierbei ist auf die Rückbau- und Recyclingfähigkeit des gewählten Materials zu achten. Auch ein holzimmanenter, einstofflicher Brandschutz ist möglich: Holz wird mit Holz vor Brand geschützt, indem eine durch die Brandeinwirkung entstehende Kohleschicht den inneren Kern schützt. [222]

6.1.2 Gebäudehülle

Entscheidend für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Außenwandbekleidung sind die Brennbarkeit und die Dauerhaftigkeit der Materialien. Grundsätzlich eignen sich Massivhölzer und Thermohölzer gleichermaßen wie Holzwerkstoffplatten oder Reeteindeckungen.

Massivholz

Die Lebensdauern von Massivhölzern im Außenbereich variieren stark, je nach Einsatzbereich, Holzart und angewendetem Holzschutz. Als besonders langlebig gelten Bekleidungen aus Lärchenholzschindeln. Zum einen, weil die Lärche eine dauerhafte Holzart ist und zum anderen, weil die Fasern durch das hand-

werkliche Spalten der Hölzer erhalten bleiben und die vertikale Ausrichtung in Faserrichtung die Niederschlagsableitung fördert.

Bei der Oberflächenbehandlung von Massivholz-Verkleidungen ist darauf zu achten, dass keine Kunstharzlacke oder biozidhaltige Produkte verwendet werden – sie behindern eine Weiterverwertung des Holzes in der Kaskadennutzung.

Thermoholz

Thermoholz verzichtet auf chemischen Holzschutz oder Beschichtungen und zeichnet sich dennoch durch sehr hohe Dauerhaftigkeit aus. Als Ausgangsholz für die Herstellung von Thermoholz kommen grundsätzlich alle heimischen Holzarten infrage: Bei Temperaturen von über 160° Celsius wird das Holz unter Sauerstoffmangel und ohne den Einsatz weiterer Zusätze thermisch modifiziert. Unverleimt fällt das TMT (Thermally Modified Timber) am Lebensende unter die Altholzkategorie I. Unbehandelt und bei voller Bewitterung kann es eine Lebensdauer von 25 Jahren erreichen. Im Grunde bietet das TMT eine attraktive Alternative zu hochwertigen, langlebigen Holzarten.

Holzwerkstoffplatten

Sperr- oder Furnierschichtholzplatten werden aus Laub- und/oder Nadelholzfurnieren hergestellt, die meist mit duroplastischen Bindemitteln wasserfest miteinander verklebt werden. Dabei ist auf einen möglichst geringen Anteil von Formaldehyd im Kleber zu achten. Sie eignen sich besonders gut für großflächige Formate an der Fassade und sind in Dicken von 12 bis 70 mm erhältlich. Ab Plattenstärken von 25 mm kann sogar auf zusätzlichen Oberflächenschutz, wie Lacke, verzichtet werden. Einen Recyclinganteil in der Herstellung neuer Sperr- und Furnierschichtholzplatten gibt es derzeit noch nicht. Als verklebtes Altholz werden die Holzwerkstoffplatten am Lebenszyklusende vorwiegend energetisch verwertet.

Reet

Getrocknetes Schilfrohr, oder auch Reet genannt, wird an Ufern oder in Sumpfgebieten¹ geerntet. Aufgrund der Emissionen sind Importe mit hohen Transportdistanzen allerdings zu vermeiden. Aus dem Material lassen sich in anspruchsvoller Handarbeit 25-40 cm dicke Dachbeläge oder Fassadenbekleidungen herstellen. Deren Befestigung an der Unterkonstruktion (Holzlattung) erfolgt über Edelstahl- oder Kupferdrähte. Die Schilfrohre sind zwischen 150 und 230 mm lang bei einem Halmdurchmesser von 3 bis 12 mm. Reet ist ein reines Naturprodukt, das sich am Lebensende kompostieren lässt und somit im biotischen Kreislauf geführt werden kann. Zur Verlängerung der Lebensdauer sollte es ausschließlich mechanisch gepflegt und nicht mit Algenvernichtungsmitteln

¹ vorwiegend in Polen, Ungarn, Rumänien oder der Türkei.

behandelt werden. [223]

6.1.3 Bauplatten außen / innen

Diverse Bauplatten, sowohl auf biotischer als auch mineralischer Basis, leisten einen wichtigen Beitrag zum ressourcenschonenden Bauen und werden an dieser Stelle gesondert hervorgehoben. In vielfältigen Ausführungen erfüllen sie eine Vielzahl von Funktionen. Im Skelettbau dienen die dünnen Flächenbeplankungen als Raumabschluss in Dach-, Decken- sowie Wandbauteilen und können tragend und/oder aussteifend wirken. Werden sie in der Gebäudehülle eingesetzt, sind sie für die Regulierung des Feuchtetransportes oder die Winddichtigkeit zuständig. Schwere Massivbauteile aus mineralischen Baustoffen, deren End-of-Life-Potenzial eingeschränkt ist, können durch Naturbaustoffe in Form von Bauplatten weitgehend ersetzt werden.

Massivholz-Diagonalplatten und Holzwerkstoffplatten

Bevor sich Holzwerkstoffplatten am Markt etabliert hatten, galten Massivholzschalungen als typische Aussteifungselemente im Holzskelettbau. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen entstehen Produkte wie OSB-, Span- oder Holzfaserplatten, deren Ausgangsstoffe Sägenebenprodukte, Industrierundhölzer oder Recyclingmaterialien sein können. Die sogenannten *Oriented Strand Boards* (OSB) bestehen aus groben Flachspänen (aktuell ausschließlich aus Durchforstungsholz), die richtungsorientiert in mehreren Schichten übereinander verleimt werden. Die aussteifende Wirkung, die hohe Tragfähigkeit und die abdichtenden Eigenschaften von OSB-Platten sind auf die kreuzweise Verleimung der Späne zurückzuführen. Aufgrund der standardisierten Länge der Flachspäne (160 mm) kommen Althölzer für die Herstellung kaum in Frage. Jedoch erzeugt das Produkt bei der energetischen Verwertung mehr Energie als bei der Herstellung und beim weiteren Lebensweg aufgewendet wird und gilt daher als Plusenergieprodukt. Einen vergleichsweise hohen Recyclinganteil weisen Spanplatten für Innenbeplankungen auf. Sie bestehen grundsätzlich aus getrockneten feinen Spänen und Holzmehl aus Industrieböhlern, Waldhackschnitzeln und Recyclingholz, die mit duroplastischen Bindemitteln verpresst werden. Die Altholzanteile variieren europaweit sehr stark. In Österreich und Deutschland liegt der RC-Anteil am Gesamtholzanteil bei 30 Prozent, während er in Italien bei 90 Prozent und in Finnland bei 0 Prozent liegt. Je nach Einsatzbereich (Außen- oder Innenbeplankung) werden Holzfaserplatten mit formaldehydfreiem MDI-Harz oder dem holzeigenen Klebstoff Lignin, gebunden bzw. verpresst. Als Außenbeplankung kann die Holzfaserplatte beispielsweise Bitumen- oder Folienabdichtungen zur Abweisung von Niederschlagswasser ersetzen. Sie ist nicht nur wasserabweisend, sondern auch diffusionsoffen. Als Innenbeplankung erreicht

die Holzfaserplatte durch ihre hohe Rohdichte bei einer Stärke von 8 mm vergleichbare Werte, wie eine 15 mm OSB-Platte oder eine 16 mm Spanplatte.

Strohbauplatten

Eine Alternative für den Trockenbaubereich bieten Strohbauplatten, die durch das stroheigene Lignin ohne weitere Bindemittel oder Kleber auskommen und dabei dauerhaft wasserfest sind. Der regionale Baustoff (Nebenprodukt des Weizenanbaus) ist energieeffizient und wächst schnell nach. Die Platten werden beidseitig mit Recyclingkarton verleimt um eine ebene Deckschicht zu erhalten. Sie sind in Stärken von 38 mm oder 58 mm erhältlich und eignen sich für Innenwände, Beplankungen, Schallschutz- und Installationsebenen. Durch die Herstellerrücknahme können Strohbauplatten nach sortenreinem Rückbau wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Darüber hinaus sind sie komplett kompostierbar oder energetisch verwertbar. [224]

6.1.4 Oberflächen innen

Wand / Decke

Wie für den Außenbereich eignen sich biotische Materialien auch als Oberflächenmaterial im Innenbereich. Die bereits oben genannten Hölzer und Holzwerkstoffplatten (s. Gebäudehülle) können auch als Verkleidungen an Wänden und Decken verwendet werden. Weitere biotische Alternativen sind textile Gewebe. Wandteppiche und Textilebekleidungen galten in der traditionellen Architektur als repräsentativer Schmuck oder „Geschichtenerzähler“ und dienten als einfache Wärmedämmung – und sind auch heute aufgrund ihrer raumakustischen Eigenschaften praktikabel.

Jutegewebe

Jute ist eine schnell nachwachsende Pflanze, die schadstofffrei, gesundheitlich unbedenklich und biologisch abbaubar ist. Sie wird zu Geweben gesponnen, die als schallabsorbierende Innenbekleidung auf eine Holzunterkonstruktion gespannt werden. Der Naturbaustoff verfügt über eine natürliche Resistenz gegen Schimmel und Insekten und sorgt für ein gesundes Raumklima.

Schafschurwollfilz

Das textile Flächengebilde aus Schafwolle wird ganz ohne Bindemittel, rein durch das mechanische Filzen hergestellt. Der Schafschurwollfilz kann, ähnlich wie das Jutegewebe, über eine Unterkonstruktion gespannt werden. Als biotisches Oberflächenmaterial erfüllt der Filz sowohl raumakustische als auch raumklimatische Aufgaben. [225]

Boden

Auf die Wahl des Bodenbelages ist hinsichtlich des hohen Abnutzungsgrades besonders Acht zu geben. Je nach Einsatzbereich (Wohn-, Verwaltungs- oder Gewerbebauten) müssen Oberbodenbeläge relativ oft ausgewechselt werden. Aus diesem Grund lohnt es sich, recyclingfähige Materialien und lösbare oder schwimmende Verlegungsarten zu wählen. Beläge aus nachwachsenden Naturmaterialien weisen große Unterschiede in Bezug auf Eignung, Lebensdauer oder Pflegefreundlichkeit auf. Was jedoch die Behaglichkeit und den Raumeindruck betrifft, stehen ihnen andere Materialien oder günstige Imitate, wie Laminat, weit nach.

Massivholz und Holzwerkstoffe

Holzböden haben sich bereits in zahlreichen öffentlichen und hochfrequentierten Gebäuden wie Museen oder Schulen als beständig erwiesen. Sie sind roh, aber auch mit Oberflächenüberzügen, wie z.B. Seife oder Öl verwendungsfähig. Zu vermeiden sind allerdings Lackierungen, die eine spätere Verwertung der Beläge behindern. Massivholzböden aus Eiche, Buche oder Fichte und Mehrschichtparkettböden mit einer Nutzschicht aus Eiche, die in einer Stärke von mehr als 20 mm verbaut werden, fallen in die Brandschutzklasse Cfl-s1 und gelten somit als schwer entflammbar.

Linoleum

Linoleum ist ein durch Zufall entstandenes Material, das zu mehr als 80 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen besteht. Zu den Hauptbestandteilen gehören Leinöl, Korkmehl und Harze. Zur Verbesserung der Farb- und Lichtbeständigkeit werden weiters Holzspäne, Calciumcarbonat, recyceltes Linoleum sowie Titan-dioxid und Pigmente beigemischt. Das Gemisch kann so ohne Oberflächenbeschichtung auf einem Trägermaterial aus Jute aufgetragen werden. Dennoch sind aktuell fast alle Linoleumbeläge mit Polyurethan beschichtet. Aufgrund seiner vielfältigen Eigenschaften eignet sich das Material sehr gut als Bodenbelag. Es ist robust, verschleißfest, bakteriostatisch und gesundheitlich unbedenklich, da es keine chemischen Zusatzstoffe erfordert. Alternative und rückbaufreundliche Verlegesysteme wurden bereits in Kapitel Lösbare Verbindungen, S. X behandelt.

Sisal-, Kokos-, Haargarnteppiche

Webteppiche lassen sich gut aus biotischen Materialien wie Sisal, Kokos oder Tierhaar herstellen. Allerdings ist dabei auf einen Trägerrücken, der meist aus Materialien anderer Stoffgruppen besteht und einen unlösbaren Verbund mit der Nutzschicht eingeht, zu verzichten. Nur bei naturreiner Materialität von Sisal ist eine Kompostierung am Nutzungsende möglich, ansonsten werden Teppiche

energetisch verwertet. [226]

6.1.5 Dämmungen

Dämmstoffe aus biotischen Materialien sind aus ökologischer Sicht sehr zu empfehlen. Vor allem naturbelassene Dämmungen lassen sich am Nutzungs-ende kompostieren und somit geschlossen im biotischen Kreislauf führen. Bei Produkten, die ohne Schutz vor Feuer, Feuchtigkeit oder Schädlingen nicht auskommen, sind biozid-, formaldehyd- und borathaltige Zusätze zu vermeiden, um eine spätere Kompostierung zu ermöglichen. [227] Da die logistische Abwicklung kompostierbarer Bauabfälle noch nicht ausgereift ist, ist davon auszugehen, dass ausgebaute Altstoffe derzeit energetisch verwertet werden. [228]

Holzfaserdämmplatten

Zur Herstellung von Holzfaserdämmplatten werden bestenfalls Abfall- oder Nebenprodukte aus der Sägeindustrie (Holzfasern) herangezogen. Die Dämmplatten können im Nassverfahren – mit dem holzeigenen Bindemittel Lignin – oder im Trockenverfahren – ohne Wasser, aber zusätzlichen Bindemitteln – erzeugt werden. Im Gegensatz zum Nassverfahren verbraucht das Trockenverfahren 40 Prozent weniger Energie pro Tonne, hebt aber die Monomaterialität auf und beeinträchtigt somit das Recycling bzw. eine zukünftige Kompostierung. Wohingegen die Holzfaserdämmplatte aus dem Nassverfahren ein sortenreines Produkt ohne Zusatzstoffe darstellt. Ihre maximale Plattendicke ist jedoch auf 40 mm beschränkt. Stärkere Platten lassen sich nur durch zusätzliche Bindemittel oder eine mechanische Befestigung in mehreren Lagen realisieren. Die im Trockenverfahren mit Weißleim oder PUR-Verleimung hergestellten Platten sind in Dämmstärken bis zu 240 mm erhältlich. [229] Holzfaserdämmplatten eignen sich sowohl für den Einsatz im Innen- als auch konstruktiv geschützten Außenbereich, als Wärme- oder Trittschalldämmung.

Holzspäne als Einblas-, Schütt- oder Stopfdämmung

Ein weiteres Nebenprodukt aus der lokalen Sägeindustrie, das sich zu Dämmzwecken verwenden lässt, sind Holzspäne. Zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften werden die Holzspäne mit Molke, einem Naturprodukt aus der Käseherstellung, behandelt. Durch die Imprägnierung mit Soda wird das Material zusätzlich gegen Pilzbefall geschützt. Der Dämmstoff wird eingeblasen oder manuell durch Schütten oder Stopfen in die Konstruktion eingepasst. [230] Im Jahr 2012 wurde er weltweit als einziger Bio-Dämmstoff Cradle-to-Cradle Gold zertifiziert. [231]

Hanffaserdämmplatten

Hanf gilt hierzulande nicht nur als nachwachsender, sondern vor allem auch als

lokaler Rohstoff. Der Anbau der Nutzpflanze findet in Oberösterreich und angrenzenden Gebieten statt und bietet einen Hektarertrag von 6.000 bis 10.000 kg binnen 100 Tagen. [232] Aufgrund der pflanzeneigenen Bitterstoffe und der Eiweißfreiheit sind Hanffasern besonders widerstandsfähig gegen Fäulnis, Ungeziefer, Nagetiere und Schimmel. Die Fasern werden entweder zu Dämmmatten, Dämmfilzen oder Stopfdämmungen verarbeitet. Während Flachsdämmungen hauptsächlich mit Borsalzen zur Erhöhung des Brandschutzes versehen werden, kommt bei Hanfdämmungen baubiologisch unbedenkliches Soda als Brandschutzmittel zum Einsatz. Sofern eine Herstellerrücknahme für die Produkte gewährleistet ist, können die sortenrein rückgebauten Dämmmatten wieder dem Produktionskreislauf zugeführt werden. Ansonsten werden sie kompostiert oder energetisch verwertet. Um die Kompostierung nicht zu beeinträchtigen ist darauf zu achten, dass keine synthetischen Stützfasern zur Formstabilität eingesetzt werden. Ein deutscher Hersteller verwendet hierfür kompostierbare Stützfasern auf Polylactid-Basis (PLA). [233]

Schilfrohr-Dämmmatten

Trockenes Schilfrohr kann naturbelassen zu Matten weiterverarbeitet werden. Die Verbindung der zusammengepressten Schilfhalme erfolgt derzeit maschinell mit verzinktem Draht – eine biologisch abbaubare Alternative zum Draht ist noch in Entwicklung. Wird das Metall beim Rückbau aussortiert, kann das Schilfrohr direkt der Kompostierung zugeführt werden. Die Dämmmatten sind im trockenen Zustand resistent gegen Pilze und Schädlinge. Aufgrund ihrer luftgefüllten Hohlräume sind die Schilfrohrmatten äußerst stabil und dennoch formbar und daher zur Herstellung gekrümmter Flächen gut geeignet. Verputzt man sie mit Lehm, dienen sie als Wärmedämmung und Putzträger zugleich.

Sonstige Dämmmatten und -filze oder Einblasdämmungen können beispielsweise aus Kork, Kokos- und Jutefasern, Zelluloseflocken, Schafschurwolle oder Seegras hergestellt werden. Diese nachwachsenden Dämmstoffe werden hier nicht vertiefend dargestellt. [234]

6.1.6 Gebaute Beispiele

Biotischer Kreislauf

STROHHAUS DORNBIRN

WOOD INNOVATION AND DESIGN CENTRE



Abb.67: Wohnhaus Dornbirn

STROHHAUS, WOHNHAUS DORNBIRN

VORARLBERG, ÖSTERREICH

GEORG BECHTER ARCHITEKTUR + DESIGN

2014

Das experimentelle Strohhaus entstand aus dem Wunsch der Bauherren nach einem ökologischen und günstigen Wohnraum. Der nachwachsende Baustoff übernimmt bei diesem Gebäude die Funktionen als Wärmedämmung und Tragkonstruktion zugleich. Kompostierbare Strohballen, die übereinandergestapelt und außen mit Kalk und innen mit Lehm verputzt sind, bilden den Wandaufbau des eingeschossigen Wohnhauses. Ein vorgefertigtes Dachmodul aus verschraubten Holzkastenträgern lastet nur mittels Schwerkraftverbindung auf den lose gestapelten Großballen (70 x 120 x 240 mm). Die Wand wird nach außen hin durch einen Dachüberstand geschützt. Der Fußboden aus geschliffenem Estrich ist im Verbund mit der Bodenplatte aus wasserundurchlässigem Beton hergestellt, um eine große Speichermasse zu erhalten, die tagsüber Wärme aufnimmt und abends abgibt. Schüttungen aus Ziegelrezyklat wurden unterhalb der Bodenplatte als Drainageschicht, und auf dem Dach als Wurzelebene der Dachbegrünung, eingesetzt. Gleichzeitig fungiert die Schüttung auf dem Dach als Windsogsicherung der lose verlegten Abdichtung. Ein offenes Raumkonzept im Inneren des Gebäudes ermöglicht einen fließenden Übergang der verschiedenen Nutzungszonen. Der Raum besteht aus vier Holzboxen, die mit Schiebetüren geöffnet werden können und eine beliebige Konfiguration der Räume erlauben. [235]



Abb.68: Errichtung / Montageprinzip

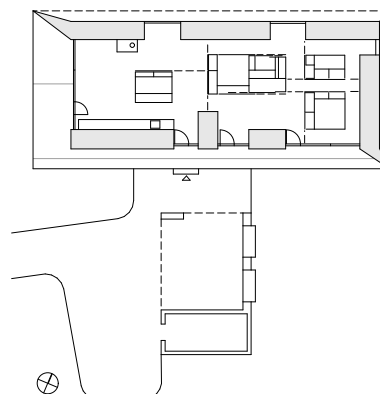


Abb.69: Grundriss M 1:500

- 1 Dachaufbau:
extensive Dachbegrünung in
Ziegelrezyklat
Abdichtung EPDM dreilagig, lose
verlegt
Dreischichtplatte Fichte 27 mm
Hinterlüftung
verschraubte Holzkastenelemente
Fichte
Wärmedämmung Strohballen
700 mm
Dreischichtplatte Fichte 27 mm
- 2 Außenwandaufbau:
Sumpfkalkputz 30 mm
Wärmedämmung Strohballen
120 mm
Lehmputz 30 mm
- 3 Bodenaufbau:
Verbundestrich geschliffen 35 mm
WU-Beton 250 mm
Perimeterdämmung 200 mm
Sauberkeitsschicht Magerbeton
50 mm
Ziegelrezyklat-Schüttung
Pfahlgründung Stahlbeton
- 4 Sockel:
Sockelputz
Perimeterdämmung 140 mm

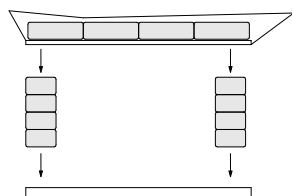
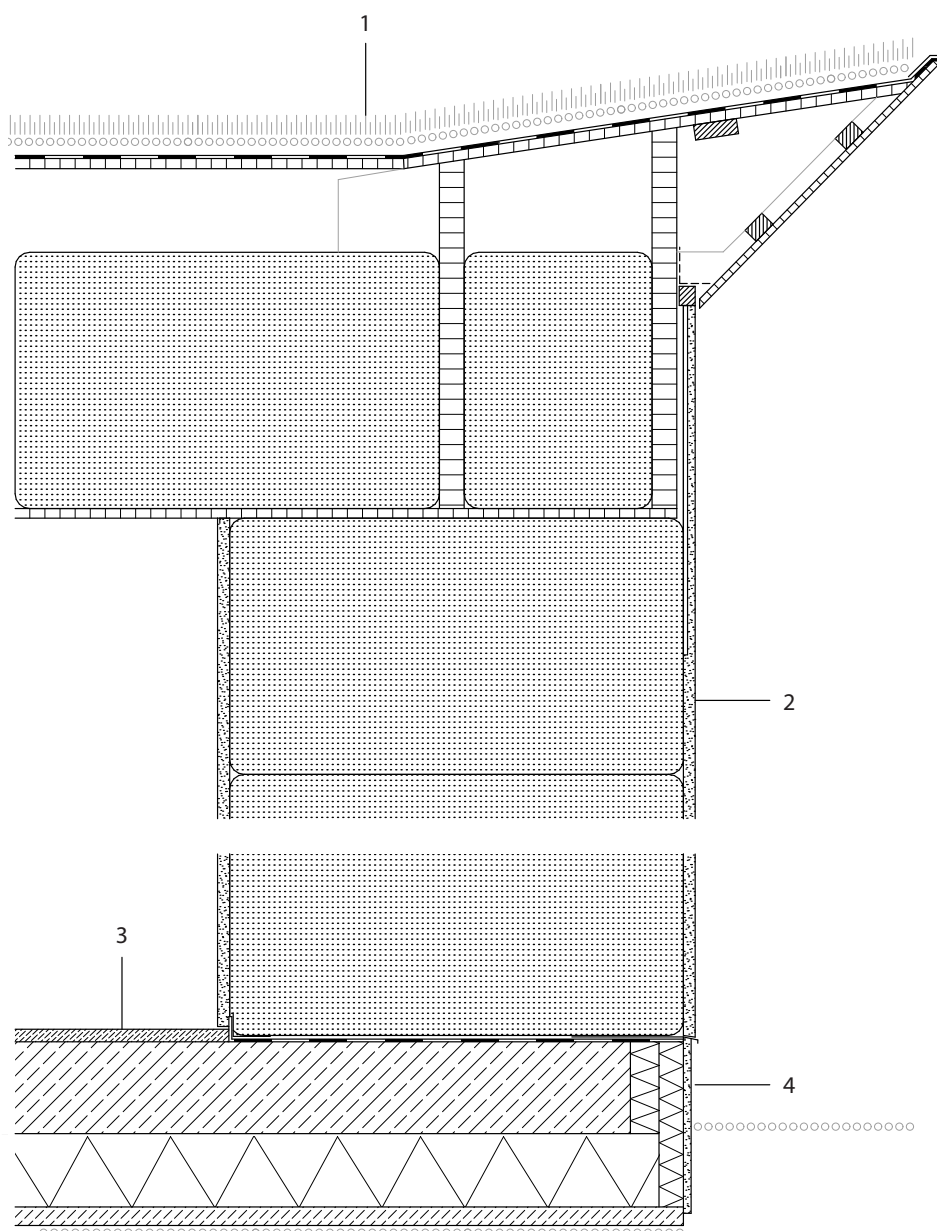


Abb.70: Montageprinzip
Vertikalschnitt M 1:20



Abb.71: Wood Innovation and Design Centre

WOOD INNOVATION AND DESIGN CENTRE

PRINCE GEORGE, CANADA

MICHAEL GREEN ARCHITECTURE

2014

In Kanada entstand 2014 das erste in Holzbauweise errichtete Hochhaus, das heute als Forschungs- und Lehrgebäude für den Bereich Ingenieurwesen und Architektur dient. Bei der Konstruktion handelt es sich um eine Holzskelettbauweise aus regionalen Massivholzprodukten. Verbundkonstruktionen wurden weitgehend vermieden. Aus diesem Grund wurde auch der Erschließungskern aus Holz errichtet. Die Monomaterialität des Gebäudes ermöglicht einen einfachen Rückbau und begünstigt eine Weiterverwertung. Die Befestigung zwischen Holzträger und -stützen erfolgt über, in das Holz eingelassene, Stahlverbindungen. Im Innenraum wurde auf Oberflächenverkleidungen verzichtet, somit bleibt das Holz auf Wänden, Decken und Böden erlebbar. Die Fassade besteht aus geschosshohen Verglasungen und Thermoholz-Verkleidungen an den Festfeldern. Die Deckenstirnen sind mit Alu-Bleichen bekleidet. [236]



Abb.72: Innenraumansicht

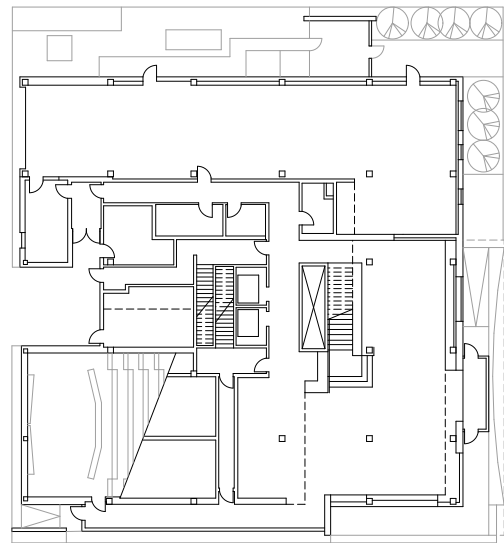


Abb.73: Grundriss M 1:500

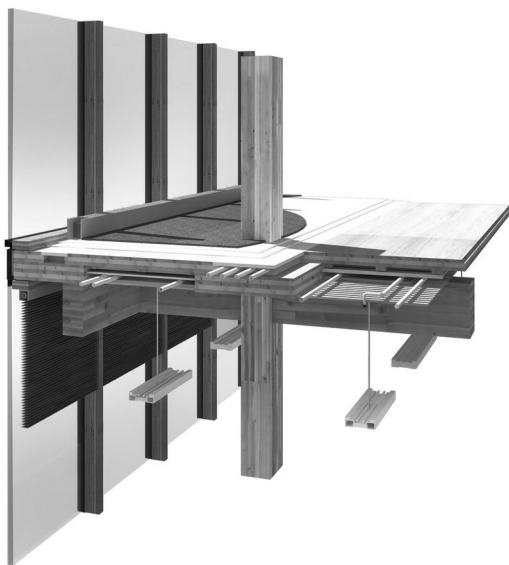


Abb.74: Konstruktionsprinzip

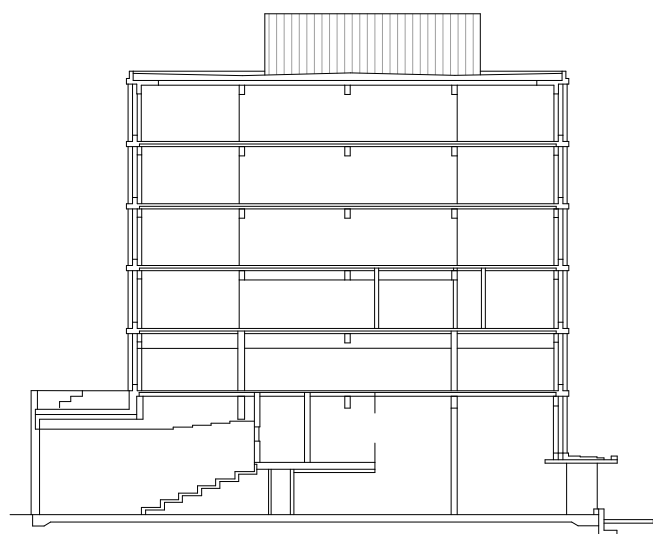


Abb.75: Schnitt M 1:500

6.2 Technischer Kreislauf

Im technischen Kreislauf zirkulieren all jene Materialien, die im Verwertungsprozess hochwertig recycelt werden können. Dazu gehören in erster Linie metallische Materialien, denn sie lassen sich im Prinzip beliebig oft und ohne größeren Qualitätsverlust wieder einschmelzen und raffinieren. Mineralische Baustoffe lassen sich durch die Strategie der Wiederverwendung, und einige wenige Produkte durch die Wiederverwertung, in geschlossenen Kreisläufen halten.

6.2.1 Metallische Materialien

Gebäude mit einem hohen Anteil an Metallbauteilen gelten als urbane Mine schlecht hin. Die hohen Sammel- und Recyclingquoten sind auf den beträchtlichen Wert der Metalle zurückzuführen. In Anbetracht der Tatsache, dass sich Energieaufwände durch Recycling wesentlich verringern, und Umweltbelastungen vermeiden, lassen (s. Metalle, S.35), lohnt sich der Aufwand der sortenreinen Trennung und Wiederverwertung von metallischen Materialien. Um ein Downcycling zu vermeiden, ist auf die sortenreine Sortierung der Schrotte zu achten. Erforderliche Schutzmaßnahmen, wie Korrosionsschutz oder Brandschutz, sind so vorzusehen, dass anschließendes Recycling nicht beeinträchtigt wird.

Stahltragwerke

Stahl gilt als wichtiger Hochleistungsbaustoff für Tragwerke und konnte sich als solcher in der gegenwärtigen Praxis bereits als erfolgreiches Closed-Loop-Material etablieren. Der Schrottanteil für Baustahlprodukte einiger großer europäischer Stahlhersteller liegt bereits bei 70 Prozent. [237] Der große Vorteil von Stahl: Stahlaltschrott kann in einem Prozess des Upcyclings zu neuen beliebig angepassten Produkten mit höherer Qualität werden. So können etwa die Statik oder die Beständigkeit gegen Korrosion des neuen Produktes gesteigert werden. Dies geschieht beispielsweise durch die Verarbeitung zu Edelstahl oder zu wetterfestem Baustahl.

Korrosionsschutz ist dann erforderlich, wenn die umgebende Luftfeuchte 80 Prozent übersteigt und die Temperatur über 0°C liegt. Bei reaktiven Luftverunreinigungen oder dem Vorhandensein von hygroskopischen Salzen (z.B. im Boden) herrscht ebenfalls erhöhte Korrosionsgefahr. Die Lowtech-Methode um Stahl vor dem Korrodieren zu schützen, ist die statische Überdimensionierung. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der tragende Querschnitt bis zum Nutzungsende erhalten bleibt. Bei der Verwendung von Edelstahl oder wetterfestem Baustahl, kann auf zusätzliche Schutzüberzüge verzichtet werden. Der Korrosionsschutz ist diesen Materialien bereits immanent. Sie bilden durch ihre Legierung (Anteile von Chrom, Nickel, Molybdän oder Kupfer) eine Sperrschicht gegen die Korrosivität der Umgebung aus. Weitere Möglichkeiten Stahltragwerke vor Korrosion zu

schützen sind Überzüge und Beschichtungen. Im konstruktiven Stahlbau erfolgt der Korrosionsschutz häufig durch Verzinken (zb durch Feuer- oder Spritzverzinken). Verzinkter Stahl stellt beim Recycling von Altschrott kein Hindernis dar. Zink verdampft beim Einschmelzen, wird über Filter gesammelt und der Zinkgewinnung wieder zugeführt. Organische Beschichtungen hingegen können im Verwertungsprozess flüchtige organische Verbindungen (VOC) freisetzen, deren Gesundheitsrisiken unterschiedliche Ausmaße annehmen können. Ihre Anwendung ist daher nicht unbedenklich.

Die Festigkeit von Baustahl ist stark temperaturabhängig und gefährdet die Standsicherheit des Tragwerks bei zu großen Hitzeentwicklungen. Damit es nicht zum Versagen der Bauteile kommt, benötigen sie unter Umständen besondere Brandschutzmaßnahmen. Ummantelungen oder Bekleidungen aus mineralischen Baustoffen sind gängige brandschutztechnischen Methoden. Für eine sortenreine Rückgewinnung des Stahls sind diese Verkleidungen rückbaubar zu gestalten. Als Alternative zu den kritisch eingeschätzten Dämmschichtbildnern (s. Metalle, S. 35) bieten sich, bei sichtbar eingebauten Stahlteilen, wärmeabführende Brandschutzmaßnahmen an. Dafür werden Stahlhohlprofile mit frei zirkulierendem Wasser verfüllt. Die Methode der Überdimensionierung ist auch für den Brandschutz eine Option. [238]

Gebäudehüllen aus metallischen Materialien

Metallische Materialien eignen sich besonders gut als Fassadenbekleidungen, zumal sie sich in sehr geringen Materialstärken (ca. 1 mm) realisieren lassen, besonders langlebig, pflegefreundlich und wertsteigernd sind. In dieser Hinsicht sind sie vielen anderen Baustoffen überlegen.

Stahl

Außenwand- und Dachbekleidungen aus Metallblechen müssen korrosionsbeständig sein. Wie beim Tragwerk können Stahlbleche auch mit einem Zinküberzug oder einer Kunststoffbeschichtung geschützt werden. Einem Recycling stehen beide Oberflächenvergütungen prinzipiell nicht im Weg, jedoch ist ein 100%iger Wiedergewinnungswert nur bei der Verzinkung garantiert. Fassadenverkleidungen aus Edelstahl oder wetterfestem Baustahl sind aufgrund ihrer oben genannten Eigenschaften besonders empfehlenswert.

Metalle

Ähnlich verhalten sich Bauteile aus Aluminium. Sie bilden durch Kontakt mit der Luft eine natürliche Oxidschicht, die sie vor Korrosion schützt. Weil die natürliche Oxidschicht des Aluminiums sehr dünn und eher unästhetisch ist, werden dem Material zusätzliche Oxidschichten im Eloxalverfahren zugefügt. Beim Eloxieren entsteht durch die Umwandlung der obersten Metallzone ein Aluminiumoxid,

das keramisch hart und fest ist und farblich angepasst werden kann. Für das Recycling von Aluminium ist die Sortenreinheit der unterschiedlichen Qualitäten entscheidend. Je höher die Anzahl der Nebenbestandteile durch mehrfache Recyclingprozesse wird, desto höher die Verluste an Sekundäraluminium. Eine Lösung bieten organische Beschichtungen auf rohem Aluminium. Diese Art des Oberflächenschutzes lässt sich im Verwertungsprozess leichter trennen. Zinkbleche eignen sich besonders gut für Dach- und Fassadenanwendungen, da sie unter Bewitterung einen natürlichen Korrosionsschutz bilden. Sie bestehen zu 99,99 Prozent aus Zink und können in sortenreinem Zustand beliebig oft recycelt werden, ohne Auswirkungen auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Materials. Kupfer ist ein beispielhaftes Closed-Loop-Material und findet nicht nur in Form von Blechen Anwendung, sondern auch als Formteile und Rohre für Wasser- und Heizungsinstallationen. Kupfer und Kupferlegierungen sind beliebig oft zu recyceln. [239]

6.2.2 Mineralische Materialien

Mineralische Bauprodukte finden sich in fast allen Bestandteilen von Gebäuden wieder. Vom Tragwerk und der Gründung, über Außenwandverkleidungen, Bauplatten und Fußbodenkonstruktionen bis hin zu Dämmungen. In der heutigen Baupraxis kommen sie massenhaft zum Einsatz, sind aber aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht eher als problematisch einzustufen. Derzeit werden 80 Prozent aller mineralischen Baustoffe in einem verlustreichen Verwertungsprozess weiterverwertet. Der Rest wird für den Deponiebau und Verfüllungen genutzt oder auf Deponien beseitigt. [240] Die Verwertungsmöglichkeiten mineralischer Baurestmassen sind im Kapitel Verwertung von Baurestmassen, S. 33 aufgelistet. Auf die spezifischen Schwierigkeiten einzelner mineralischer Baustoffe in Bezug auf Kreislauffähigkeit wurde bereits im Kapitel Material, Mineralische Baustoffe S. 30-32, hingewiesen. In diesem Kapitel werden klima- und ressourcenschonende Alternativen behandelt, die auch mineralische Stoffkreisläufe ermöglichen.

Betonrecycling

Dem Recycling von Beton kommt eine ganz besondere Bedeutung zu, wenn man sich vergegenwärtigt, welche Auswirkungen die Herstellung des Primärbaustoffes auf den Planeten hat. Beton besteht aus einer Gesteinskörnung, dem energieaufwendig erzeugten Bindemittel Zement, und Wasser. In zahlreichen Medien wird jüngst berichtet, dass die Zementindustrie mehr CO₂ an die Atmosphäre abgibt, als der gesamte Flugverkehr weltweit. [241] Zudem bringt der rasante Abbau von natürlichen Sandvorkommen für die Herstellung von Beton unsere Ökosysteme ins Ungleichgewicht. (s. Ressourcenverbrauch, S. 13) Daher spielt die Ressourcenschonung des Zuschlagstoffs Kies eine entscheidende Rol-

le. Die Rückgewinnung von RC-Gesteinskörnung ist allerdings noch nicht ausgereift. Die in der Praxis eingesetzten Recyclinganlagen produzieren gebrochenes Material, das Rundkies nur zum Teil ersetzen kann. Ein weiterer Nachteil des gebrochenen Kantkorns sind die entstehenden Hohlräume, die in Folge mehr Zement bedingen. [242]

Mit dem sogenannten *Smart Crusher*, entwickelt von einem niederländischen Tiefbauunternehmen in Zusammenarbeit mit einem Recyclingspezialisten, ist eine Zerlegung von Beton in seine Bestandteile Kies und Zementstein möglich. Neben dem rückgewonnenen Rundkies, der sich für die Herstellung neuen Betons bestens eignet, kann auch der Zementanteil, unter CO₂-Einsparung, recycelt werden. Der Unterschied zu herkömmlichen Brecheranlagen besteht im Umgang mit dem ausgehärteten Zement. Dieser verhindert ein gutes Binden und würde daher den neuen Beton schwächen. Im Smart Crusher wird der Druck, mit dem das Schüttgut zerkleinert wird, so reguliert, dass nur der ausgehärtete Zement zu feinem Pulver zermahlen wird. Sand, Kies und nicht ausgehärteter Zement bleiben dabei unberührt und das Pulver wird mit Ventilatoren aus dem Bauschutt ausgeblasen und getrennt gesammelt. Durch Erhitzen des Zementstaubes auf ca. 1400°C kann er in ungehärteten Zustand versetzt und anschließend wiederverwendet werden. Zwar ist auch dieser Prozess mit hohem Energieverbrauch verbunden, jedoch mit weit weniger als bei der Herstellung von Primärzement. Neueste Experimente gehen in Richtung elektrischer Erwärmung des Pulvers in Mikrowellenöfen. [243]

Zementherstellung

Hinsichtlich der immensen, durch die Zementproduktion verursachten CO₂-Emissionen, entwickeln Forscher und Experten unterschiedliche Ansätze zur Reduktion des Treibhausgases im Produktionsprozess. Der Hauptgrund für den hohen Ausstoß liegt in der Gewinnung von Branntkalk aus dem Grundrohstoff Kalkstein. Zur Erzeugung des bindenden Zements, muss der Kalkstein bei hohen Temperaturen erhitzt werden – dabei entsteht Zementklinker. Bei diesem Prozess wird nicht nur Kohlenstoffdioxid in großen Mengen freigesetzt, es kommen auch größtenteils fossile Energieträger zum Einsatz.

Ein Ansatz der *Sustainable Cements Group* der Princeton-University verfolgt das Ersetzen des Klinkers durch andere zementähnliche Produkte. Auch recycelte Nebenprodukte aus anderen Industrien, wie Stahlschlacke, Flugasche oder bestimmte Tonarten kämen dafür infrage. Behandelt man diese Substanzen mit speziellen chemischen Verbindungen, „können die Pulver reaktiv gemacht werden“ und „können ähnliche Bausteine auf molekularer Ebene bilden, verglichen mit dem, was in Portlandzementbeton vorliegt“, so der Leiter der Gruppe Ingenieur White. Schätzungen zufolge könnte dieses Potenzial die Emissionen im Ver-

gleich zur Herstellung des klassischen Portland-Zements in der Praxis um 40 bis 80 Prozent verringern. [244]

Andere Forschungsprojekte versuchen das CO₂ innerhalb des Systems im Kreislauf zu halten. Gaurav Sant vom UCLA entwickelte dafür eine Produktionsmethode, die auf einem Upcycling des Kohlendioxids beruht. Bei diesem einzigartigen Prozess – *Co2ncrete* genannt – wird das freigesetzte Gas aufgefangen und mit Calciumhydroxid versetzt. Auf diese Weise entsteht erneut Kalk, der für einen neuen Produktionszyklus zur Verfügung steht. Ähnlich entsteht Kalkstein auch in der Natur. [245]

Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen

Einige wenige mineralische Baustoffe können unter Beibehaltung der Ursprungsqualität recycelt und für die Herstellung des gleichen Produkts wiedereingesetzt werden. Nennenswert sind hier zum Beispiel Außenwandbekleidungen aus Glaswerkstoffen, wie Profilbaugläser oder Glaskeramik. Profilbaugläser bestehen aus u-förmigen Gussglas-Bahnen mit Breiten zwischen 200 und 500 mm. Die Glasbahnen eignen sich als hinterlüftete Vorhangfassade, aber auch als wärmedämmende Gebäudehülle, indem zwei oder mehrere Glasbahnen Luftschichtbildend zueinander angeordnet werden. Am Nutzungsende können die Gläser eingeschmolzen und zu 100 Prozent in die Herstellung neuer Profilbaugläser fließen. Glaskeramik ist per se ein Recyclingprodukt, das aus zusammengesinterten Altgläsern hergestellt wird und theoretisch auch wiederverwendet werden kann. Die tafelförmigen Glasprodukte eignen sich als Außenwandbekleidungen, Innenwandbekleidungen im Nassbereich oder Bodenbelag. Kreislauffähig sind auch leichte Bauplatten für den Innenbereich. Lange Zeit galt die Lehmbauplatte als einzig wiederverwertbare Innenwandbekleidung, mittlerweile gibt es auch für Gipskartonplatten Recyclingtechnologien. (s. Gips, S. 34) Dennoch sind Lehmbauplatten eine gute Alternative zu Gipskarton- und anderen Bauplatten, da sie eine besonders positive Wirkung auf Raumklima und Behaglichkeit haben. Das lehmeigene Bindemittel Ton besitzt die Eigenschaft der Reversibilität. Was bedeutet, dass sich Lehmbaustoffe, anders als Kalk oder Gips, in sortenreinem Zustand mit geringem Energieaufwand replastifizieren lassen. Zu den wenigen recyclingfähigen mineralischen Grundstoffen gehört auch Kalk. In Form von Steinen ist der Baustoff gut geeignet für Fassadenbekleidungen. Sofern die rückgebauten Kalksteine sortenrein sind, können sie für die Gewinnung von Baukalk zur Herstellung von reinen Kalkmörteln oder -putzen eingesetzt werden. Mineralische Dämmungen auf Schaumglasbasis (Dämmplatten oder Dämmschotter) werden bei unverklebter und sortenreiner Rückgewinnung aufgemahlen und der Herstellung neuer Schaumglasprodukte bereitgestellt. [246]

Wiederverwendung von mineralischen Baustoffen

Alternativ zum Recycling können *Closed loops* auch mit mineralischen Materialien in Form von Wiederverwendung ganzer Bauteile erzielt werden. Tragwerke oder einzelne Tragwerksteile, beispielsweise aus Beton-Fertigteilen können demontiert und an einem anderen Ort wiederaufgebaut werden. Mineralische Außenwandbekleidungen zeichnen sich durch ihre hohe Materialqualität und Lebensdauer aus und bergen großes Wiederverwendungspotenzial. Gerade Klinkerfassaden sind für eine Wiederverwendung prädestiniert. Sie werden bei Temperaturen von bis zu 1300°C gebrannt und verfügen dadurch über eine deutlich höhere Druckfestigkeit und geringere Wasseraufnahme, verglichen mit Vormauerziegeln oder Ziegelplatten. Auch bei Faserzement und Glasfaserbetonwerkstoffen bietet sich am Nutzungsende eine Wiederverwendung großformatiger Tafeln an. Mineralische Schüttgüter sind im Grunde wiederverwendbar. Recyclingschüttungen sollten, wenn möglich, den im Tagebau unter Landschaftszerstörung gewonnenen Kiesen oder Natursteinschottern vorgezogen werden. [247]

6.2.3 Gebaute Beispiele

Technischer Kreislauf

AUSBILDUNGSZENTRUM GORDOLA

FENSTERFABRIK HAGENDORN

THE NELSON ATKINS MUSEUM OF ART

FRAME MEDIA HOUSE



Abb.76: Ausbildungszentrum Gordola

AUSBILDUNGSZENTRUM BAUMEISTERVERBAND

GORDOLA, SCHWEIZ

DURISCH + NOLLI

2011

Was bei diesem Projekt, aus der Notwendigkeit heraus die Lehrwerkstätten vor den Überschwemmungen des Lago Maggiore zu schützen, umgesetzt wurde, hat zugleich einen ökologischen Mehrwert erzielt. Das Gebäude wurde auf einer Betonplattform aufgeständert, die als Parkplatz- und Lagerfläche unterhalb des Gebäudes fungiert. Fazit: Mit der wertvollen Ressource Boden wurde sparsam umgegangen – die geforderten Außenflächen konnten somit ohne zusätzliche Versiegelungsflächen untergebracht werden. Das reparatur- und rückbaufreundliche Stahltragwerk bildet, zusammen mit der Edelstahlbekleidung von Fassade und Sheddächern, ein kreislauffähiges Bauwerk. Die Installationen wurden bewusst von der Konstruktion getrennt um eine hohe Anpassungsfähigkeit in Bezug auf zukünftige Änderungen in der technischen Entwicklung zu erhalten. Diese Flexibilität erreichen die Architekten, indem sie sorgsam geplante Medien in offenen Trassen vom Tragwerk abhängen. [248]

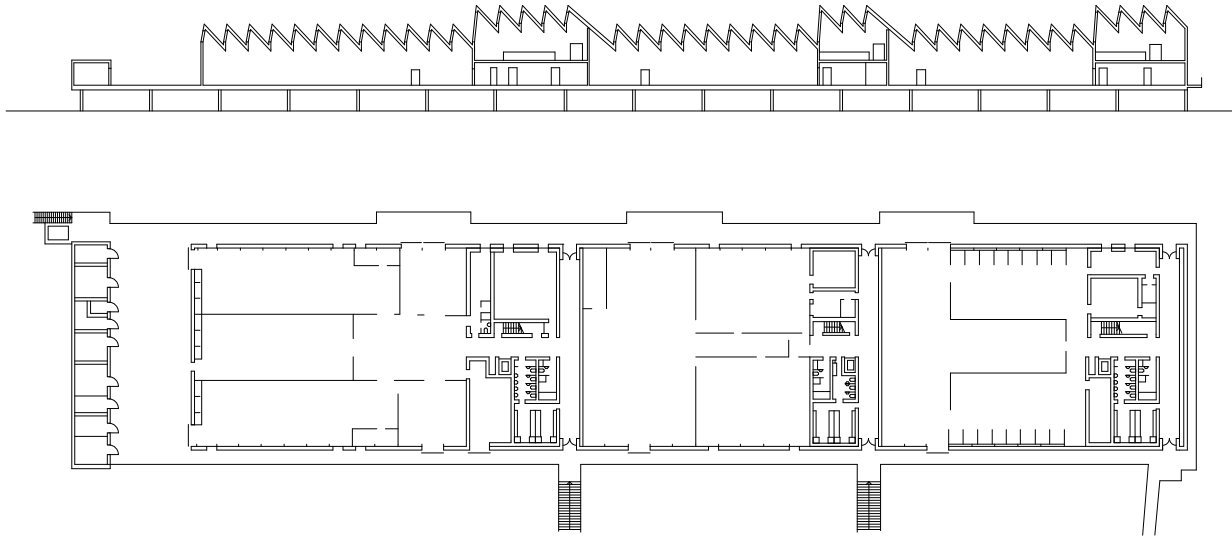


Abb.77: Schnitt und Grundriss M 1:1000



Abb.78: Innenraumansicht Werkstatt



Abb.79: Fensterfabrik Hagendorn

FENSTERFABRIK HAGENDORN

HAGENDORN, SCHWEIZ

GRABER UND STEIGER

2006

Die Werkerweiterung der Fensterfabrik in Hagendorn grenzt unmittelbar an ein Naturschutzgebiet, mit dem der Bau gut in Einklang gebracht wurde. Ein vorgestelltes Rankgerüst sorgt dafür, dass heimische Wildpflanzen das Bauwerk beklettern können, während das Dach als Feuchtwiese und somit als permanente Retentionsfläche konzipiert ist. Das weit auskragende Dach der Produktionshalle schützt die Anlieferzone vor Witterung einerseits, und verschattet konsequent die transluzente, teils transparente Fassade vor sommerlichen Überhitzungen andererseits. Die raumhohe, lichtdurchlässige Gebäudehülle sowie die lichtstreuenden Oberlichtbänder sorgen für maximale Tageslichtausbeute. Die gewählten Materialien sollen die Thematik des Aufeinandertreffens von Wirtschaftsstandort und Landschaft transportieren: Holz und das unbehandelte Kupfer am Dachrand bilden mit der Zeit eine natürliche Patina, wohingegen das Stahltragwerk und die Kunststoffhülle keine Anzeichen auf aufweisen. [249]

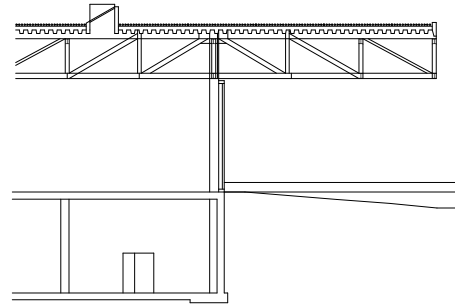


Abb.80: Innenansicht Halle Fensterfabrik

Abb.81: Schnitt M 1:400

- 1 Dachaufbau:
Begrünung aus heimischen Wild-
pflanzen
Vegetationsschicht Aushubmate-
rial und Ziegelsplitt 120 mm mit
permanentem Wasserstau 50 mm
Drainagematte 30-40 mm
Wurzelschutzschicht
Abdichtung Bitumen mehrlagig
Trennlage
Wärmedämmung 2 x 100 mm
Dampfsperre (Halleninnenseite)
Trapezblech lackiert 111 mm
Stahlfachwerk mit Nebenträger
Stahl-Walzprofile lackiert
- 2 Anslusselement Blech 1 mm
lackiert, ausgedämmt
- 3 Lüftungsklappenelement Holz
lackiert, ausgedämmt
Befestigung über Winkelanschlus-
sblech lackiert
- 4 Pfosten-Riegel-Konstruktion Lär-
che unbehandelt mit Abdeckleiste
Lärche
Füllung Polycarbonat-Kammerplat-
te transluzent, 80 mm
Stütze Stahl-Walzprofil lackiert
Befestigung über Winkelanschlus-
sblech lackiert

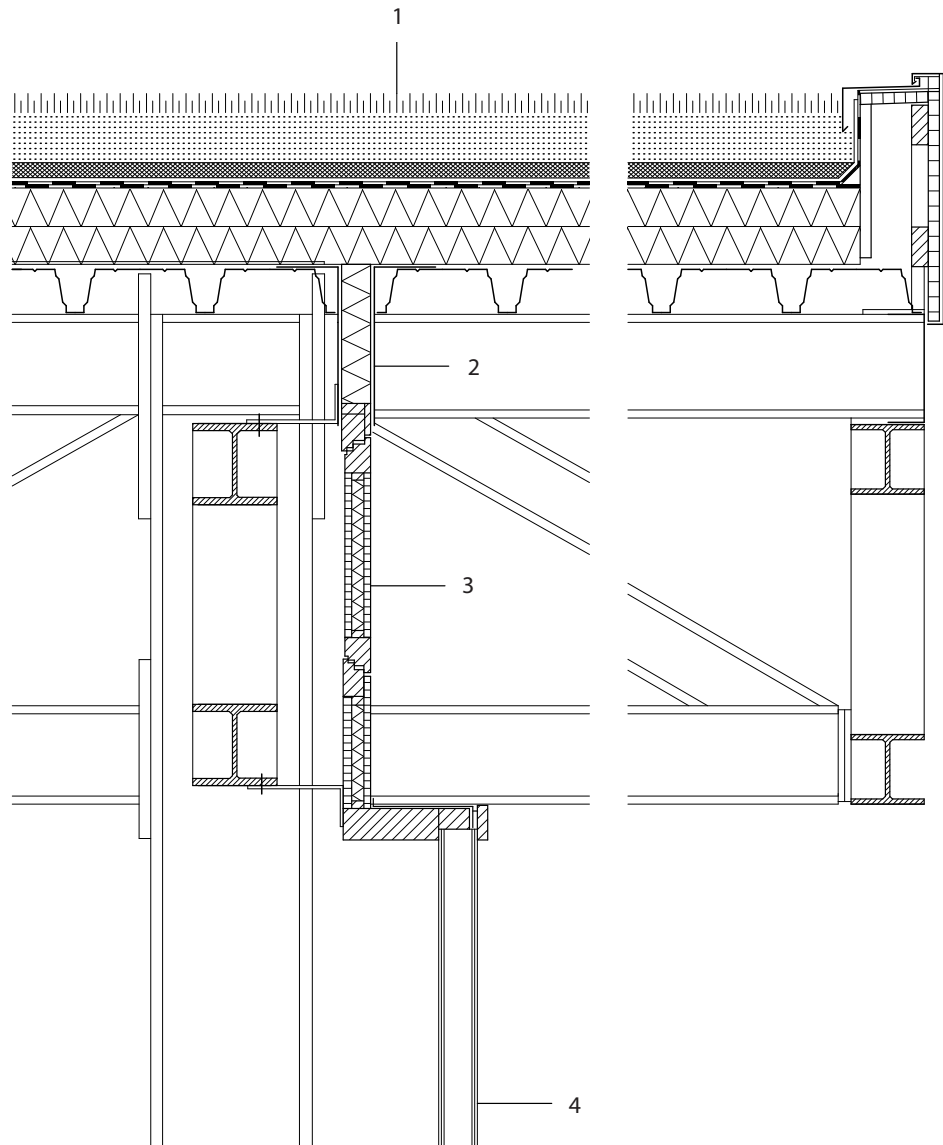


Abb.82: Vertikalschnitt M 1:20



Abb.83: *The Nelson Atkins Museum of Art*

THE NELSON-ATKINS MUSEUM OF ART

KANSAS CITY, USA

STEVEN HOLL ARCHITECTS

2007

Aus der Topografie der großen Rasenfläche steigen mehrere zweigeschossige Glaskuben empor. Dieser oberirdisch sichtbare Teil des Gebäudes beherbergt nur einen geringen Teil der Nutzfläche, die sich hauptsächlich unterhalb der Rasenfläche des umgebenden Parks befindet und befördert das Tageslicht über schaufelförmige Raumelemente in das untere Geschoss. Die transluzenten Baukörper werden durch eine Stahlkonstruktion gestützt. Die Gebäudehülle besteht aus geschosshohen Profilbaugläsern. Die zweischaligen Glasbahnen sind in einem Aluminiumrahmen mit dazwischenliegenden Kapillarplatten, für gute Lichtstreuung und Wärmedämmung, befestigt. Die Kapillarplatten bestehen aus kleinen Acrylglasröhrchen mit werkseitig aufgebrachttem Glasvlies und werden punktuell mit Silikon an den Profilbaugläsern fixiert. Alle Fassadenteile sind sortenrein trennbar und recyclingfähig. [250]

- 1 Außenwandaufbau:
 Profilbaugals u-förmig mit reduzi-
 ziertem Eisenanteil, geätzte Textur,
 beschichtet 57/400/10 mm
 Kapillareinlage Röhrchen aus
 PMMA glasvlieskaschiert 24 mm
 Luftschicht 27 mm
 Profilbauglas u-förmig mit redu-
 ziertem Eisenanteil, sandgestrahlt
 57/400/6 mm in Aluminiumrah-
 men 110 mm
 Stahlrost verzinkt
 Stahlrohr abgehängt 100/100 mm
 Stahlstäbe 19 mm
 Sonnen-/Lichtschutz
 Verglasung VSG 2 x 9,5 mm , innen-
 seitig geätzt

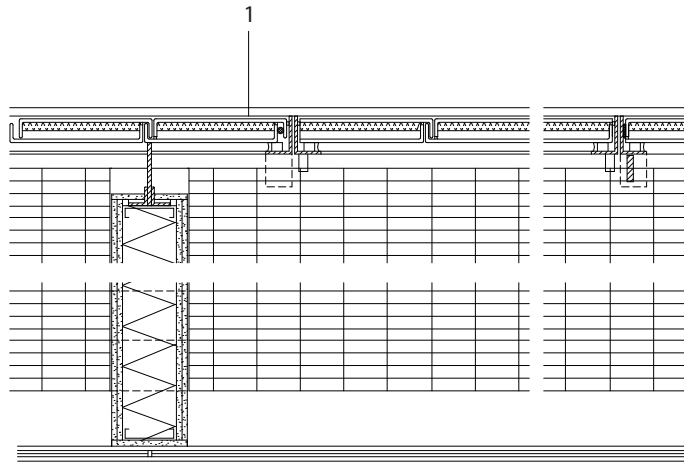


Abb.84: Horizontalschnitt M 1:20

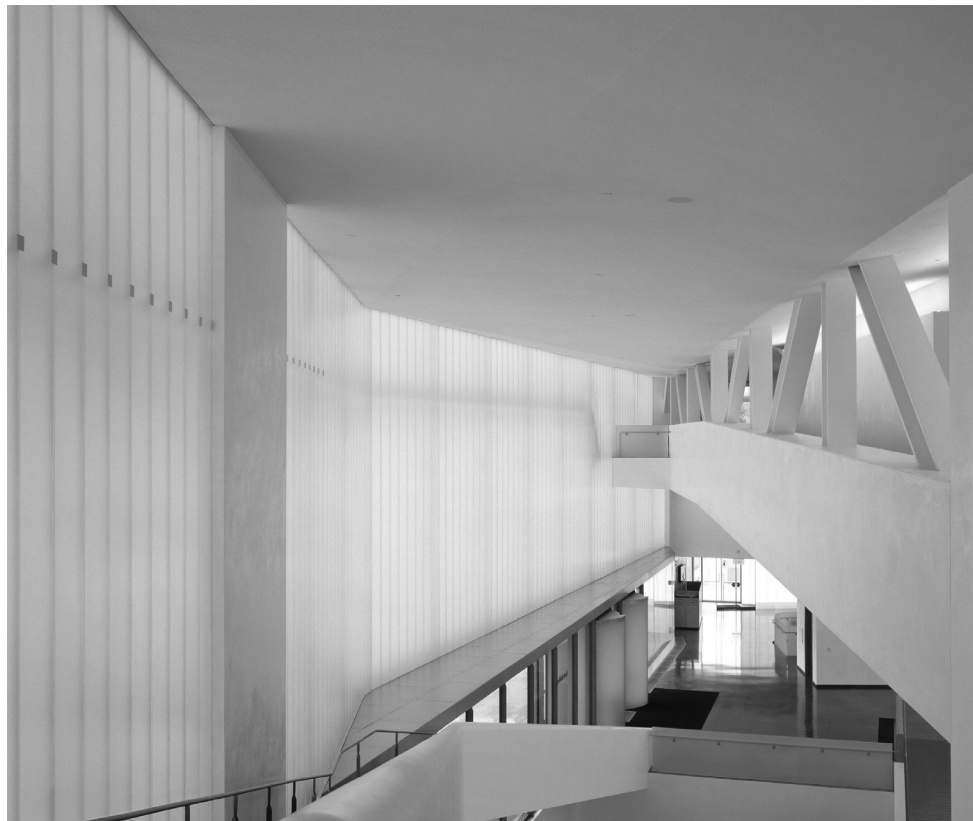


Abb.85: Innenraumansicht The Nelson Atkins Museum of Art



Abb.86: Frame Media House

FRAME MEDIA HOUSE

BRÜSSEL, BELGIEN

BAUKUNST BRÜSSEL + BRUTHER PARIS

2017

Das Multimediagebäude in der belgischen Hauptstadt, sticht besonders wegen seiner, auf allen vier Seiten unterschiedlichen, Fassadenansichten hervor. Die Architekten verlagern das Tragwerk und die Erschließungskerne des Bauwerks nach außen und erhalten somit ein Maximum an Offenheit und Flexibilität auf allen Geschossebenen. Dadurch wird nicht nur die Optimierung des Grundrisses erleichtert, sondern auch das Nachnutzungspotenzial des Gebäudes enorm gesteigert. An der Nordfassade werden die Geschossdecken durch sieben vorgefertigte T-förmige Betonstützen gestützt. Südseitig bildet eine hochgezogene Stahlrahmenkonstruktion eine transparente Fassade, die sich nach außen öffnet und Sichtbeziehungen zur Umgebung herstellt. Die Stahlrahmen im Raster von 7,5 x 7,5 Metern sind diagonal ausgesteift und lagern auf geschosshohen Betonstützen im Erdgeschoss auf. Die Installationsebene wurde in die Geschossdecken verlegt, somit sind auch diese, wie der Rest der Konstruktion, weitgehend reparatur- und rückbaufreundlich. [251]

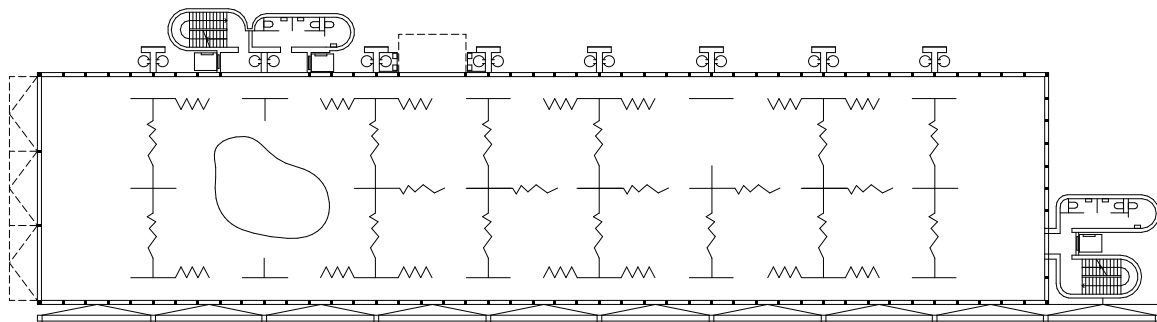


Abb.87: Grundriss M 1:500



Abb.88: Südfassade - Stahlrahmenkonstruktion auf Betonstützen im Erdgeschoss, 7,5 x 7,5 m Raster mit Aussteifungselementen

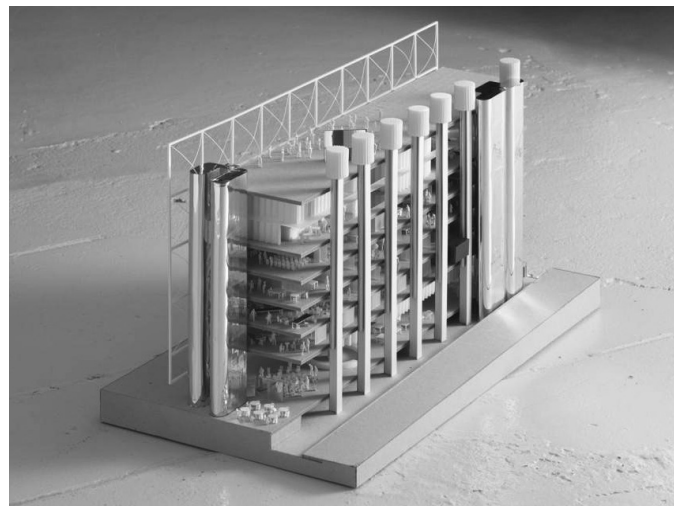


Abb.89: Nordfassade - vorgefertigte Stahlbetonstützen (T-Form)

6.2.4 Gebaute Beispiele

Technisch-biotischer Kreislauf

EUROPÄISCHE SCHULE FRANKFURT

WATTERNMEERZENTRUM RIBE

BÜROGEBÄUDE ST.JOHANN



Abb.90: Europäische Schule Frankfurt

EUROPÄISCHE SCHULE

FRANKFURT AM MAIN, DEUTSCHLAND

NKBAK

2015

Wie ein temporärer Bau, der eine Genehmigung für fünf Jahre erhielt, sieht dieses Gebäude nicht aus. Die Schulerweiterung wurde, alternativ zu den herkömmlichen Containerbauten, in vorgefertigter Raumzellenbauweise errichtet. Die Module entsprechen einer Klassenraumtiefe von neun Metern und einer Breite von drei Metern. Je drei Module bilden einen quadratischen Klassenraum. Zur Fertigung der Raumzellen wurde Brettspertholz und hochbelastbares Furnierschichtholz aus Buche verwendet. Die Oberflächen im Innenraum sowie Fenster und Haustechnik sind bereits werksmäßig integrierter Bestandteil einer Raumzelle. Vor Ort wurden lediglich die Bodenbeläge verlegt und die Aluminiumfassade montiert. Die Fluchtwegsituation wurde so gewählt, dass auf Brandschutzanstriche in den Aufenthaltsräumen verzichtet werden konnte. Beim Rückbau kann die Aluminiumfassade, auch ökonomisch profitabel, einem technischen Verwertungskreislauf zugeführt werden. Die Raumzellen können durch die Strategie der Wiederverwendung vorerst im Kreislauf gehalten werden, ehe das Holz schließlich in einer Kaskadennutzung endet. [252]

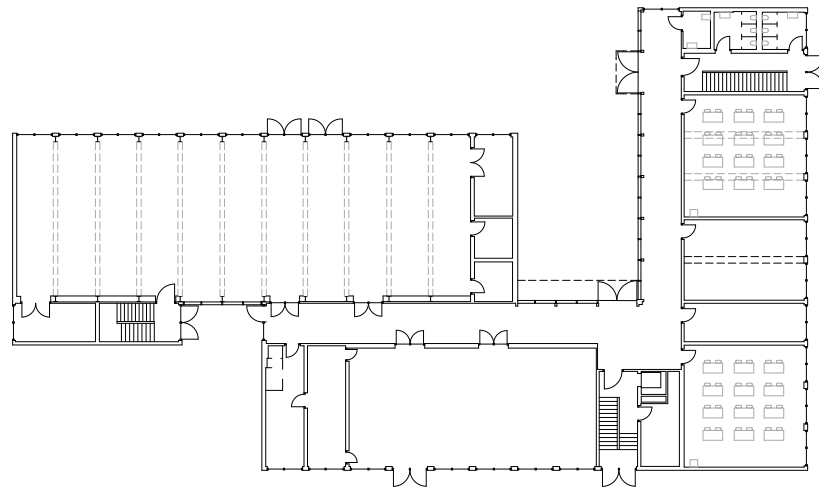


Abb.91: Grundriss M 1:500

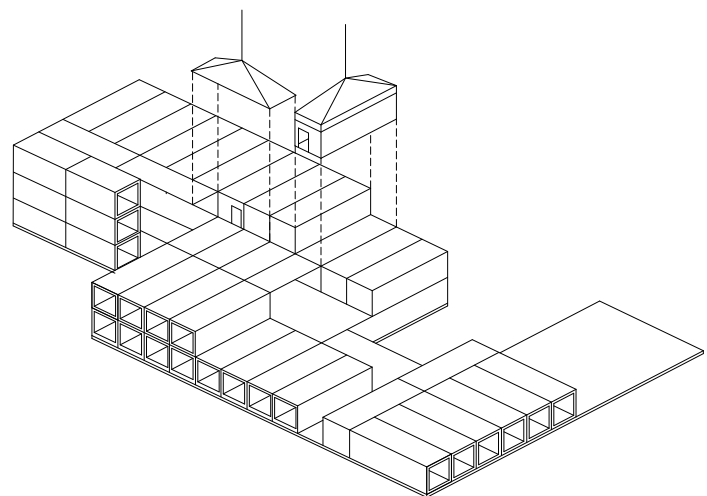
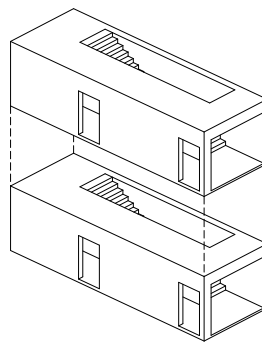


Abb.92: Innenraumansicht und Montage der Module

Abb.93: Montageprinzip Modulbau



Abb.94: Wattenmeerzentrum Ribe

WATTENMEERZENTRUM

RIBE, DÄNEMARK

DORTE MANDRUP

2017

An der Westküste Dänemarks werden Bauernhöfe, topografie- und witterungs- bedingt, vorwiegend als geschlossene Anlage mit windgeschütztem Innenhof gebaut. Bei der Sanierung und Erweiterung des Wattenmeerzentrums wurde diese Typologie beibehalten, in dem der Rohbau des Bestandes zum überwiegenden Teil erhalten blieb. Eine neue Außenbekleidung aus grau lasierten Robinienholzplatten bedeckt das zweischalige Mauerwerk sowie das Stahltragwerk des Bestandes. Für das neue Tragwerk wurde das Closed-Loop-Material Stahl verwendet, während das Sekundärtragwerk aus Holz und somit biotischer Natur ist. Der südlich vom Bestand gelegene Erweiterungsbau wurde als reiner Holzbau ausgeführt und genauso wie das sanierte Bestandsgebäude mit Reet eingedeckt. [253]

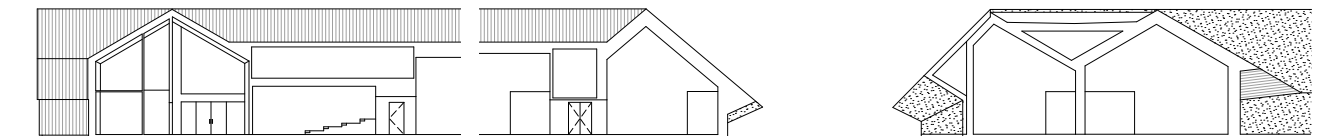


Abb.95: Längs- und Querschnitt M 1:500

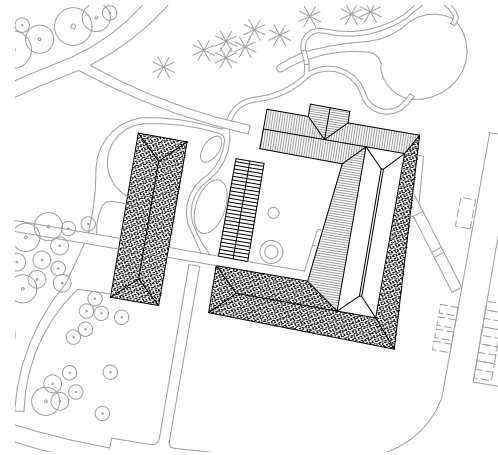
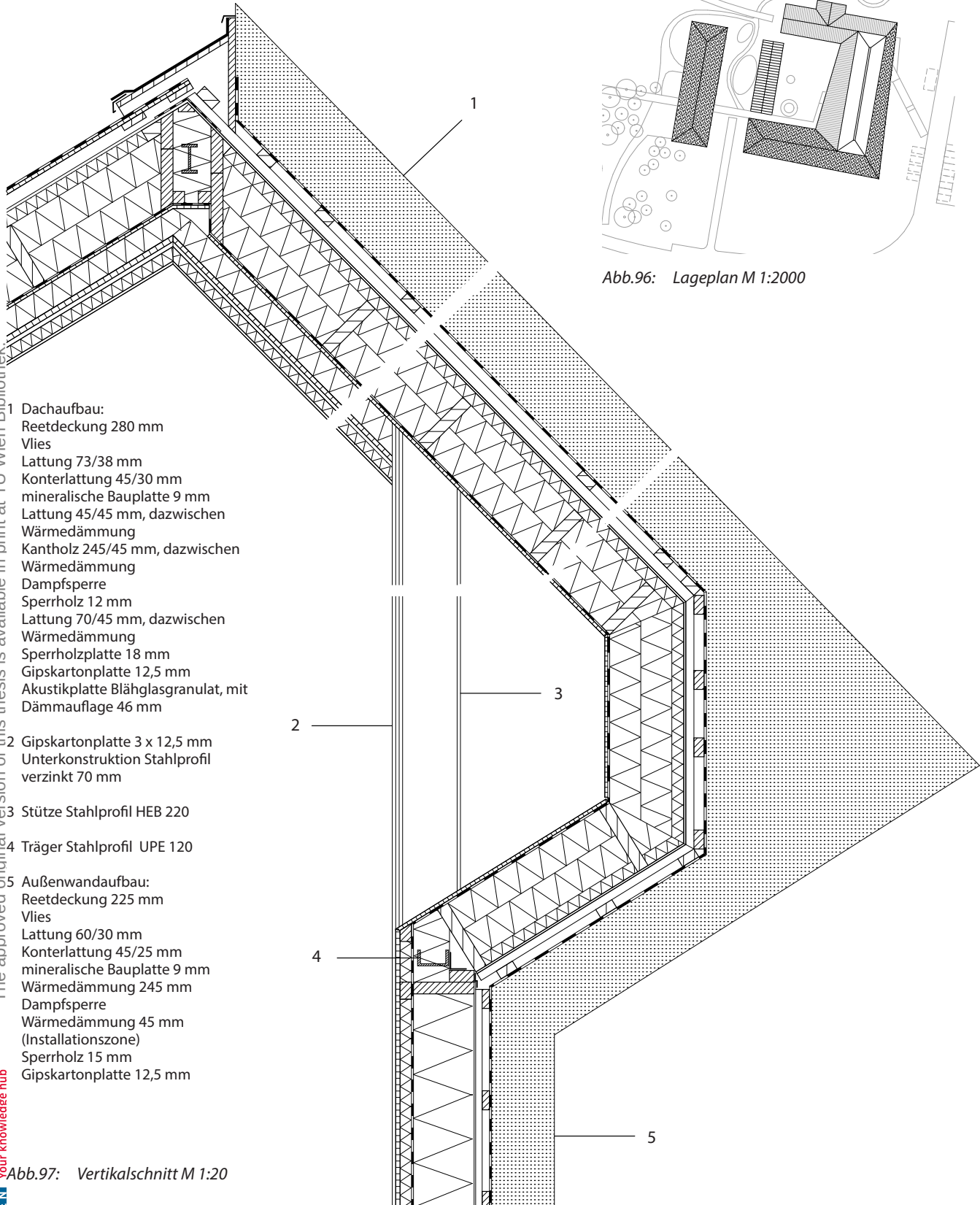


Abb.96: Lageplan M 1:2000



- 1 Dachaufbau:
Reetdeckung 280 mm
Vlies
Lattung 73/38 mm
Konterlattung 45/30 mm
mineralische Bauplatte 9 mm
Lattung 45/45 mm, dazwischen
Wärmedämmung
Kantholz 245/45 mm, dazwischen
Wärmedämmung
Dampfsperre
Sperrholz 12 mm
Lattung 70/45 mm, dazwischen
Wärmedämmung
Sperrholzplatte 18 mm
Gipskartonplatte 12,5 mm
Akustikplatte Blähglasgranulat, mit
Dämmauflage 46 mm
- 2 Gipskartonplatte 3 x 12,5 mm
Unterkonstruktion Stahlprofil
verzinkt 70 mm
- 3 Stütze Stahlprofil HEB 220
- 4 Träger Stahlprofil UPE 120
- 5 Außenwandaufbau:
Reetdeckung 225 mm
Vlies
Lattung 60/30 mm
Konterlattung 45/25 mm
mineralische Bauplatte 9 mm
Wärmedämmung 245 mm
Dampfsperre
Wärmedämmung 45 mm
(Installationszone)
Sperrholz 15 mm
Gipskartonplatte 12,5 mm

Abb.97: Vertikalschnitt M 1:20



Abb.98: Bürogebäude St.Johann

BÜROGEBÄUDE ST.JOHANN

ST.JOHANN, TIROL, ÖSTERREICH

ARCHITEKTURWERKSTATT BRUNO MOSER

2015

Das in St. Johann realisierte Bürogebäude zeugt durchwegs von einer zukunftsorientierten Architektur. Basierend auf einem Modulsystem, richtet sich der Holzrahmenbau nach den maximalen Maßen einer OSB/4-Platte von 2,80 x 11,40 m. Aufgrund des konstruktiven Konzeptes kann das Gebäude in kürzester Zeit errichtet, später demontiert und an einem anderen Ort wiederaufgebaut werden. Um den größtmöglich auftretenden Lastfall aufnehmen zu können, wurden die Querschnitte der Elemente nach dem Prinzip der Überdimensionierung angefertigt. Dieser Mehraufwand lässt sich durch die Effizienz des Vorfertigungsgrades ausgleichen. Die Decken sind als einfach konstruierte Holzkastenelemente mit integriertem Installationsraum ausgeführt und liegen lediglich punktgelagert auf Brettschichtholzstützen auf. Die auskragenden, kupferbekleideten Deckenplatten dienen als Brandschutzüberschlagsbarriere und sind zugleich Verschattungselement der raumhohen Verglasungen. Das werthaltige Material Kupfer ist auch in Form von gefalteten Lochblechen als Fassadenbekleidung zwischen den Gesimsen zu finden. [254]

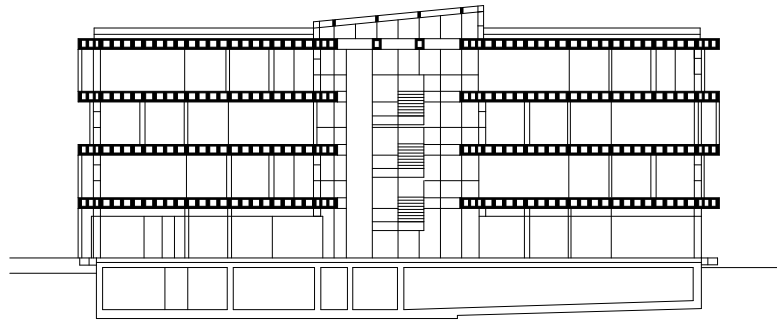


Abb.99: Schnitt M 1:500

- 1 Geschossdeckenaufbau:
Bodenbelag
Trittschalldämmung 10 mm
OSB-Platte Nut und Feder 18 mm
OSB-Platte Nut und Feder 32 mm
OSB/4-Deckplatte 30 mm
Träger Brettschichtholz
200/520 mm
Zwischenraum mit Leitungsfüh-
rung
Splittschüttung 60 mm
OSB/4-Deckplatte 30 mm
Gipskartonplatte 2 x 20 mm
Abhängung Leitungsführung
500 mm
OSB/4-Platte weiß lasiert 18 mm

- 2 Heizungsauslass

- 3 Holz-Aluminium-Fenster mit Drei-
fachverglasung

- 4 Lattenrost Lärche unbehandelt
Abdichtung EPDM
OSB-Platte 30 mm
Träger Brettschichtholz 100/300-
320 mm, OSB/4-Deckplatte farblos
lasert 4 x 30 mm

- 5 Kupferblech gekantet
Trennlage
OSB-Platte 30 mm

- 6 Außenwandaufbau:
Lattung Lärche vertikal 85/44 mm
Lattung Lärche rombenförmig
85/44 mm
Fassadenbahn diffusionsoffen
Holzfaserdämmplatte (feuerrobust)
Nut und Feder 32 mm Holzbalken
60/280 mm, dazwischen Wärme-
dämmung 2 x 140 mm
OSB/4-Deckplatte weiß lasiert
22 mm

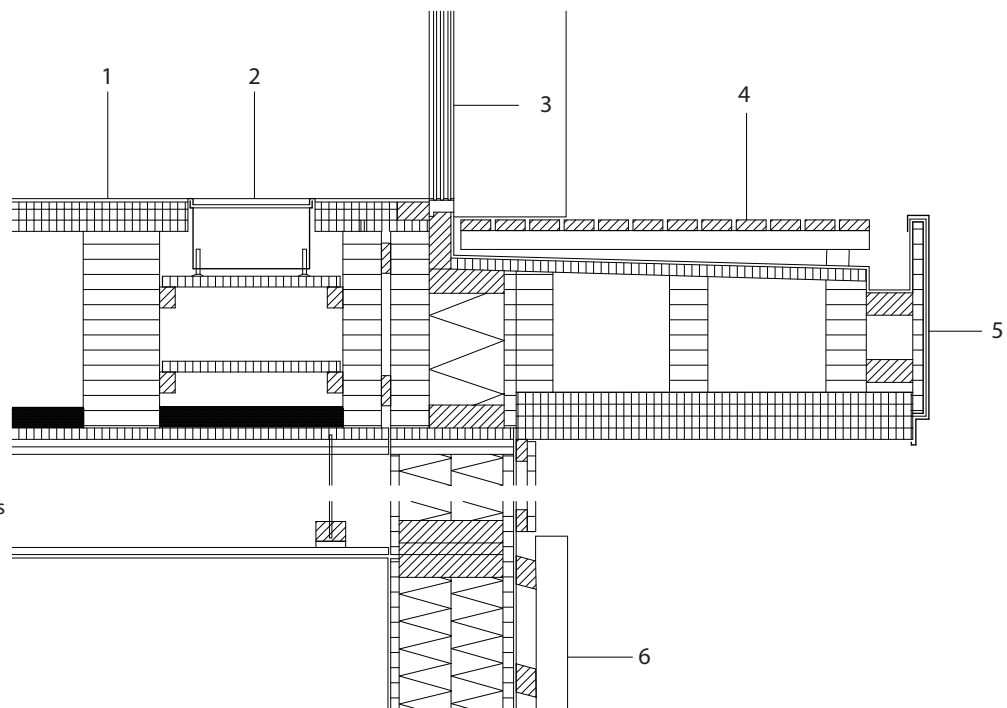


Abb.100: Vertikalschnitt M 1:20

6.2.5 Gebaute Beispiele

Materialkreisläufe durch Re-Use

UPCYCLE HOUSE

VILLA WELPELOO



Abb.101: Upcycle House

UPCYCLE HOUSE

NYBORG, DÄNEMARK

LENDAGER GROUP

2013

Das Upcycle House ist das Ergebnis eines Experimentes zur Untersuchung unterschiedlicher Ansätze nachhaltiger Bauweisen. Mit einem maximierten Anteil an wiederverwendeten und rezyklierten Materialien verursachte die Herstellung des Upcycle House 86 Prozent weniger CO₂-Emissionen als die eines konventionellen Gebäudes. Es kamen Materialien zum Einsatz, die in einem früheren Gebäude bereits das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht hatten, aber auch solche die nicht dem Bauwesen entstammen. Einige der umgesetzten Ideen sind projektspezifische Lösungen, die sich nur beschränkt oder gar nicht auf andere Projekte übertragen lassen. Dennoch wurden auch Recyclingbaustoffe eingesetzt, die bereits gängige Praxis sein könnten. Nicht alle der verwendeten Materialien besitzen ein unendliches Kreislaufpotenzial, die Nutzung bestehender Baustoffe, über das ursprüngliche Nutzungsende hinaus, schont jedoch Ressourcen. So wurden etwa gebrauchte Fenster oder Fenster aus der Fehlproduktion, Recyclinggips, Fliesen aus gebrauchtem Altglas oder gebrauchte Wasserkannister für den Bau des Upcycle House herangezogen. [255]

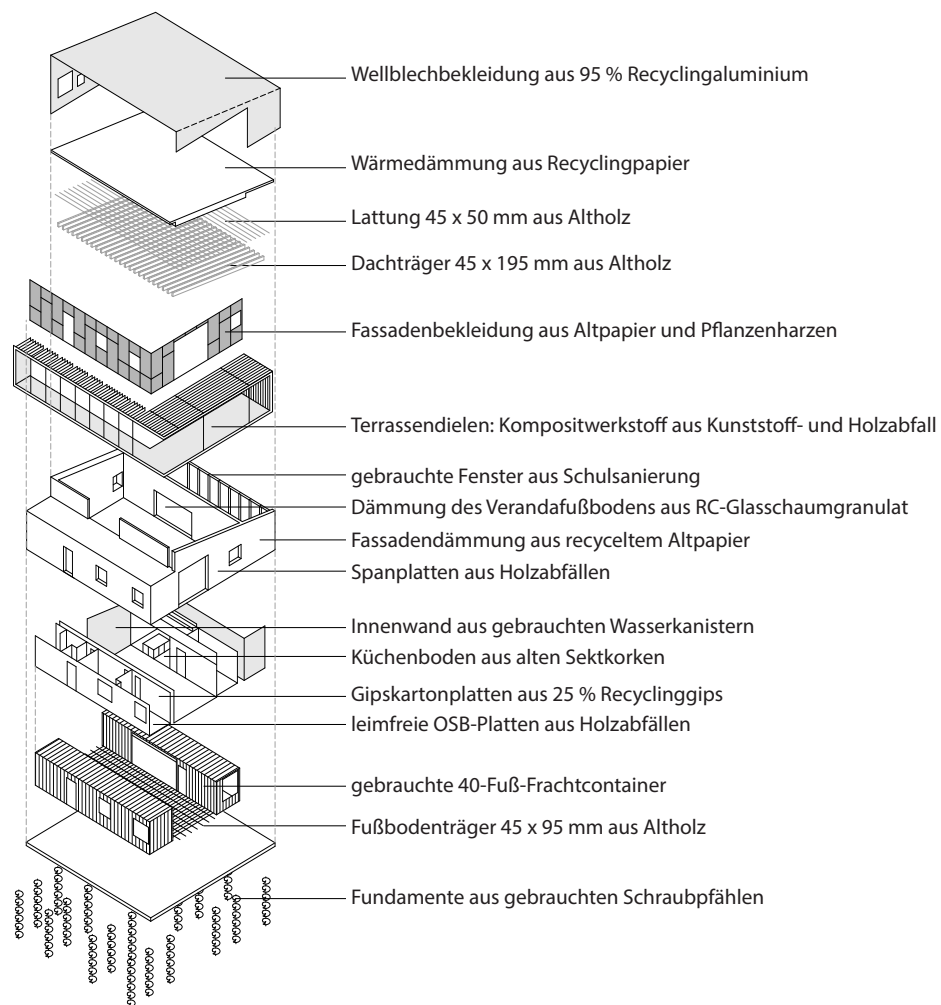


Abb.102: Explosionszeichnung





Abb.104: Villa Welpeloo

VILLA WELPELOO

ENSCHEDA, NIEDERLANDE

2012 ARCHITEKTEN

2010

Für den Bau der Villa Welpeloo verwendete man Recyclingmaterialien aus der näheren Umgebung des ehemaligen Textilindustriestandorts Enschede. Was einst Teil einer Textilmaschine war, bildet heute das Tragwerk der Villa in Form von verschraubten Stahlträgern. Die Fassade wurde aus den Holzbrettern alter Kabeltrommeln gefertigt. Um die Haltbarkeit zu erhöhen, wurden die Hölzer vor dem Einbau einer Wärmebehandlung zugeführt. Zum Schutz des Hirnholzes und als Gliederungselement der Fassade wurden gekantete Blechstreifen horizontal eingebaut. Die EPS-Dämmplatten aus einem rückgebauten Industriebau konnten für die Dämmung der Außenwände verwendet werden. Die Villa Welpeloo weist, aufgrund der kurzen Transportdistanzen und des hohen Grades an Wieder- und Weiterverwendung bereits existierender Baustoffe, eine enorme Ressourcenschonung und CO₂-Reduktion auf. [256]

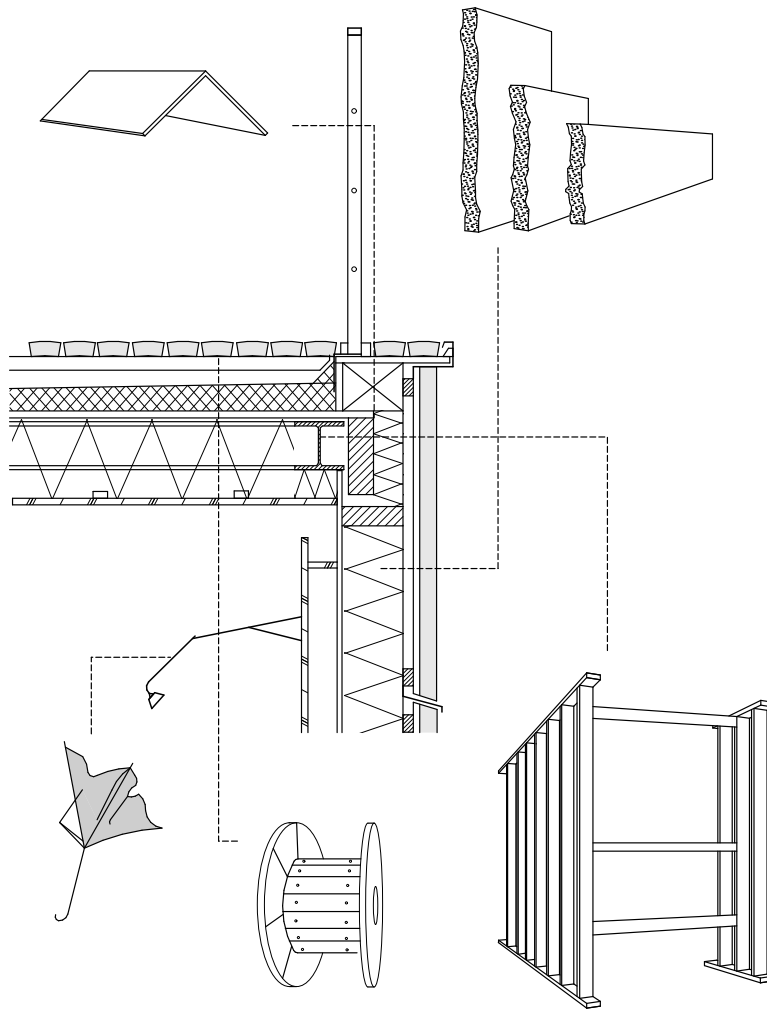


Abb.105: Konzeptdarstellung Re-Use-Bauteile

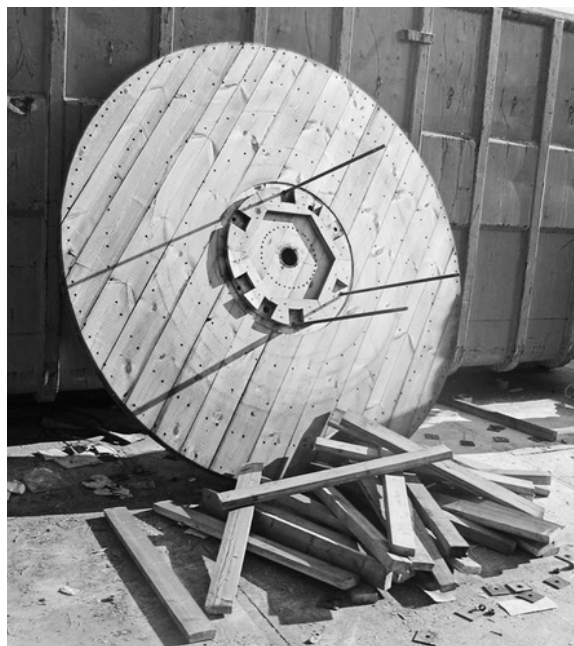


Abb.106: Fassadenbretter aus alten Kabeltrommeln

6.3 Bauen mit lokalen Ressourcen

Zur Minimierung der im Kapitel Bauabwicklung, S. 49 aufgezeigten, durch Erd- und Rohbauarbeiten verursachten Umweltbelastungen, werden hier konkrete Maßnahmen genannt. Eine On-site-Rohstoffgewinnung kann die Potenziale einer Baustelle maximal ausschöpfen. Aus einem dem Bauvorhaben vorangehenden Abbruch einerseits und dem Aushub des Erdbaus andererseits, lassen sich lokal Ressourcen generieren. Inwiefern die Wiederverwertung der vorliegenden Abbruchmassen zulässig ist, beurteilt eine Schad- und Störstofferkundung. Abfallrechtliche und geotechnische Gutachten bestimmen die Qualität und Verwertbarkeit des Aushubs.

Böden können, je nach Bodenklassifikation, für bautechnische Zwecke gemäß ÖNORM B 4400-1 und DIN 18 196 verwertet werden. Die lokale Verwertung von Bodenaushub entlastet die Deponien, schont die Gewinnungsstätten und verringert den Baustellenverkehr wesentlich. Böden die sich nicht bautechnisch verwerten lassen, finden oft Anwendung in der Geländemodellierung oder der Wiederverfüllung am Bauplatz. Für den Einsatz im Freiraum ist besonders bei bindigen Böden und nährstoffreichen Oberböden eine Aufbereitung notwendig. Auch hierfür können, je nach Verfügbarkeit, Abbruchmaterialien wie Ziegelbruch und andere wasserhaltende Leichtzuschläge (z.B. Blähton oder Porenbeton) zur Verbesserung der Bodeneigenschaften eingesetzt werden. Unter entsprechender Zugabe von Recyclingfraktionen entstehen aus den Böden Vegetations- und Dachsubstrate mit hoher Wasserspeicherfähigkeit. Substrate aus wiederverwendetem Ziegelbruch ermöglichen eine direkte Versickerung und längere Speicherung des Wassers am Grundstück. Das Sekundärmaterial schont nicht nur Ressourcen, sondern reagiert zugleich auch auf die zunehmenden klimatischen Veränderungen wie Erderwärmung und Starkregenereignisse. [257]

Die Verwertung lokaler Materialien macht allerdings nur Sinn, wenn auch die Aufbereitung vor Ort stattfindet und keine Transportwege anfallen. Kontrollierte Stoffströme sind vor allem bei Großbaustellen die Grundvoraussetzung für eine ökoeffiziente Bauabwicklung. Die Einbindung lokaler Ressourcen in das Bauge-schehen erfordert eine umweltwirksame Material- und Baustellenlogistik. Wie die lokalen Ressourcenlager Bestandsgebäude und Baugrund bereits erfolgreich in der Praxis genutzt werden konnten, zeigen folgende Großprojekte der österreichischen Hauptstadt Wien.

Das Wiener Modell

Mit 10.000 Neubauwohnungen jährlich gilt Wien als eine der am schnellsten wachsenden Städte Europas. Kostengünstiges Bauen und bezahlbarer Wohnbau

sind bereits seit Jahrzehnten traditionelle Werte der Wiener Wohnbaupolitik. Um diese Werte trotz rasantem Wachstum auch weiterhin zu sichern, gibt es das sogenannte Wiener Modell, dessen wesentliches Instrument die Bauträgerwettbewerbe sind. Das System der Bauträgerwettbewerbe basiert auf einem Vier-Säulen-Modell: soziale Nachhaltigkeit, Architektur, Ökologie und Ökonomie. [258] Einen Teil der Qualitätssicherung bildet der zukunftsorientierte Umgang mit Ressourcen. Nachhaltige Strategien sollen vor allem dem Klimawandel und seinen Folgen – wie z.B. zunehmenden Starkregenereignissen und anhaltenden Trockenperioden – entgegenwirken.

Der Bauabwicklung kommt dabei eine Schlüsselfunktion zu. Mit den RUMBA (= Richtlinien für umweltfreundliche Baustellenabwicklung) verfolgt die Stadt Wien, zusammen mit Partnern aus der Bauwirtschaft, eine gesteigerte Ökoeffizienz in der Baudurchführung. Die Maximierung von Verwertungsquoten und die Reduktion von Emissionen in der Baubranche erfordern ein nachhaltiges Massenstrommanagement. [259] Dieses beinhaltet ein On-site-Recycling, das nur durch ausführliche Planung der Stoffströme in maximalem Ausmaß möglich ist.

Um die Materialströme planerisch zu erfassen, ist eine vorausgehende Analyse der Stofflichkeit erforderlich. Die zu erwartenden Abbruchmaterialien aus dem Bestand können mit BIM (= Building Information Modeling) sowohl in stofflicher als auch mengenmäßiger Dimension ermittelt werden. Je nach Verwertbarkeit des Materials kann es nach dem Rückbau vor Ort aufbereitet und in der Regel als technisches Schüttmaterial, Straßenunterbau, Drainagematerial und Zuschlag für Substrate eingesetzt werden. Die potenzielle Verwertbarkeit von Bodenaushuben lässt sich auch anhand der Beurteilungen aus den geotechnischen und abfallrechtlichen Gutachten mittels BIM prognostizieren. Mobile Brecher- und Ortbetonanlagen können Kies und Sand aus dem Baugrubenaushub direkt vor Ort zu Beton weiterverarbeiten. Dafür wird der gewonnene Kiessand abgesiebt (Trocken- oder Nassaufbereitung), gebrochen und als Betonzuschlag klassifiziert. Kies aus der Trockenabsiebung eignet sich nur für 50 Prozent der im Hochbau eingesetzten Betonmischungen, während gewaschene Zuschlagfraktionen für die Herstellung sämtlicher Betongüteklassen verwendet werden kann. [260]

Seestadt Aspern

Mit 240 Hektar zählt die Seestadt zu den größten Stadtentwicklungsprojekten Europas. Die Umsetzung eines derartigen Bauvolumens erfordert eine ausgefeilte Planung und Abwicklung logistischer Dimensionen. Dafür gründete die Projektentwicklungsgesellschaft eine Logistiktochter, die von Beginn an mit einer intelligenten Baulogistik für den sparsamen Einsatz von Ressourcen und die Umweltverträglichkeit auf allen Baufeldern sorgt. Eine Maßnahme zum Massenausgleich war beispielsweise das Anheben der Geländehöhe beim Straßenbau.

Anstatt zukünftige Kellergeschosse ganz auszugraben, wurden einfach Straßendämme errichtet und der notwendige Aushub somit um die Hälfte reduziert. Der Mittelpunkt des neuen Stadtteils ist der See, der hier auch als Materiallager genutzt wurde. 600.000 Tonnen Kies aus dem Seeaushub konnten vor Ort aufbereitet und verbaut werden. Die Aushubmaterialien wurden für den Straßenbau oder als Betonzuschlag verwertet. Die Ortbetonanlage konnte den Gesamtbedarf an Ortbeton in sämtlichen Güteklassen decken. Dazu wurde ausschließlich lokaler Kies im Nassverfahren aufbereitet und als Zuschlagstoff verwendet. Aus einer Fallstudie geht hervor, dass für den Bau der ersten 3.000 Wohnungen mehr als eine Million Tonnen Material vor Ort in die Aufbereitung gegangen sind. Trotz des hohen logistischen Aufwands zeichneten sich durch die Transport- und Rohstoffeinsparungen Kostenvorteile ab.

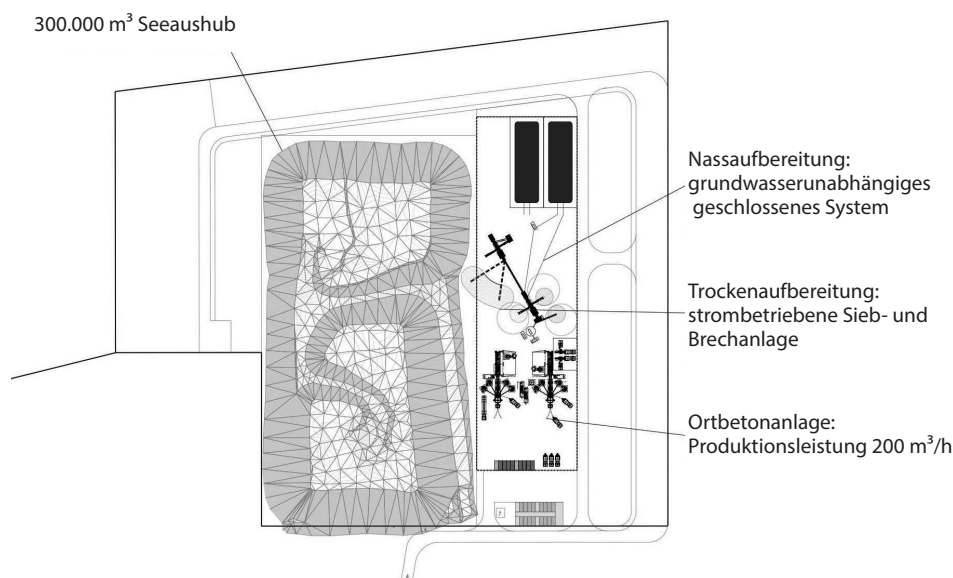


Abb.107: Ortbetonanlage Seestadt Aspern

Biotope City

Auf dem Areal eines ehemaligen Produktionsstandortes in Wien Favoriten bildet das Wohnprojekt „Biotope City“ – ganz im Gegensatz zur ursprünglichen Bebauung – ein durchgehend begrüntes Wohnquartier. Auf einer Fläche von 50.000 m², die zuvor flächendeckend versiegelt und mit Produktionshallen bebaut war, sorgt der Neubau von 1.000 Wohnungen für eine relativ hohe Wohnungsdichte. Dennoch reagiert die „Gartenstadt“ mit maximaler Begrünung von Fassaden und Dächern auf die zunehmende Verstädterung und die Folgen des Klimawandels. Durch den hohen Anteil an Pflanzen wird der Feinstaub gebunden und die

Sommerhitze erträglicher. [261] Für ein nachhaltiges Regenwassermanagement kann die Retentionsfähigkeit der Pflanz- und Bodensubstrate, teilweise mit vor Ort gewonnenem Sekundärmaterial, erhöht werden. Beispielsweise werden in Recyclinganlagen Dachsubstrate aus den Hauptbestandteilen Kompost und Ziegelsplitt hergestellt. [262] Die Universität für Bodenkultur Wien begleitet das Projekt auf wissenschaftlicher Ebene. Eines der Forschungsprogramme hat die Erarbeitung einer „Bauanleitung für die grüne Stadt der Zukunft“ zum Ziel. [263]

Der Rückbau der Produktionsstätte gab einem Kooperationsnetzwerk aus sozialökonomischen Betrieben den Anlass hier ein Pilotprojekt zu starten. Zentrales Ziel des Projektes war eine Wertschöpfung mit der Rückgewinnung von Re-Use-fähigen Bauteilen aus dem Bestand. Unter anderem konnten die XPS-Platten des Hallendaches demontiert und zwischengelagert werden. Allerdings kam das ausgebaute Material nicht wie gewünscht im Neubau zum Einsatz, sondern musste weiterverkauft werden.

Bauen mit lokalen Materialien ist aber auch im kleinen Maßstab möglich und sinnvoll. Bei kleineren Bauvorhaben sind die Anforderungen an die logistische Planung vergleichsweise gering. Wie folgende zwei Projekte zeigen, bieten lokale und regionale Rohstoffe eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Baustoffen.

6.3.1 Gebaute Beispiele

Lokale Materialien

WOHNHAUS RAUCH

WOHNHAUS FLURY



Abb. 108: Wohnhaus Rauch

WOHNHAUS RAUCH

SCHLINS, ÖSTERREICH

BOLTSHAUSER ARCHITEKTEN

2008

Das Wohn- und Atelierhaus liegt auf einer schmalen Parzelle oberhalb der Ortschaft Schlins in Vorarlberg in einer steilen Süd-Hanglage. Es entstand aus der architektonischen Absicht ein ökologisches Gebäude aus ausschließlich natürlichen Materialien zu errichten. Der monolithische, fast skulpturenhaft wirkende Baukörper ist zu 85 Prozent aus dem Hang gebaut. Aus dem Aushub gewonnener Lehm diente als Grundmaterial vom Fundament bis zum Dach. An der Fassade ist die Herstellung der Stampflehmwände in Schichten gut erkennbar. Die aus lokalem Lehm gebrannten Ziegelplatten wurden im Ort hergestellt und so aufeinander gestapelt, dass die horizontale Struktur bei Schlagregen als Erosionsbremse dient. Gedämmt werden die Außenwände innenseitig mit nachwachsendem und kompostierbarem Schilfrohr, das mit feinkörnigem Lehmputz bekleidet ist. Fein geschliffen und seidig glänzend hat der Stampflehm Boden eine terrazzoähnliche Wirkung. Lediglich bei den Stürzen musste mit Stahlträgern oder Stahlarmierungen nachgeholfen werden. Der Kreislaufgedanke wurde hier konsequent umgesetzt. Der Aushub wurde nicht entsorgt, sondern als lokales Baumaterial genutzt, das am Nutzungsende, nach Ausbau der technischen Elemente, wieder in den Hang zurückgeführt werden kann. [264]

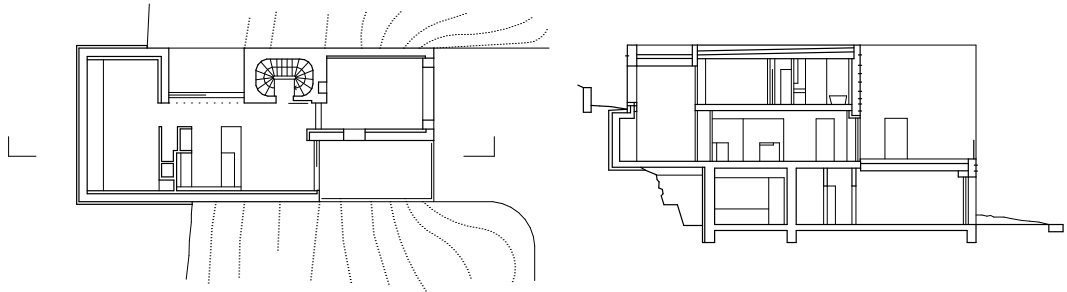


Abb.109: Schnitt und Grundriss M 1:400

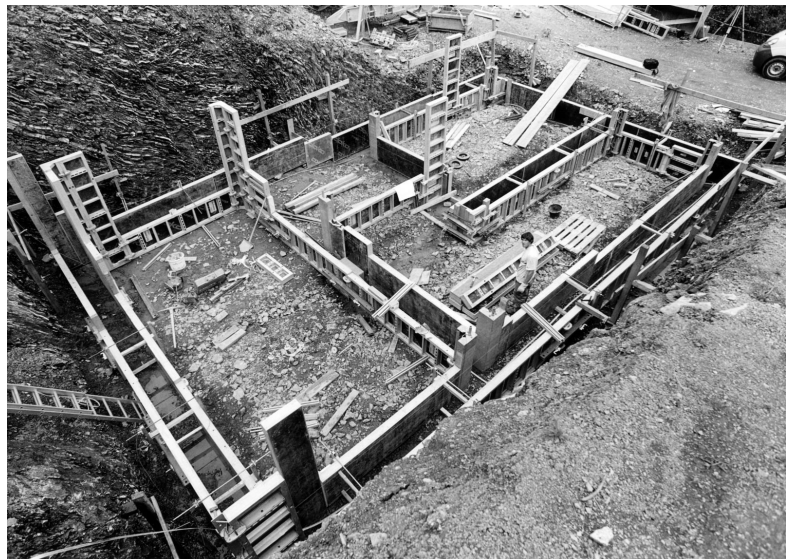


Abb.110: Baustellenfoto - Errichtung Lehmwände



Abb.111: horizontale Struktur der Lehmwände



Abb.112: Wohnhaus Flury

WOHNHAUS FLURY

DEITINGEN, SCHWEIZ

SPACESHOP ARCHITEKTEN

2009

Der Charakter des Wohnhauses wird vor allem durch die regionale Herkunft und die Naturbelassenheit der Bauteile bestimmt. Aus alten Grab- und Abbruchsteinen von Mauern und Brücken wurden die Natursteine für die Kellerwände gewonnen und unbearbeitet mit Trasskalkmörtel vermauert. Das Holz für das Tragwerk stellte der dorfeigene Wald zur Verfügung. Aus einer benachbarten Baugrube wurde Lehm zur Herstellung der Wände in Wellerbauweise gewonnen. Die Dach- und Bodendämmung stammt von den Feldern Deitingens: Zu Ballen gepresstes Stroh wurde unbehandelt zwischen die Balken geklemmt. Das autarke Dasein des Gebäudes spiegelt sich in seinen natürlichen Kreisläufen wider. Ein Stückholzherd erzeugt die Wärme und eine Solaranlage den Strom. Ein bestehender Quellwasseranschluss versorgt das Haus mit Frischwasser. Zur Entsorgung der Fäkalien kommt ein Kompost-WC zum Einsatz. Eine Sandpflanzen-Filteranlage sorgt dafür, dass anfallendes Grauwasser gereinigt wird um anschließend in der benachbarten Gärtnerei zum Gießen der Pflanzen wiederverwendet zu werden. [265]

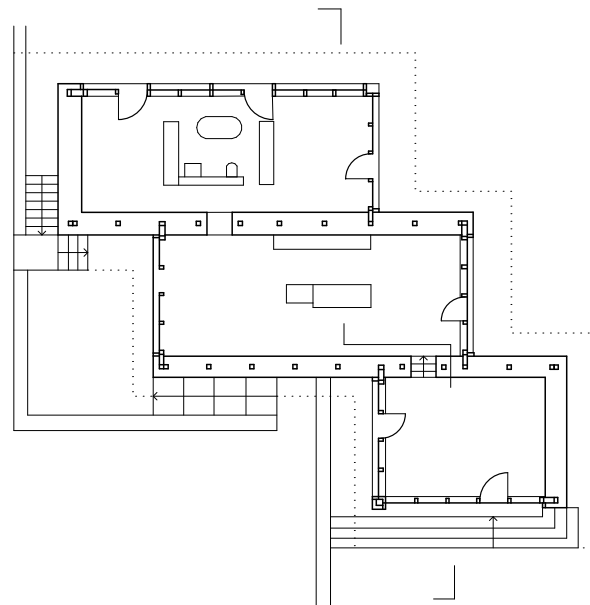
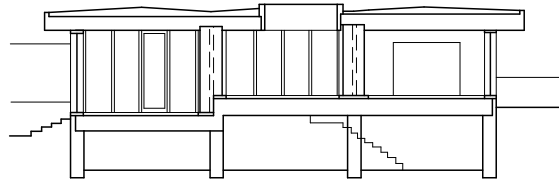


Abb.113: Schnitt und Grundriss M 1:250



Abb.114: Innenraumansicht



Abb.115: Baustellenfoto - Errichtung der Wände in Wellerbauweise



7.

BIM als Planungsinstrument

7.1 Gebäudeplanung mit BIM

7.2 Rückbauplanung mit BIM

7.3 Aktuelle Forschungsfelder im BIM

7. BIM als Planungsinstrument

7.1 Gebäudeplanung mit BIM

Zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen ist es erforderlich alle Informationen eines Bauwerks in einer gemeinsamen Datenbank zu sammeln. Eine solche Datenbank bietet bislang nur das *Building Information Modelling* in Form eines digitalen Datenmodells, das alle relevanten Gebäudedaten während des gesamten Lebenszyklus integriert und vernetzt. BIM ist somit nicht nur ein Instrument für die Konzeption, Planung und Realisierung eines Projektes, sondern auch für die Nutzungsphase und den Rückbau.

Um ein konsequentes Recycling zu ermöglichen, ist es wichtig, dass baustoffbezogene Informationen möglichst detailreich im Modell transportiert werden. Erstrebenswert ist die Entwicklung von digitalen Standards, die mit konsequenter Prozessmodellierung von Bauprodukten und deren Lebenszyklen, recyclingrelevante Informationen bereitstellen. Eine derartige Anwendung von BIM ist derzeit nicht möglich, weil die vorhandenen Datenprofile nicht ausreichend detailliert sind. In dieser Hinsicht ist die Optimierung zusätzlicher Informationsgrundlagen für eine BIM-basierte Kreislaufwirtschaft im Bauwesen entscheidend. [266]

Einer Umfrage der Universität Innsbruck zufolge, beschränkt sich die Anwendung von BIM auf nur 28 Prozent der österreichischen Unternehmen. Experten schätzen den Anteil mit 10 bis 15 Prozent sogar deutlich geringer ein. Unter den planenden Unternehmen ist der Anteil der BIM-Nutzer am höchsten. Das Interesse der ausführenden Baufirmen an digitalen Veränderungen ist hingegen eher gering. Zum einen ist das auf die gängige Wahrnehmung von BIM als Planungstool zurück zu führen und zum anderen auf das fehlende Informationsangebot zur BIM-Nutzung im Baubetrieb. [267] Auch im Nachbarland Deutschland wählen nur 15 Prozent der Unternehmen bislang die BIM-Arbeitsmethode. [268] Lediglich in skandinavischen Ländern ist BIM bereits etablierte Praxis im Bauwesen. Dass Dänemark, Norwegen oder Finnland zu den Spitzenreitern Europas zählen, ist kein Zufall. In diesen Ländern ist der Einsatz von BIM bei öffentlichen Projekten bereits seit einigen Jahren gesetzlich verankert. [269] Zunehmend orientieren sich auch andere europäische Länder an diesen Vorbildern. Eine allgemeine Zunahme von BIM-Anwendern im Bauwesen ist in den kommenden Jahren jedenfalls zu erwarten.

7.2 Rückbauplanung mit BIM

Vom Rückbau und Baustoffrecycling betroffen sind momentan vor allem Bestandsgebäude, die nicht digital erfasst sind. Ohne Wissen über die Mengen und räumlichen Gegebenheiten ist ein geordneter, verwertungsorientierter Rückbau aber kaum möglich. Daher müssen Objekte durch oft mühseliges Ausmessen manuell im BIM-Programm erstellt werden. Den digital erstellten Bauteilen werden rückbauspezifische Eigenschaften und gegebenenfalls Produktdaten zugewiesen. Aufgrund mangelnder Datengrundlage können Baustoffmengen meist nur mit einem gewissen Grad an Genauigkeit ermittelt werden. Liegen keine exakten Angaben zu den verbauten Produkte vor, müssen Annahmen getroffen werden. Als Demonstrationsbeispiel können künstliche Mineralfasern (KMF) herangezogen werden: Das spezifische Gewicht von KMF liegt, je nach Produkt, bei Steinwolle zwischen 22-200 kg/m³, bei Glaswolle zwischen 20-153 kg/m³. [270] In diesem Fall kann ein Mittelwert herangezogen werden, der das Ergebnis allerdings um den Faktor 5 verfälschen kann.

Für die Rückbauplanung ist eine solche Annäherung meist nicht ausreichend aufschlussreich. Insbesondere Schad- und Störstoffe können nur durch eine Erkundung genau identifiziert und anschließend in einem darauf basierenden BIM-Modell quantifiziert werden. Der Vorteil eines digitalen Modells liegt darin, dass einzelne Bestandteile bzw. Bauteilschichten präzise ausgewertet werden können. Die vorangehende Schad- und Störstofferkundung läuft auf ein Rückbaukonzept hinaus, welches ein Mengengerüst über die zu erwartenden Stoffströme liefert. Die Auswertung kann anschließend als Verwertungsmatrix fungieren, welche Qualitäten und etwaige Anwendungsbereiche der Recyclingmaterialien festlegt. Aber auch bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bauteilen dient das BIM-Tool als Hilfestellung. So können Elemente, die im Zuge der Erkundung als potenziell Re-Use-fähig dokumentiert wurden, auch als solche im 3D-Modell gekennzeichnet werden. Die mengenmäßige Erfassung und die Dimensionierung dieser Teile sind für die Vermarktung bzw. weitere Verwendung maßgebend.

Am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der Technischen Universität Wien werden derzeit anthropogene Rohstofflager im Zuge eines europaweiten Forschungsprojektes inventarisiert. Als anthropogene Quellen werden zunächst Gebäude, Mülldeponien und feste Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen herangezogen, um dann eine Methode zur Klassifizierung von Sekundärrohstoffen zu entwickeln. Mit dem Ziel urbane Rohstoffkarten und Gebäudekataloge zu erstellen, müssen ganze Gebäude erfasst und in 3D-Modellen nachgebaut werden. Die Gebäude werden anschließend nach Bauperiode, Nutzung und Volumen klassifiziert. [271] Anhand des Baujahres

kann etwa festgestellt werden, welche Schadstoffe im Gebäude enthalten sein könnten oder um welche Art von Konstruktion es sich handelt. Grundsätzlich gilt: Je moderner das Gebäude, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit Verbundkonstruktionen vorzufinden, deren sortenreine Trennung schwierig und somit eine Wiederverwertung der Gebäudebestandteile eingeschränkt ist.

7.3 Aktuelle Forschungsfelder im BIM

Auf dem Gebiet der Bestandsaufnahme werden neue Werkzeuge, welche auf eine möglichst präzise 3D-Modell-Rekonstruktion abzielen, entwickelt. Softwarelösungen und Vermessungswerkzeuge wie Photogrammetrie oder Laserscanning, in Kombination mit einer entsprechenden Erfassungssoftware, können in Zukunft das aufwändige Ausmessen und manuelle Erstellen von Objekten in einem 3D-Programm ersetzen.

Photogrammetrie

Die Photogrammetrie, auch „Bildmessung“ genannt, ist ein passives (berührungsloses) Fernerkundungs- und Vermessungsverfahren, das es ermöglicht, aus Fotografien und Messbildern eines realen Objektes, ein digitales 3D-Modell zu generieren. Die zu erfassenden Objekte werden bei natürlichen Lichtverhältnissen von außen und innen aus möglichst vielen verschiedenen Winkeln und Blickpunkten aufgenommen. Spezielle Messkameras erfassen dabei sowohl Mess- als auch Bilddaten, die in einer weiterverarbeitenden Software automatisch abgeglichen und zu einer Punktwolke zusammengefügt werden. Ein Nachteil ist, dass die Qualität des digitalen Modells stark von der Qualität der angefertigten Fotos abhängt. Außerdem müssen Bauteil- und Baustoffeigenschaften in einem weiteren Schritt manuell ergänzt werden, um entsprechende Auswertungen treffen zu können. Zwar kann die Punktwolke mit semantischen Daten verknüpft werden – bei Wänden beispielsweise ist das relativ einfach – jedoch gestaltet sich die Verknüpfung bei anderen Bauteilen wie Stützen, Unterzügen oder gar komplexeren Elementen eher schwierig.

Laserscanning

Beim Laserscanning werden Oberflächen oder ganze Körper mit einem Laserstrahl vermessen. Dabei überstreicht ein Laserscanner den zu erfassenden Körper bzw. Raum zeilen- oder rasterförmig. Komplexe Geometrien werden rasch und präzise erfasst und auf Basis der dreidimensionalen Messdaten bildlich dargestellt. Die aufgenommenen 3D-Daten (= Punktwolken) liefern exakte Ausgangsdaten für eine Visualisierung und können mit verschiedenen Programmen weiterbearbeitet und mit anderen Punktwolken zusammengeführt werden. Diese Art der Vermessung kann derzeit nur die Geometrien des Baukörpers aufzeichnen. Informationen zu einzelnen Bauteilen und -stoffen müssen nach wie

vor manuell in das digitale Modell integriert werden.

Um Gebäude in Zukunft genauso wirtschaftlich und vorausschauend beurteilen zu können wie Goldminen oder Erdölfelder, ist das Sammeln und Aufbereiten von Informationen über die anthropogenen Rohstofflager dringend erforderlich. Derzeit gibt es dafür noch keine groß angelegte Datenbank, sämtliche Gebäudebestände müssen nachträglich in BIM-Programmen modelliert und evaluiert werden. Die Forschung ist in dieser Hinsicht allerdings bereits weit fortgeschritten und könnte schon bald intelligente Werkzeuge marktreif machen. [272]



8.

Kostenvergleich

8.1 Kostenvergleich Einfamilienhaus
konventionell vs. recyclinggerecht

8.2 Kritik am Kostenvergleich

8.3 Kostenvergleich
konventionell vs. einstofflich

8.4 Fazit

8. Kostenvergleich

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass kreislauffähige Konstruktionen teurer sind als konventionelle Bauweisen. Das mag zunächst daran liegen, dass recyclingfähige und langlebige Materialien in der Regel wertvoller und aufgrund von niedrigen Umsatzmengen oft hochpreisiger sind. Außerdem werden derzeit hauptsächlich die Kosten der Errichtungsphase zur Kostenanalyse herangezogen – Nutzungs- und Rückbauphasen werden für gewöhnlich außer Acht gelassen.

An der bergischen Universität Wuppertal wurden daher Kostenvergleiche angestellt, die alle Lebensphasen der Konstruktion in einer Gesamtbilanz zusammenfassen. Dabei wurden konventionelle und recyclinggerechte Konstruktionen an Hand von drei verschiedenen Gebäudearten miteinander verglichen. Das Resultat aller drei Beispielrechnungen zeigt, dass kreislauffähige Bauwerke in der Errichtung tatsächlich teurer sind, sich über den gesamten Lebenszyklus betrachtet jedoch als wirtschaftlich vorteilhafter erweisen.

In der Errichtungsphase sind die Kosten der recyclinggerechten Konstruktionen in allen drei Fällen durchschnittlich 20-30 Prozent höher. Diese Mehrkosten werden durch die hohen Materialpreise kreislauffähiger Baustoffe verursacht. Allerdings handelt es sich dabei meist um langlebige Materialien, die innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren viel seltener ausgetauscht werden müssen und sich demzufolge die Instandsetzungskosten im Vergleich zu einer konventionellen Konstruktion deutlich verringern. Zusätzlich ermöglichen lösbare Verbindungen das Austauschen einzelner Schichten ohne dabei – im Gegensatz zum konventionellen Bau mit seinen meist fest miteinander verbundenen Materialien – den gesamten Bauteilaufbau erneuern zu müssen. Die rückbaubare Konstruktion führt im Rückbau auch dazu, dass Baustoffe sortenrein rückgewonnen und zur weiteren Verwendung oder Verwertung vorbereitet werden können. Während die Verbundmaterialien der konventionellen Bauweise teuer entsorgt werden müssen, fallen bei kreislauffähigen Materialien kaum oder gar keine Entsorgungskosten an. Wie die Beispiele zeigen, werden stattdessen sogar Erlöse aus den gelagerten Wertstoffen erzielt. In Anbetracht der steigenden Rohstoffpreise (20 Prozent Steigerung seit 2003) ist die Annahme einer Wertsteigerung durchaus vertretbar. [273]

Einer der drei Kostenvergleiche wird hier beispielhaft hervorgehoben und kritisch beleuchtet.

8.1 Kostenvergleich Einfamilienhaus - konventionell vs. recyclinggerecht

Die Autorinnen vergleichen eine Konstruktion aus *EPS-Schalungssteinen mit Betonkern und einer Fassade aus HPL-Platten in Holzoptik*, mit einem *Holztafelbau und einer Fassade aus Lärchen- und Kupferschindeln* für ein zweigeschossiges Einfamilienhaus mit 145 Quadratmetern Bruttogeschossfläche. Die beiden Varianten unterscheiden sich nicht nur in der Materialität der Bauteilschichten, sondern auch in der Verbindungsart der einzelnen Funktionsschichten.

Aufgrund der geringen Anforderungen an Recyclingaspekte sind die Baukosten der konventionellen Konstruktion verhältnismäßig gering. Betrachtet man die Lebensdauer der gewählten Materialien im Zeitraum von 50 Jahren wird erkenntlich, dass Fassade, Fenster, Dämmung und Innenwandbekleidungen mindestens einmal ausgetauscht werden müssen. Die Instandsetzungskosten fallen dadurch höher aus, als bei der recyclinggerechten Konstruktion, die auf langlebige und nachwachsende Materialien setzt. Besonders groß sind die Kostenunterschiede in der Rückbauphase. Die konventionellen Baustoffe, wie Gipsputz, EPS, Stahlbeton, PVC oder heterogene Schottermaterialien müssen nach 50 Jahren teuer entsorgt werden. Die Entsorgungskosten wurden hier inklusive einer allgemeinen Preissteigerungsrate gemäß BNB ermittelt. Im Gegensatz dazu fallen im End-of-Life-Szenario der recyclingfähigen Konstruktion nur geringe Mengen an zu entsorgenden Materialien (z.B. Holzskelett) an. Ein Großteil der Konstruktionselemente kann kompostiert oder wiederverwertet werden. Dementsprechend halten sich auch die Entsorgungskosten des Holztafelbaus in Grenzen. Zusätzlich werden die Rückbaukosten durch Gutschriften für die Kupferbleche und die Stahlbauteile der Terrassenunterkonstruktion reduziert. Auch hier generiert der Wiederverkaufswert durch die allgemeine Preissteigerung für Rohstoffe eine zusätzliche Rendite. [274]

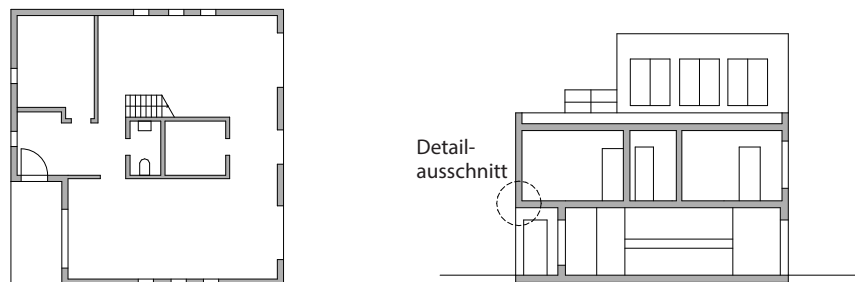


Abb.116: Grundriss und Schnitt - Einfamilienhaus 145 m² Bruttogeschossfläche

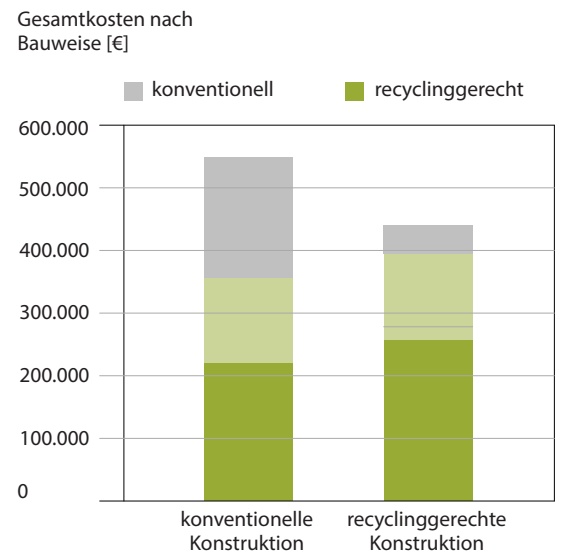
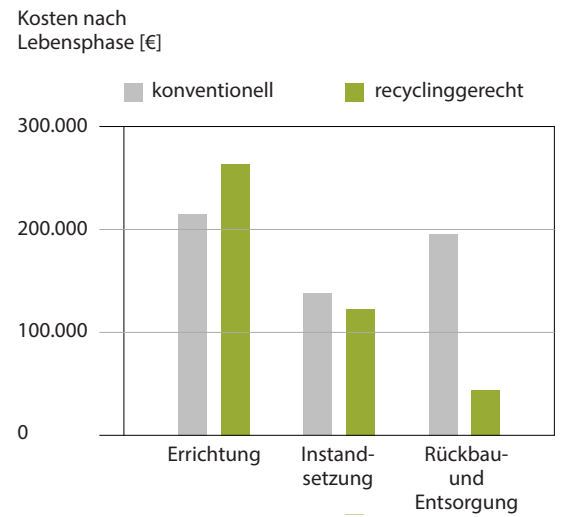
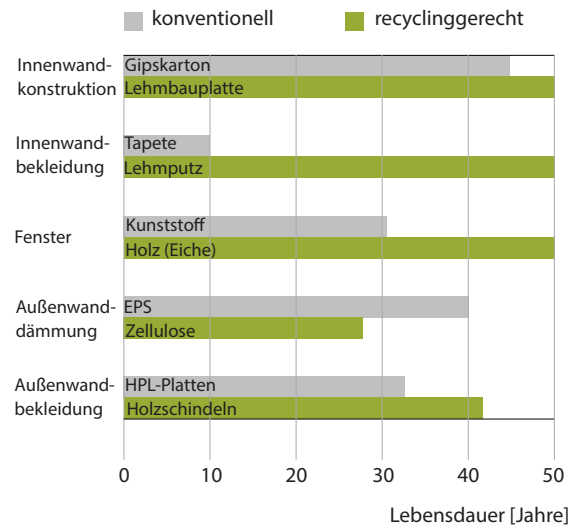
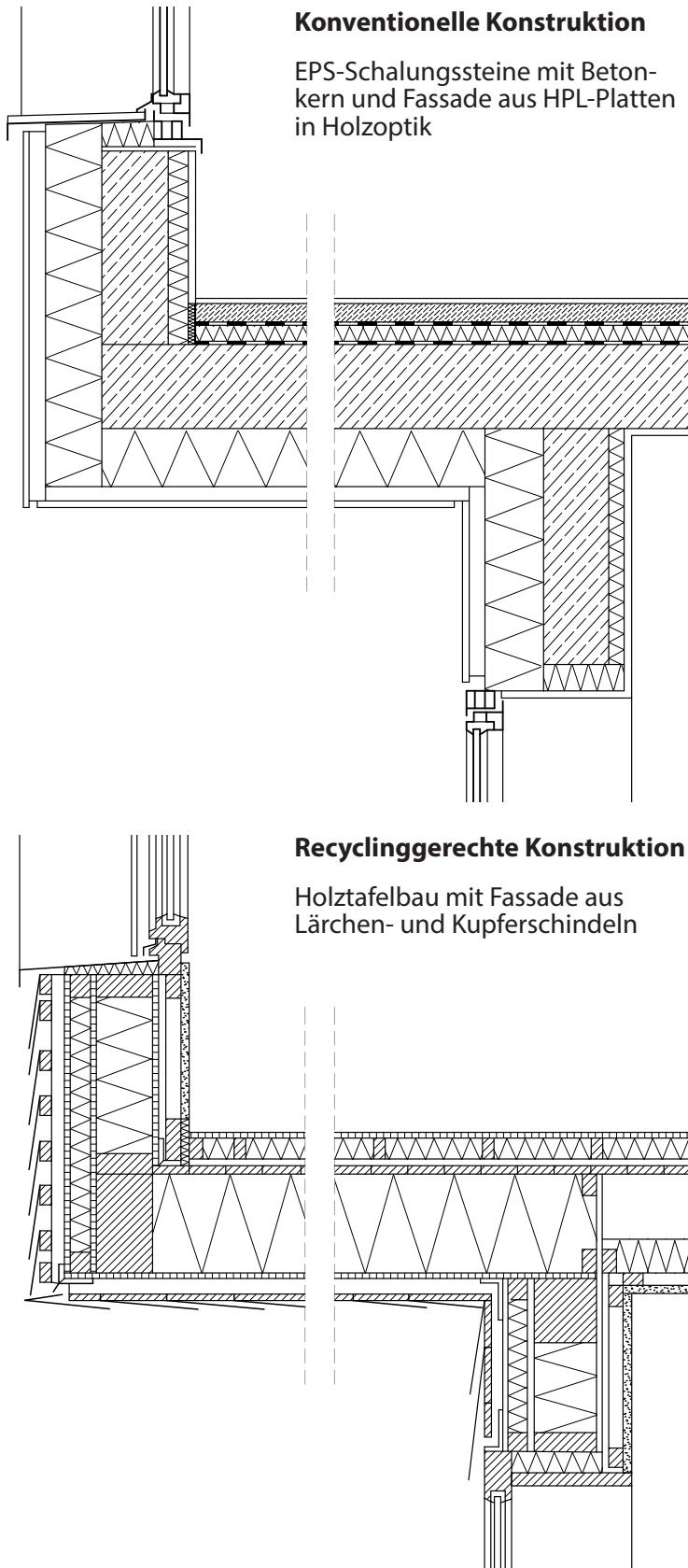


Abb.117: Detailausschnitte M 1:20

8.2 Kritik am Kostenvergleich

Die Ähnlichkeit der Ergebnisse lässt darauf schließen, dass es sich um eine konsequente Berechnungsmethodik handelt, die für beliebige Konstruktionen angewendet werden kann. Interessant ist dabei vor allem die prospektive Einbeziehung variabler Kosten. Die Autorinnen wenden hierfür die Barwertmethode an. Dadurch wirken sich Preissteigerungen (Inflation) und eine angenommene Kapitalverzinsung auf das Ergebnis aus. „Das heißt, in den Beispielen werden die zeitbereinigten Geldbeträge miteinander verglichen, also jene Werte, die zukünftige Zahlungen in der Gegenwart besitzen (Barwert). Dazu werden für in der Zukunft liegende Maßnahmen (Instandsetzungen, Rückbau und Entsorgung) die Kosten inklusive der Preissteigerung ermittelt und dieser Betrag anschließend auf den Gegenwartswert diskontiert (abgezinst). ... Während die Preissteigerung den Wert erhöht, hat die Verzinsung (von nicht eingesetztem, erspartem Kapital) eine Kostenminderung zur Folge.“ [275]

Grundsätzlich sind jedoch die Rückbau- und Entsorgungskosten, speziell beim oben angeführten Beispiel zu hinterfragen. Diese basieren auf individuellen Angebotspreisen eines einzigen Abbruch- und Entsorgungsunternehmers. Demzufolge sind die End-of-Life-Kosten der konventionellen Konstruktion mit 90 Prozent nahezu genauso hoch wie die Errichtungskosten. Die gegenwärtige Rückbaupraxis zeigt jedoch, dass die Abrisskosten – selbst für aufwendige und teure Abbrüche – bei nur rund 3,5 Prozent des Neuerrichtungswertes liegen.¹

Während zukünftige Kostenentwicklungen umfangreich berücksichtigt wurden, gibt es in der Berechnung keine Hinweise auf Eventualitäten in Bezug auf Schadstoffe. Die vorerst unbedenklichen Flammenschutzmittel in EPS-Dämmplatten stellten sich nach Jahren des Einsatzes im Bauwesen als umweltgiftig heraus und mutierten zum Entsorgungsproblem. Auch in nachwachsenden Dämmstoffen, wie Holzfaser- oder Zellulosedämmungen kommen Substanzen zum Einsatz, die nach Gefahrenstoffrichtlinie 2008/58 als gesundheitsgefährdend eingestuft sind. Hier ist insbesondere das Bindemittel Diphenylmethan-Diisocyanat in Holzweichfaserplatten zu nennen. Diese Substanz steht unter Verdacht, krebserregende Eigenschaften zu besitzen. [276]

Die Kupferschindelfassade der recyclinggerechten Konstruktion wirkt sich sehr positiv auf das Ergebnis aus. In einer weiteren Beispielrechnung reduzieren die Erlöse für Kupferheizungsrohre, die Fassade aus Edelstahl-Steckpaneelen und das Stahltragwerk die Rückbau- und Entsorgungskosten besonders stark. Jedoch ist nicht davon auszugehen, dass in Zukunft ausschließlich mit Wertstoffen gebaut werden wird, die dazu dienen sollen in der End-of-Life-Phase möglichst

¹ Abgeleitet von den durchschnittlichen Neuerrichtungskosten in Wien von 2.100 €/m² bzw. 700 €/m³ und den Abbruchkosten des Rückbauprojektes Rathausstraße (Wien) von 22,80 €/m³

hohe Wiederverkaufswerte erzielen zu können.

Alle drei Beispiele recyclinggerechter Konstruktion sind in gewisser Weise als urbane Mine konzipiert und weisen dementsprechend dem konventionellen Bau gegenüber ökonomische Vorteile in der Gesamtbetrachtung auf. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass auch aktuell problematische Baustoffe in Zukunft zu Closed-Loop-Materialien werden können. Zahlreiche Forschungsprojekte und Branchenbeteiligte beschäftigen sich bereits mit entsprechenden Technologien, die auch konventionelle Bauweisen zu urbanen Rohstofflagern machen könnten.

8.3 Kostenvergleich - konventionell vs. einstofflich

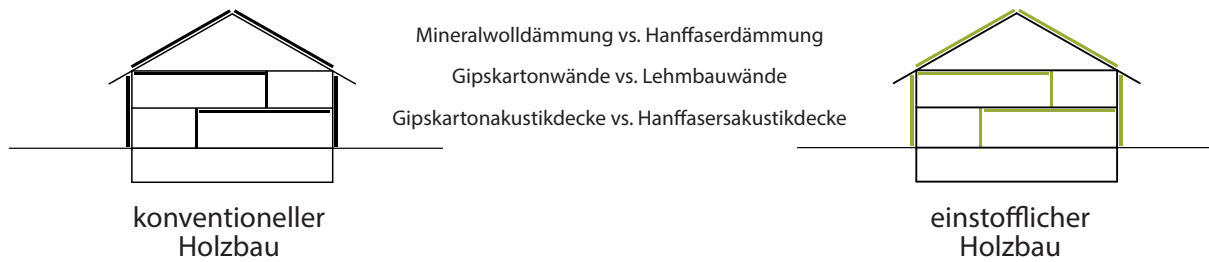
Bei allen im Kostenvergleich gezeigten Konstruktionen handelt es sich um eine raffinierte Kombination aus Materialien metallischen, mineralischen und biotischen Ursprungs. Daher ist es naheliegend, dass sich besonders mit technischen bzw. technisch-biotischen Kreisläufen Kostenvorteile erwirken lassen.

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet können sich die Kosten durchaus anders verhalten. Daher bietet sich an dieser Stelle der Kostenvergleich einer konventionellen mit einer biotisch-einstofflichen Bauweise an. Zu diesem Zweck wird im Folgenden ein konventioneller Holzmassivbau mit einem Monomaterialsystem verglichen.

Gegenwärtig wird im Holzbau unter anderem auf nicht nachwachsende Materialien zurückgegriffen. Aus Kostengründen werden oft Mineralwolle bzw. EPS als Dämmstoffe oder Gipsprodukte für den Innenausbau verwendet. Dies kann wiederum eine sortenreine Trennung der Materialien im Rückbau einschränken und unnötige Entsorgungskosten verursachen.

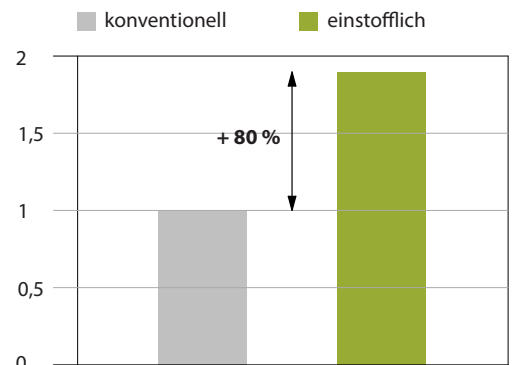
Im Folgenden werden also den konventionellen Bauteilen eines Holzmassivbaus biotische Alternativen gegenübergestellt und in allen drei Lebensphasen (Errichtung, Instandsetzung, Rückbau) auf ihre Kosten hin untersucht. Dabei stellen die konventionellen Baustoffe immer den Faktor 1 dar, während die biotischen Materialien das prozentuelle Verhältnis der Kosten über oder unter dem Faktor 1 angeben – je nachdem, ob die Kosten in der jeweiligen Lebensphase höher oder niedriger, verglichen zur konventionellen Bauweise sind.

Im Gegensatz zum Kostenvergleich der bergischen Universität Wuppertal, gibt es hier keinen direkten Bezug zu einem spezifischen Gebäude, daher erfolgt der Vergleich anhand von Preisen je Einheit (€/m^2 oder €/m^3). Die Materialpreise beruhen auf aktuellen Verkaufspreisen je Quadratmeter exklusive Mehrwertsteuer. Die Lebensdauern zur Ermittlung der Instandsetzungskosten stammen aus dem BKI, genauer aus der Tabelle *Nutzungsdauern*. Zur Berechnung der Rückbaukosten wurden die reinen Demontagekosten des jeweiligen Bauteils aus den entsprechenden Positionen im BKI herangezogen. Die Entsorgungskosten basieren auf aktuellen Entsorgungspreisen je Kubikmeter. Für die biotischen Materialien gilt die Annahme, dass es zu einer vollständigen Kompostierung am Lebenszyklusende kommt. Der Betrachtungszeitraum beschränkt sich auf 50 Jahre und es werden keine Preissteigerungen mitberücksichtigt.



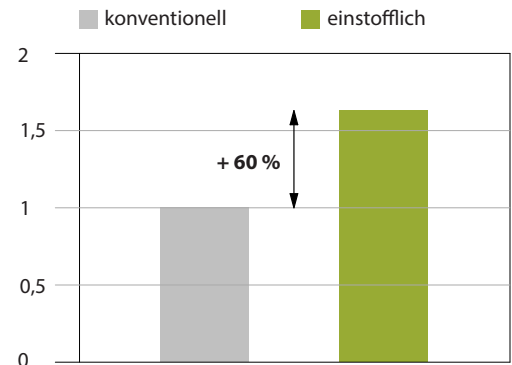
Neuerrichtung

konventionell	einstofflich
Mineralwolle 12,95 €/m ²	Hanffaserdämmplatten 21,54 €/m ²
Gipskartonplatten 4,74 €/m ²	Lehmbauplatten 22,46 €/m ²
Gipskartonakustikpanele 35,84 €/m ²	Hanfakustikpanele 53,35 €/m ²
Faktor 1	Faktor 1,8

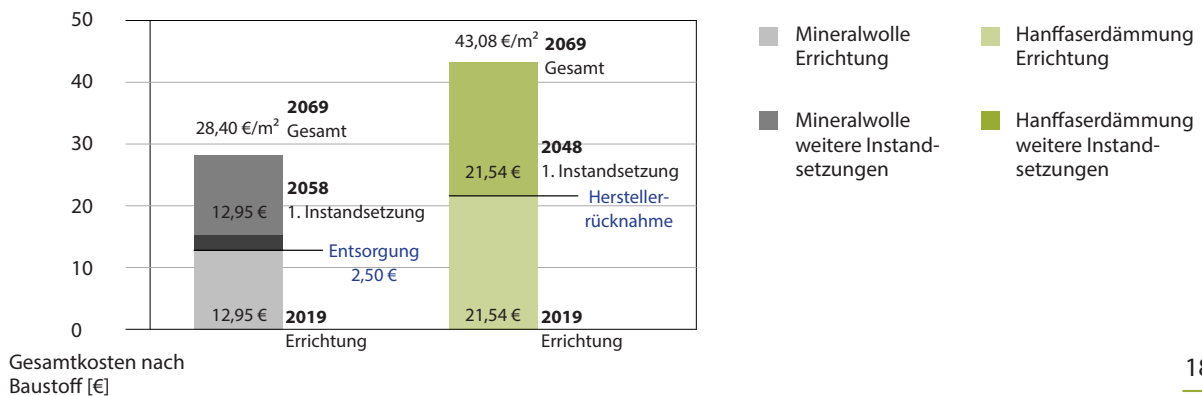


Instandsetzung

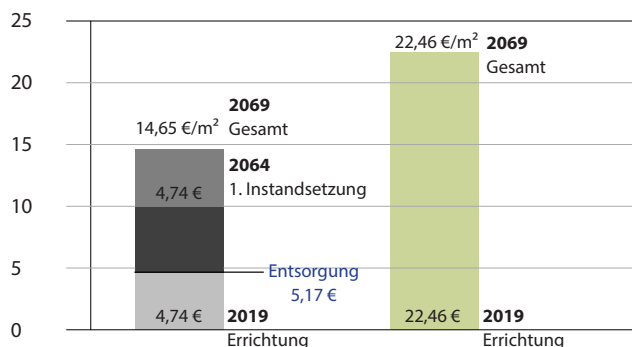
konventionell	einstofflich
Mineralwolle 39 Jahre	Hanffaserdämmplatten 29 Jahre
Gipskartonplatten 45 Jahre	Lehmbauplatten 50 Jahre
Gipskartonakustikpanele 19 Jahre	Hanfakustikpanele 18 Jahre
Faktor 1	Faktor 1,6



Berechnung der Instandsetzungskosten - Betrachtungszeitraum 50 Jahre

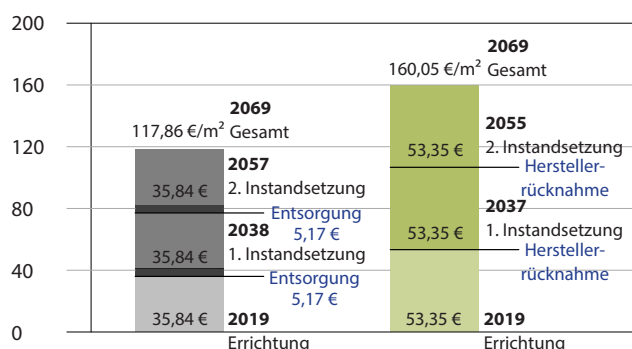


KOSTENVERGLEICH



■ Gipskartonplatte Errichtung
■ Lehmbauplatte Errichtung
■ Gipskartonplatte weitere Instandsetzungen
■ Lehmbauplatte weitere Instandsetzungen

Gesamtkosten nach Baustoff [€]



■ Gipskartonakustikpanel Errichtung
■ Hanfakustikpanel Errichtung
■ Gipskartonakustikpanel weitere Instandsetzungen
■ Hanfakustikpanel weitere Instandsetzungen

Gesamtkosten nach Baustoff [€]

Rückbau- und Entsorgung

konventionell

einstofflich

Entsorgung

Mineralwolle
25,00 €/m³

Hanffaserdämmplatten*²
0,00 €/m³

Gipskartonplatten*¹
41,43 €/m³

Lehmbauplatten*²
0,00 €/m³

Gipskartonakustikpanele*¹
41,43 €/m³

Hanfakustikpanele*²
0,00 €/m³

Rückbau

Mineralwolle
13,20 €/m²

Hanffaserdämmplatten
13,20 €/m²

Gipskartonplatten
11,00 €/m²

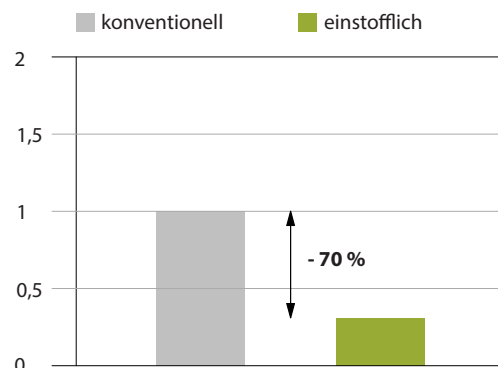
Lehmbauplatten
11,00 €/m²

Gipskartonakustikpanele
12,32 €/m²

Hanfakustikpanele
12,32 €/m²

Faktor 1

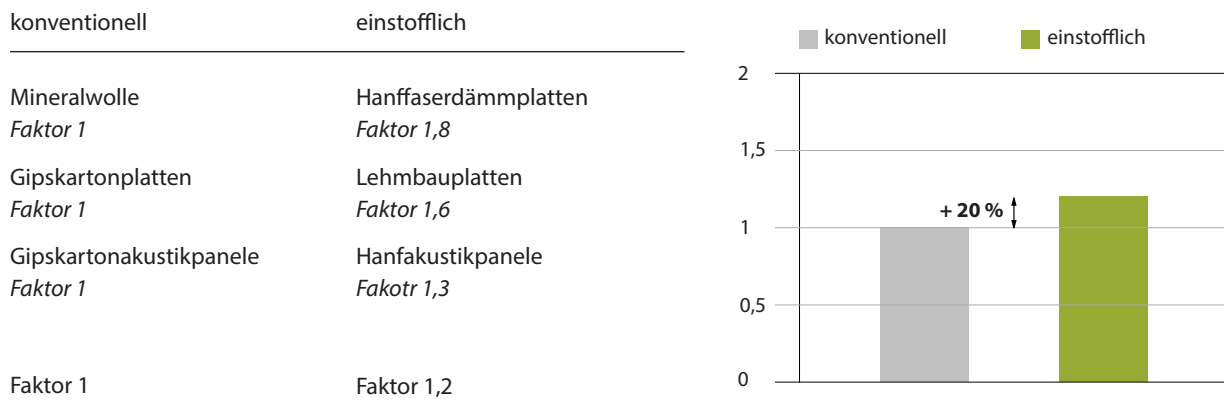
Faktor 0,3



*¹ Annahme: Entsorgung als gemischter Baustellenabfall (beruht auf aktuellen Entsorgungspreisen)

*² Herstellerrücknahme bzw. Kompostierung

Gesamtbetrachtung



8.4 Fazit

Aus der Gegenüberstellung geht klar hervor, dass die Dämmung und die Innenwände bzw. -decken eines Holzmassivbaus mit den hier ausgewählten, nachwachsenden Materialien um 80 Prozent teurer ausfallen würde. Auch die Langlebigkeit der Lehmbauplatte kann aufgrund der hohen Materialpreise der Hanfbauprodukte die Instandsetzungskosten nicht herabsenken, wie das in den Kostenvergleichen der bergischen Universität Wuppertal der Fall war. Mit dem Faktor 1,6 liegen die Instandsetzungskosten der einstofflichen Variante ebenfalls deutlich über denen der konventionellen Bauteile. In der Rückbauphase zeichnen sich die biotischen Materialien, aufgrund wegfallender Entsorgungskosten, als kostengünstigere Variante. In der Gesamtbetrachtung ist festzustellen, dass die einstoffliche Alternative um 20 Prozent höhere Kosten verursacht.

Angeichts dieser Ergebnisse liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die tatsächlichen Kosten kreislauffähiger Architektur stark von der Materialwahl und der Konstruktionsart abhängig sind. Ist das Gebäude technischer oder technisch-biotischer Natur, können – über den gesamten Lebenszyklus betrachtet – durchaus Minderkosten erreicht werden. Der Schlüssel dazu sind vor allem langlebige Materialien und werthaltige Stoffe. Bauwerke, die auf rein biotischer Ebene im Kreislauf geführt werden, können am Lebenszyklusende kaum bis gar keine Erlöse erzielen, sondern lediglich Entsorgungskosten sparen. Eine steigende Nachfrage nach biotischen Baustoffen könnte die derzeit hohen Materialpreise senken und den immensen Kostenunterschied in der Errichtungsphase verringern. Um eine entsprechende Nachfrage zu schaffen, müssen sich jedoch vermehrt ArchitektInnen bzw. PlanerInnen mit den Themen der Kreislaufwirtschaft auseinandersetzen und diese in Ihre Planung einfließen lassen.



9. Schlussfolgerung

9. Schlussfolgerung

Wie diese Arbeit zeigt, steht die Architektur vor einer großen Aufgabe. Eine neue und verantwortungsvolle Architekturhaltung kann die Lösung für ein gesamtgesellschaftliches, globales Problem sein. Weltweit ist die Bauwirtschaft für enormen Ressourcenverbrauch, die Anhäufung von Abfallbergen und den Klimawandel verantwortlich. Diese Tatsache ist zu einem großen Teil auf die linearwirtschaftlichen Handlungsmuster im Bauwesen zurückzuführen.

Im Regelfall sind weder die Planung eines Gebäudes noch die Ausführung auf die Schonung von Klima und natürlicher Ressourcen bedacht. Aufgrund mangelnder Nutzungsplanung erleben viele Gebäude einen frühzeitigen Abbruch und werden durch neue Bauwerke ersetzt. Da es sich in den meisten Fällen um Verbundkonstruktionen und geklebte Verbindungen handelt, wird eine sortenreine Trennung der Materialien als Vorbereitung zur Wiederverwertung massiv erschwert. Demnach ist so ein Rückbau nicht nur als unökologisch, sondern auch als unwirtschaftlich zu betrachten. Darüber hinaus sind viele der im Bauwesen eingesetzten Materialien nicht rezyklierbar, einige davon sogar umwelt- bzw. gesundheitsschädlich. Ein verwertungsorientierter Rückbau wird derzeit noch vergleichsweise selten angewendet, daher können die gesetzlich vorgeschriebenen Recyclingquoten nur auf niedrigem Qualitätsniveau erreicht werden. Die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen haben nicht flächendeckend Einzug in die Baupraxis genommen. In vielen Gebäudezertifizierungen werden Recyclingaspekte zwar mitbewertet, allerdings nur hinsichtlich qualitativer, nicht jedoch quantitativer, Aspekte. Zudem wird die Langlebigkeit von Gebäuden in keinem der Bewertungssysteme berücksichtigt. Neben der Planung, stellt auch die Bauabwicklung ein ernstes Problemfeld dar. Die innerstädtischen Umwelten werden aktuell durch Baustellenverkehr, diffuse Emissionen von Luftschadstoffen und Bauabfällen erheblich belastet.

Aus dieser Arbeit geht klar hervor, dass das Prinzip einer Kreislaufwirtschaft der entscheidende Hebel für ein umweltbewusstes und nachhaltiges Wirtschaften weltweit sein kann. Geschlossene Kreisläufe sind der Schlüssel zu einer klima- und ressourcenschonenden Architektur. Sowohl auf städtebaulicher Ebene als auch auf Bauwerksebene ist es möglich, Architekturkreisläufe zu generieren. Für die Stadtplanung bedeutet das vor allem Schutzgüter, wie den Boden, zu schonen, nachhaltiges Regenwassermanagement zu betreiben oder Brachflächen zu recyceln. Auch der steigenden Tendenz des Flächenverbrauchs pro Kopf kann durch Shared Space Konzepte im Sinne der Suffizienz gezielt entgegengesteuert werden. Mit einer intelligenten Nutzungsplanung können Gebäude langfristig genutzt und dabei über die gesamte Lebensdauer an veränderte Nutzungsbe-

dingungen angepasst werden. Auf diese Weise werden vorzeitige Abbrüche verhindert, Ressourcen geschont bzw. Abfälle vermieden. Die planerische Lösung liegt in der Flexibilität bzw. Variabilität von Grundriss und Schnitt. Außerdem gilt die mobile Architektur als spezielle Form der Nutzungsanpassung, da sie besonders auf Ressourceneffizienz in zeitlicher, lokaler und materieller Dimension bedacht ist.

Gebäude sind aber nur dann kreislauffähig, wenn auch ihre Konstruktionen einen weitgehend verwertungsorientierten Rückbau ermöglichen. Rückbaufreundliche Konstruktionen begünstigen nicht nur eine sortenreine Trennung am Ende der Nutzungsdauer, sondern vereinfachen auch Instandsetzungsmaßnahmen über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Die in der Arbeit aufgezählten Beispiele zeigen, dass nahezu alle Bauwerksteile mit lösbaren Verbindungen und Konstruktionen ausführbar sind. Kreislauffähig sind auch einstoffliche Bauweisen, die in bautechnischer und bauphysikalischer Hinsicht jedoch verbesserungsbedürftig sind. Insbesondere erdberührte Bauteile stoßen beim Monomaterialsystem an ihre Grenzen.

Entscheidend ist vor allem die Materialwahl, wenn es darum geht Baustoffe in biotischen und technischen Kreisläufen zu führen. Diese Arbeit erbringt den Nachweis, dass es eine Vielzahl an alternativen Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen gibt, die konventionelle Baustoffe in nahezu allen Konstruktionsebenen ersetzen können. Da es sich bei biotischen Materialien von Natur aus um geschlossene Stoffkreisläufe handelt, sind diese bei der Materialwahl zu bevorzugen. Aber auch Metalle lassen sich im technischen Kreislauf ohne Qualitätsverlust wiederverwerten und gelten daher bereits als etablierte Sekundärressource. Mineralische Materialien hingegen sind aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht eher als problematisch einzustufen, da sie meist nur einem Downcycling zugeführt werden können oder gar deponiert werden müssen. Allerdings befassen sich zahlreiche Forschungsarbeiten derzeit mit dem Recycling mineralischer Baustoffe. Neue Technologien ermöglichen bereits die Zerlegung von Beton in seine Bestandteile, die wiederum in der Herstellung neuer Betonprodukte eingesetzt werden können. In der Zementproduktion versucht die Forschung den immensen CO₂-Ausstoß zu verringern bzw. in einen geschlossenen Kreislauf überzuführen. Eine flächendeckende Umsetzung dieser Strategien steht dennoch aus.

Als Ansatz für eine umweltfreundliche Bauabwicklung stellt die Arbeit Good-Practice Beispiele für das Bauen mit lokalen Ressourcen vor. Werden lokale Gegebenheiten wie Abbruchobjekte oder Aushubkiese als Rohstofflager genutzt, können Deponien entlastet, der Baustellenverkehr verringert und Gewinnungstätten geschont werden.

Weiters geht hervor, dass es für geregelte Stoffkreisläufe in der Architektur und

im Bauwesen bereits geeignete Planungsinstrumente gibt. Sowohl für die Neubau- als auch Rückbauplanung können im BIM alle relevanten Gebäudedaten gesammelt und zur Verfügung gestellt werden. Kritisch anzumerken ist jedoch, dass derzeit vorhandene Datenprofile über keine recyclingrelevanten Informationen verfügen. Eine BIM-basierte Kreislaufwirtschaft kann nur erfolgreich sein, wenn ein vollständiger, den gesamten Lebenszyklus betreffender, Datensatz bereitgestellt werden kann. Zudem ist die Anwendung von BIM in der Neubauplanung bei Weitem kein Regelfall unter den Planenden und Ausführenden. In der Rückbauplanung funktioniert BIM zwar sehr gut, ist aber mit hohem Aufwand verbunden, zumal das Modell und baustoffbezogene Informationen manuell erstellt werden müssen. Digitale Vermessungswerkzeuge, die die Erfassung von Bestandsobjekten in Zukunft vereinfachen sollen, werden derzeit erforscht.

Abschließend zeigt der Kostenvergleich, dass kreislauffähige Architektur zwar nach wie vor teurer in der Errichtung ist, sich aber am Nutzungsende als kostengünstiger herausstellt. Durch recyclinggerechte Konstruktionen können vor allem Rückbau- und Entsorgungskosten wirksam verringert werden. Entscheidend ist dabei der Einsatz von langlebigen und werthaltigen Materialien, die nach dem Rückbau sogar einen Wiederverkaufswert besitzen. Konstruktionen aus rein biotischen Materialien werden zunächst teurer bleiben als konventionelle Bauweisen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Wertewandel in der Architektur, angesichts der folgenschweren Baupraktiken der Gegenwart, nahezu unumgänglich ist. Wir befinden uns bereits mitten im Anthropozän und müssen auch dementsprechend planen und bauen. Die Kreislaufwirtschaft ist ein sinnvoller Ansatz. Die angeführten Gebäudebeispiele verdeutlichen, dass geschlossene Kreisläufe in der Architektur bereits möglich sind und sogar Kostenvorteile generieren können. Kreislaufpotenziale müssen von Architektinnen und Architekten als Entwurfparameter in der Architektur verstanden werden. Das erforderliche Know-How ist in vielerlei Hinsicht bereits vorhanden, eine konsequente Umsetzung steht derzeit noch weitgehend aus.

10. Quellenverzeichnis

- [1] vgl. Hillebrandt A., Riegler-Floors P., u.a.: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018
- [2] Fensterbusch Curt [Hrsg.]: Vitruv - Zehn Bücher über Architektur, 7. unveränderte Auflage, Darmstadt: WGB (Wiss. Buchges.), 2013, S. 81
- [3] vgl. Report of The Environmental Pollution Panel President's Science Advisory Committee, Restoring the Quality of our Environment, Washington: The White House, 1965
- [4] ebd.
- [5] vgl. Anderson Darran: Klimawandel und Architektur - Warum Greenwashing keine Lösung ist, AD Magazin, 31.05.2019; <https://www.ad-magazin.de/article/klimawandel-architektur> (abgerufen am 15.07.2019)
- [6] vgl. Patricola Christina M., Wehner Michael F.: Anthropogenic influences on major tropical cyclone events, Nature International Journal of Science, 14.11.2018; <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0673-2> (abgerufen am 15.07.2019)
- [7] wie Anm. 5
- [8] vgl. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/greenpeace_wuestenbildung_0.pdf (abgerufen am 15.07.2019)
- [9] wie Anm. 5
- [10] vgl. Umweltbundesamt, Treibhausgasbilanz 2017, Wien: Umweltbundesamt, 2019; http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/presse/news_2019/Treibhausgas-Bilanz_2017.pdf (abgerufen am 25.04.2019)
- [11] vgl. Richtlinien für umweltfreundliche Baustellenabwicklung, technischer Abschlussbericht, EU-LIFE Forschungsprojekt, Projektnummer LIFE00, ENV/A/000239, Wien: MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004, S. 7
- [12] vgl. <http://www.fao.org/3/a-au725e.pdf> (abgerufen am 03.05.2019)
- [13] vgl. <https://cdn.redshift.autodesk.com/2018/08/13000-buildings-per-day-infographic1.pdf> (abgerufen am 03.05.2019)
- [14] vgl. Ressourcenverbrauch in Österreich, Ergebnisse der Umweltgesamtrechnung auf einen Blick, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016; http://www.umweltgesamtrechnung.at/fileadmin/site/umweltgesamtrechnung/reneu16_folder_de_web_es.pdf (abgerufen am 28.04.2019)
- [15] vgl. https://na.unep.net/geas/archive/pdfs/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf (abgerufen am 28.04.2019)
- [16] vgl. https://www.nytimes.com/2010/03/28/weekinreview/28grist.html?_r=0 (abgerufen am 03.05.2019)
- [17] vgl. Kondolf G. Mathias: Hungry Water - Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels, in: Environmental Management, Auflage 21 (4), New York: Springer-Verlag, 1997, S.533-551
- [18] vgl. Bachmann Günther, Urban Ressource Exploration, in: Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 6-7
- [19] vgl. Braungart Michael, McDonough William: Intelligente Verschwendung - The Upcycle: Auf dem Weg in eine neue Überflusgesellschaft, München: oekom Verlag, 2013
- [20] vgl. <https://www.global2000.at/plastik-im-meer> (abgerufen am 10.05.2019)
- [21] vgl. Cogut Alexander: Open burning of waste - A global health disaster, Genf: R20 Regions of Climate Action, 2016; https://regions20.org/wp-content/uploads/2016/08/OPEN-BURNING-OF-WASTE-A-GLOBAL-HEALTH-DISASTER_R20-Research-Paper_Final_29.05.2017.pdf (abgerufen am 10.05.2019)
- [22] vgl. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, Statusbericht 2019, Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2019; <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html> (abgerufen am 10.05.2019)
- [23] vgl. Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rats vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [24] vgl. Rosen Anja: Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen, in: Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S.16-20
- [25] vgl. Sigmund Bettina: Vermeidung, Verwertung und Wiederverwendung – Ressourcen-effizienz bei Baustoffen, in: Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 30.01.2016; <https://www.detail.de/artikel/vermeidung-verwertung-und-wiederverwendung-ressourceneffizienz-bei-baustoffen-26795/> (abgerufen am 10.05.2019)
- [26] vgl. Gebäude 2011 nach dem Errichtungsjahr (Bauperiode) des Gebäudes und politischen Bezirken, Wien: Statistik Austria, 2013; https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/wohnungs_und_gebaeudebestand/Gebaeude/index.html (abgerufen am 18.05.2019)
- [27] Romm Thomas M.: Recyclinggerechtes Bauen, Diplomarbeit TU Wien, 2000
- [28] Oberngruber Anita: Plattenbau - Evaluierung einer stigmatisierten Fertigteilbauweise unter konstruktiver Betrachtung, Diplomarbeit TU Wien, 2016
- [29] Umweltbundesamt: Reisinger H., Domenig M., Doujak K.: Asbest, Materialien zur Abfallwirtschaft, Report REP-0177, i.A. des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Klagenfurt: Umweltbundesamt, 2008; <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0177.pdf> (abgerufen am 18.05.2019)
- [30] wie Anm. 26
- [31] vgl. https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20150511_OTS0025/verwertungsorientierter-rueckbau-aus-baurestmassen-werden-zertifizierte-recyclingbaustoffe (abgerufen am 10.05.2019)
- [32] Alexander Christopher, Czech Hermann [Hrsg.]: Eine Mustersprache – Städte, Gebäude, Konstruktion, Wien: Löcker Verlag, 1995
- [33] Werner Jörg: Anpassbarer Wohnbau - Entwicklungsstand und Tendenzen, München: Callwey Verlag, 1976, S. 104
- [34] vgl. Fiederer Luke: Pruitt Igoe Housing-Project / Minoru Yamasaki, Archdaily Classics, 15.05.2017; <https://www.archdaily.com/870685/ad-classics-pruitt-igoe-housing-project-minoru-yamasaki-st-louis-usa-modernism> (abgerufen am 03.12.2019)
- [35] vgl. <http://www.oepb.at/allerlei/sprengung-10-jahrestag-harter-plateau.html> (abgerufen am 03.12.2019)
- [36] vgl. <https://www.wienholding.at/tools/uploads/Rathausstrasse1.pdf> (abgerufen am 25.05.2019)
- [37] vgl. <https://derstandard.at/1385170689321/Es-gibt-fuer-ein-Bauwerk-dieser-Art-keine-adaequate-Nachnutzung> (abgerufen am 25.05.2019)
- [38] vgl. Ressourcenverbrauch in Österreich, Ergebnisse der Umweltgesamtrechnung auf einen Blick, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2016; http://www.umweltgesamtrechnung.at/fileadmin/site/umweltgesamtrechnung/reneu16_folder_de_web_es.pdf (abgerufen am 25.05.2019)
- [39] vgl. Binder Markus, Riegler-Floors Petra: Einstoffliche Bauweisen, in: Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 102
- [40] ebd.
- [41] vgl. Rosen Anja: Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen, in: Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S.19
- [42] vgl. Hillebrandt Annette, Seggewies Johanna-Katharina: Recyclingpotenziale von Baustoffen, in: Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 70
- [43] vgl. Andrew Robbie M.: Global CO2-emissions from cement-production 1928-2017, Oslo: Cicero Center for international climate change research, 2018; <https://www.earth-syst-sci-data.net/10/2213/2018/essd-10-2213-2018.pdf> (abgerufen am 26.06.2019)
- [44] vgl. Deilmann Clemens, Reichenbach Jan, Krauß Norbert, Gruhler Karin, i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung - BBSR: Materialströme im Hochbau, Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Zukunft Bauen, Forschung für die Praxis, Band 6, AZ SWD 10.08.17-12.29. Bonn, 2017, S. 30
- [45] vgl. Stofner Desiree: Betonrecycling – Wie stehen die Tiroler Betonhersteller dazu?, in: Baurestmassen aufbereitet, 14. Ausgabe, Tirol: WKO Tirol, 2017; https://www.wko.at/branchen/t/industrie/Wko_Newsletter_Neu_0307_Druck.pdf (abgerufen am 15.07.2019)
- [46] wie Anm. 42
- [47] vgl. Maydl Peter [Hrsg.]: Verwertungsmöglichkeiten für Hochbaurestmassen, Band 13, Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, 1995
- [48] wie Anm. 42, S. 69
- [49] vgl. Melzer Helmut: Die Krux mit dem Recycling,

- in: Österreichische Bauzeitschrift, 18.03.2018; <https://www.bauforum.at/bauzeitung/die-kru-x-mit-dem-recycling-52008> (abgerufen am 03.07.2019)
- [50] vgl. <https://www.ecodesign-beispiele.at/w010-ziegel-aus-recycling.html> (abgerufen am 03.07.2019)
- [51] wie Anm. 49
- [52] wie Anm. 44, S. 32
- [53] wie Anm. 42, S. 69
- [54] wie Anm. 44, S. 32
- [55] ebd.
- [56] wie Anm. 42
- [57] vgl. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Veranstaltungen/Rohstoffkonferenz2017/Demmich.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 30.07.2019)
- [58] vgl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft [Hrsg.]: Bundesabfallwirtschaftsplan 2017, Wien: BMLFUW, 2017, S. 197
- [59] wie Anm. 57
- [60] vgl. <https://eu-recycling.com/Archive/6246> (abgerufen am 30.07.2019)
- [61] vgl. <https://www.ibo.at/wissensverbreitung/ibo-magazin-online/ibo-magazin-artikel/data/rueckbau-und-recycling/> (abgerufen am 30.07.2019)
- [62] vgl. <http://gipsrecycling.nl/SiteConnect/Customers/Gypsum%20Recycling%20Int/Archive/492/Prospekt.pdf> (abgerufen am 30.07.2019)
- [63] vgl. <https://www.stahl-online.de/index.php/themen/energie-und-umwelt/recycling/> (abgerufen am 22.07.2019)
- [64] vgl. Helmus Manfred, Randel Anne, Bergische Universität Wuppertal, i.A. von bauforumstahl: Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen, S. 1; <https://bauforumstahl.de/upload/documents/nachhaltigkeit/Sachstandsbericht.pdf> (abgerufen am 22.07.2019)
- [65] vgl. https://diepresse.com/home/panorama/wien/1308404/Urban-Mining_Die-Stadt-als-Materiallager (abgerufen am 22.07.2019)
- [66] vgl. <https://www.schrottpreis.org/schrottsorten-ueberblick/> (abgerufen am 22.07.2019)
- [67] vgl. <https://www.global2000.at/aluminium> (abgerufen am 22.07.2019)
- [68] vgl. Kuhlmann Ulrike [Hrsg.]: Stahlbaukalender 2016, Eurocode 3 – Grundnorm, Werkstoffe und Nachhaltigkeit, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2016, S. 530
- [69] wie Anm. 67
- [70] vgl. Statistik Austria: Gebäude- und Wohnungsbestand 1991 bis 2011 nach politischen Bezirken, Wien: Statistik Austria, 2013; https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/wohnungs_und_gebaudebestand/index.html (abgerufen am 22.07.2019)
- [71] wie Anm. 64, S. 4
- [72] wie Anm. 64, S. 9
- [73] vgl. Interessengemeinschaft Stahl-Brand schutzbeschichtung (IGSB) [Hrsg.]: Brandschutzbeschichtungen im Stahlbau, IGSB-INFO1, Düsseldorf: IGSB, 2014; <https://bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/Broschue.pdf> (abgerufen am 22.07.2019)
- [74] vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Vinylacetat.html> (abgerufen am 22.07.2019)
- [75] vgl. Gruber Birgit: Holzbau gewinnt weiter Marktanteile, in: Holzbau Austria, 16.07.2019; <https://www.holzbauaustria.at/news/2019/07/holzbauanteil-wachstum-proholz-boku.html> (abgerufen am 24.07.2019)
- [76] wie Anm. 42, S. 65
- [77] vgl. Weiland Michael: Mängel exemplar Qualitätssiegel - Interview mit Waldexperte Christoph Thies zum FSC-Ausstieg von Greenpeace, in: Greenpeace, 06.04.2018; <https://www.greenpeace.de/themen/waelder/maengelexemplar-qualitaetssiegel> (abgerufen am 24.07.2019)
- [78] Wie Anm. 44, S. 37
- [79] vgl. Verband Abfallberatung Österreich: Altholz-Recycling, in: VABÖ Blatt, Nr. 1/2019, Wien: VABÖ, 2019; https://www.vaboe.at/wp-content/uploads/2019/04/VABOE-Blatt_01-2019_web.pdf (abgerufen am 28.07.2019)
- [80] Wie Anm. 44, S. 35
- [81] Wie Anm. 42, S. 97
- [82] Wie Anm. 44, S. 36
- [83] vgl. Rehberger Matthias: Isolierglas - Keine Angst vor flüchtigem Gas, in: Glaswelt-Newsletter Ausgabe 1B-2014, Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag, 2014
- [84] Wie Anm. 61
- [85] Wie Anm. 42, S. 61
- [86] vgl. <https://www.plasticseurope.org/de/about-plastics/building-construction> (abgerufen am 28.07.2019)
- [87] vgl. Umweltbundesamt: Vermüllung der Meere noch lange ein Problem, Pressemitteilung Nr. 26/2014, 20.05.2014; <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/vermullung-der-meere-noch-lange-ein-problem> (abgerufen am 28.07.2019)
- [88] vgl. <http://www.marktmeinungsmensch.at/news/fenstermarkt-waechst-in-oesterreich-nur-noch-ueber/> (abgerufen am 29.07.2019)
- [89] Wie Anm. 15, S. 61
- [90] vgl. Wolters Leo [Hrsg.]: Kunststoff Recycling - Grundlagen – Verfahren – Praxisbeispiele, München: Wien: Hanser Verlag, 1997, S. 123
- [91] vgl. Umweltbundesamt [Hrsg.]: Kunststoffabfälle in Österreich, Aufkommen und Behandlung – Materialien zum Bundesabfallwirtschaftsplan 2017, REP-0650, Wien: Umweltbundesamt, 2017; <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0650.pdf> (abgerufen am 30.07.2019)
- [92] vgl. Umweltbundesamt [Hrsg.], Hutterer H., Pilz H., Angst G., Musial-Mencik M.: Stoffliche Verwertung von Nichtverpackungs-Kunststoffabfällen, Wien: Umweltbundesamt, 2000, S. 15-19
- [93] vgl. <http://reststofftechnik.at/aufbereitungs-techniken/pvc-fensterrecycling> (abgerufen am 30.07.2019)
- [94] vgl. https://www.chemie.de/lexikon/Polyvinylchlorid.html#Umwelt-_und_Gesundheitsaspekte/ (abgerufen am 29.07.2019)
- [95] vgl. Umweltbundesamt [Hrsg.]: Zukunftsmarkt Biokunststoffe – Fallstudie i. A. des Umweltbundesamtes, durchgeführt von Boderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit und Fraunhofer Institut ISI, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007; <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3451.pdf> (abgerufen am 29.07.2019)
- [96] vgl. Daxbeck Hans, Buschmann Heinz: Aufkommen von Dämmstoffen im Öö. Wohnbau und künftige Anforderungen aus Sicht der Abfallwirtschaft, Projekt ADOSA, Endbericht Vers. 1.4, i.A. der Öö. Landesregierung (Abt. Umweltschutz), Wien: Ressourcen Management Agentur RMA, 2012; https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/projekt_ADOSA_Endbericht.pdf (abgerufen am 30.07.2019)
- [97] vgl. Holm A., Sprengard C., Tremel S.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe, Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen, Bericht FO-12/12, München: Forschungsinstitut für Wärmeschutz, 2013, S. 74
- [98] Wie Anm. 44, S. 43
- [99] vgl. https://www.bauphysik.tu-berlin.de/menue/forschung/lifecycle_kmf/ (abgerufen am 30.07.2019)
- [100] Wie Anm. 44, S. 43
- [101] Wie Anm. 42, S. 90
- [102] vgl. https://www.klimaaktiv.at/bildung/news_infos/wae_wende_waedae.html (abgerufen am 01.08.2019)
- [103] Wie Anm. 44, S. 42
- [104] vgl. <https://www.ibo.at/materialoekologie/data/was-macht-einen-daemmstoff-oekologisch/> (abgerufen am 01.08.2019)
- [105] vgl. Hahn Bettina: Entsorgung und Recycling von EPS und XPS-Dämmstoffen, in: Energieeffizienz in Gebäuden, Jahrbuch 2017, Berlin: VME Jürgen Pöschke, 2017, S. 139-144
- [106] vgl. <http://www.architekt-riebl.at/energieeffizienz/waermedaemmungen/polyurethan> (abgerufen am 02.08.2019)
- [107] vgl. Obernosterer Richard: (H)FCKW-geschäumte Dämmstoffe im Bauwesen in Deutschland - Schätzung der potentiellen Emissionen bis zum Jahr 2010, i.A. des Umweltbundesamtes, Forschungskennzahl 36301229 UBA-FB 001653, Dessau: Umweltbundesamt, 2012
- [108] vgl. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchaktivitäten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchaktivitäten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen (Recycling-Baustoffverordnung – RBV)Stf: BGB. II Nr. 181/2015 i.d.F. BGBl. II Nr. 290/2016
- [109] Wie Anm. 42, S. 64-97
- [110] EU-LIFE-Forschungsprojekt, Projektnummer LIFE00 ENV/A/000239, Wien: MD-Stadtbau-direktion der Stadt Wien, 2004; http://www.rumba-info.at/files/rumba_technischer_abschlussbericht.pdf (abgerufen am 03.08.2019)
- [111] vgl. Richtlinie umweltorientierte Bauabwicklung, Wien: Magistrat der Stadt Wien, Programm für umweltgerechte Leistungen „ÖkoKauf Wien“, 2017; <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/bauabwicklung.pdf> (abgerufen am 05.08.2019)
- [112] vgl. Romm Thomas M., Kasper Thomas: Ökoeffizientes Bauen mit Ressourcen vor Ort, in: Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 36
- [113] wie Anm. 111
- [114] vgl. Rosen Anja: Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen, in: Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 16
- [115] vgl. Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rats vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rats
- [116] vgl. Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rats vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

- [117] Wie Anm. 108
- [118] vgl. Leitfaden für eine ordnungsgemäße Abwicklung von Bauvorhaben, Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung A14 – Referat Abfallwirtschaft und Nachhaltigkeit, 2016
- [119] vgl. Leitfaden über den richtigen Umgang mit Baurestmassen und Recycling-Baustoffen, Wien: Geschäftsstelle Bau, 2018
- [120] vgl. Romm Thomas: Cinderella's Critical Care – Von den Mühen der radikalen Veränderung, in: Circular Change – 42 richtungsweisende Gespräche, Social Design Reader, Wien: Universität für angewandte Kunst, 2019, S. 218
- [121] Wie Anm. 114, S. 20
- [122] vgl. Deutscher Abbruchverband e.V. [Hrsg.]: Abbrucharbeiten - Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung, 2. Auflage, Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 2007, S. 22
- [123] Wie Anm. 114, S. 20
- [124] ebd.
- [125] ebd.
- [126] Gorenz Heinz: Maschinelle Abbrucharbeiten, Praxishandbuch für Österreich, 2. Auflage, Wien: Austrian Standards plus, 2015, S. 8
- [127] Wie Anm. 114, S. 21
- [128] Wie Anm. 114, S. 22
- [129] R-Bau, Entwicklung einer praxisorientierten replizierbaren Rückbaustrategie zur Forcierung des verwertungsorientierten Rückbaus im Wohnbau, durchgeführt von der österreichischen Energieagentur (AEA) und der Ressourcen Management Agentur (RMA), 2014-2016; <http://www.rma.at/node/1579> (abgerufen am 06.08.2019)
- [130] vgl. Ebert T., Eßig N., Hauser G.: Zertifizierungssysteme für Gebäude – Nachhaltigkeit bewerten, Internationaler Systemvergleich, Zertifizierung und Ökonomie, München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2010, S. 49-51
- [131] vgl. Rosen Anja: Bewertungssysteme im Überblick, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 24-26
- [132] Wie Anm. 130, S. 31-32
- [133] Wie Anm. 131, S. 27
- [134] ebd.
- [135] vgl. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik: Gebäudebewertungssysteme im Vergleich, Version 10/2016, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, 2016
- [136] Klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten 2017 - Neubau und Sanierung, Langfassung, Wien: Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik, 2017
- [137] Wie Anm. 135
- [138] Wie Anm. 131, S. 28-29
- [139] Wie Anm. 131, S. 30
- [140] vgl. Global Footprint Network National Footprint Accounts 2016
- [141] wie Anm. 120, S. 214
- [142] vgl. Circularity Gap Report 2018
- [143] vgl. Braungart Michael, McDonough William: Intelligente Verschwendung - The Upcycle: Auf dem Weg in eine neue Überflusgesellschaft, München: oekom Verlag, 2013
- [144] vgl. Braungart Michael, McDonough William: Einfach intelligent produzieren – Cradle to Cradle: Die Natur zeigt, wie wir die Dinge besser machen können, 3. Auflage, Berlin: BvT Berliner Taschenbuch Verlag, 2008
- [145] wie Anm. 42, S. 60
- [146] wie Anm. 145, S. 59
- [147] vgl. Rosen Anja, u.a.: Detailkatalog, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 136
- [148] ebd.
- [149] Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008) StF: BGBl. II Nr. 39/2008
- [150] Rosen Anja: Bewertung der Kreislaufpotenziale, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S.115
- [151] ebd.
- [152] vgl. Rosen Anja: Sind Kreislaufpotenziale messbar? Eine Analyse am Beispiel von Fassaden- und Dachbekleidungen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S.108
- [153] ebd.
- [154] wie Anm. 152, S. 113
- [155] vgl. Mehlhorn Dieter-Jürgen: Grundrissatlas Wohnungsbau - Spezial : Lösungen und Projektbeispiele für: Schwierige Grundstücke, besondere Lagen ; Erweiterung, Umnutzung, Aufstockung, 1. Auflage, Berlin: Bauwerk Verlag, 2000
- [156] vgl. Hillebrandt Annette: Architekturkreisläufe – Urban-Mining-Design, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 11
- [157] vgl. <http://anderhalten.com/projekte/technische-fachhochschule-wildau> (abgerufen am 06.09.2019)
- [158] vgl. Leitfaden Bodenschutz bei Planungsvorhaben, i.A. des Amtes der Salzburger Landesregierung, Referat Agrarwirtschaft, Bodenschutz und Almen, Projektnr. 09 KEP 984/01a, Salzburg: Amt der Salzburger Landesregierung Referat Agrarwirtschaft, Bodenschutz und Almen, 2010
- [159] vgl. Schutzgemeinschaft Deutscher Wald: Waldböden; <https://www.sdw.de/waldwissen/waldboden/entstehung-und-aufbau/index.html> (abgerufen am 11.09.2019)
- [160] Universität für Bodenkultur Wien [Hrsg.]: Green up your city – Grundlagenstudie zur Fassaden- und Dachbegrünung im geförderten Wohnbau in Wien, i. A. des Magistrats der Stadt Wien – Magistratsabteilung 50, Wien: BOKU, 2019
- [161] vgl. Puschmann Thomas, Alt Rainer: Sharing Economy, in: Business & Information Systems Engineering, Ausgabe 58, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016, S. 93-99
- [162] vgl. Loske Reinhard: Die Doppelgesichtigkeit der Sharing Economy, in: Aus der Praxis – WSI Mitteilungen, Ausgabe 1/2019, Düsseldorf: Hans Böckler-Stiftung, 2019, S. 64-70; https://www.boeckler.de/wsimit_2019_01_loske.pdf (abgerufen am 11.09.2019)
- [163] vgl. Statistik Austria: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person in Hauptwohnsitzwohnungen in Österreich von 2008 bis 2018 (in m²), 2019
- [164] vgl. <https://arbeits-abc.de/coworking/> (abgerufen am 12.09.2019)
- [165] Stimpel Roland: Interview mit Werner Sobek – „Das beste System auf dem Globus“, DAB Deutsches Architektenblatt Online, 01.10.2009; <https://www.dabonline.de/2009/10/01/das-beste-system-auf-dem-globus/> (abgerufen am 12.09.2019)
- [166] wie Anm. 156, S. 12
- [167] ebd.
- [168] vgl. Thut Doris, Thut Ralf: Architektur des Gebrauchs, in: Arch+ Service Wohnung – Grundriß nach Gebrauch, Ausgabe 100/101, Berlin: Arch+, 1989, S. 60-64
- [169] ebd.
- [170] vgl. Müller M., Kuhnert N., Oswalt P.: Die Sinnlichkeit des Gebrauchs, in: Arch+ Service Wohnung – Grundriß nach Gebrauch, Ausgabe 100/101, Berlin: Arch+, 1989, S. 94-99
- [171] vgl. Faller Peter: Der Wohngrundriß – Untersuchung in Auftrag der Wüstenrotstiftung, Stuttgart/München: Deutsche Verlagsanstalt, 2002, S. 59-70
- [172] wie Anm. 168
- [173] wie Anm. 171
- [174] ebd.
- [175] vgl. Bosma K., Van Hoogstraten D., Vos M.: Housing for the Millions – John Habraken and the SAR (1960-2000), Rotterdam: NAI Publisher, 2000
- [176] wie Anm. 171
- [177] vgl. Conrads Ulrich [Hrsg.], Schumpp Mechthild: Stadtbau-Utopien und Gesellschaft – Der Bedeutungswechsel utopischer Stadtmodelle unter sozialem Aspekt, Gütersloh: Bertelsmann Verlag, 1972, S. 104-105
- [178] vgl. Frey Roland, Schmidt-Relenberg Norbert: Totale Wohnung, 2.Auflage, Stuttgart: Krämer Verlag, 1968
- [179] vgl. Kronenburg Robert: Mobile Architektur – Entwurf und Technologie, Basel: Birkhäuser Verlag, 2008, S. 8-15
- [180] vgl. Ludwig Matthias: Mobile Architektur – Geschichte und Entwicklung transportabler und modularer Bauten, Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 1998
- [181] ebd.
- [182] vgl. Krause Joachim, Lichtenstein Claude: Your private Sky R. Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft, Baden: Verlag Lars Müller und Museum für Gestaltung Zürich, 1999, S. 132-250
- [183] wie Anm. 180
- [184] Pawley Martin: Theorie und Gestaltung im zweiten Maschinenzeitalter, Conrads Ulrich, Neitzke Peter [Hrsg.], Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1998, S. 117
- [185] Meissner Irene, Möller Eberhard: Frei Otto – forschen, bauen, inspirieren, 2. Auflage, München: Detail Verlag, 2015, S. 14
- [186] vgl. Dotzler J. Bernhard, Müller Ernst [Hrsg.]: Wahrnehmung und Geschichte – Markierungen zur Aisthesis materialis, Berlin: Akademie Verlag, 1995, S. 135
- [187] Krause Joachim, Lichtenstein Claude: Your private Sky R. Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft, Baden: Verlag Lars Müller und Museum für Gestaltung Zürich, 1999, S. 20
- [188] ebd.
- [189] vgl. Hillebrandt A., Riegler-Floors P., Rosen A., u.a.: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 194
- [190] vgl. Hillebrandt A., Riegler-Floors P.: Lösare Verbindungen und Konstruktionen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 42-56
- [191] ebd.
- [192] ebd.
- [193] vgl. https://schraubwunder.at/files/downloads/Katalog_betonlos.pdf.pdf (abgerufen am 25.09.2019)
- [194] wie Anm. 190
- [195] ebd.

- [196] ebd.
- [197] ebd.
- [198] vgl. <https://www.linea-cladding.com/> (abgerufen am 27.09.2019)
- [199] vgl. <http://www.kdb.de/media/files/clickbrick-praesentation-1.pdf> (abgerufen am 27.09.2019)
- [200] vgl. https://www.sto.de/de/topnav/presse/pressemeldungen_163968.html (abgerufen am 27.09.2019)
- [201] wie Anm. 42, S. 92
- [202] vgl. <https://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/windlast/windsogsicherung-durch-aufblast-222320> (abgerufen am 28.09.2019)
- [203] wie Anm. 190
- [204] vgl. http://www.kebu.de/assets/content/files/Dokumente/Flachdach/de/Orig_kebu/Easyklett_01_2016.pdf (abgerufen am 28.09.2019)
- [205] wie Anm. 190
- [206] ebd.
- [207] vgl. https://portal.mytum.de/pressestelle/pressemitteilungen/news_article.2009-09-02.2452535930 (abgerufen am 28.09.2019)
- [208] wie Anm. 190
- [209] ebd.
- [210] vgl. Verlegeanleitung, https://www.forbo.com/flooring/de-de/produkte/linoleum/marmoleum-click/marmoleum-click/bz9e4r#panel_105 (abgerufen am 30.09.2019)
- [211] vgl. https://www.fliesen-botzner.de/news/Dry_Tile_Broschuere_D.pdf (abgerufen am 01.10.2019)
- [212] wie Anm. 190
- [213] ebd.
- [214] vgl. https://www.swap-sachsen.de/wp-content/uploads/2013/10/K1_AZ_03_Spezifikation_SWAP_Sinus_Wabenplatte.unkaschiert.pdf (abgerufen am 01.10.2019)
- [215] wie Anm. 190
- [216] ebd.
- [217] vgl. Binder Markus, Riegler-Floors Petra: Einstoffliche Bauweisen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 102-107
- [218] ebd.
- [219] wie Anm. 189, S. 182
- [220] wie Anm. 189, S. 190
- [221] vgl. Kleilein Doris: Der Mehrwert der massiven Wand, in: Bauwelt, Ausgabe 44/2013, Berlin: Bauverlag BV, 2013, S. 17-24; https://www.bauwelt.de/dl/792349/bw_2013_44_0016-0025.pdf (abgerufen am 03.10.2019)
- [222] wie Anm. 42, S. 65-67
- [223] wie Anm. 42, S. 72-73
- [224] wie Anm. 42, S. 80-81
- [225] wie Anm. 42, S. 83
- [226] wie Anm. 42, S. 84-86
- [227] vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung - BBSR: Ökologische Baustoffwahl – Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe Schadstoffarmes Bauen, Forschung für die Praxis, Band 4, Bonn: BBSR, 2016
- [228] vgl. Wecobis – Ökologisches Baustoffinformationssystem, Holzfaserdämmplatten; <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe/aus-nachwachsenden-rohstoffen/holzfaser-daemmplatten.html> (abgerufen am 10.10.2019)
- [229] wie Anm. 42, S. 87
- [230] vgl. Bau EPD, Produkt: HOIZ - Hobelspandämmung Baufritz GmbH & Co. KG, Wien, 2018
- [231] vgl. Bau-Fritz GmbH & Co. KG, Erkheim, Produkt: Hoiz – Hobelspandämmung
- [232] vgl. Capatect Baustoffindustrie GmbH, Perg, Produkt: Hanffaserdämmplatte; https://www.synthesa.at/files/sdb/ti/ios-ascii/ti/capatect_hanffaserdammplatte.pdf (abgerufen am 10.10.2019)
- [233] vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Marktübersicht – Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Gülzow-Prüzen: FNR, 2017
- [234] wie Anm. 42, S. 88-90
- [235] vgl. <http://bechter.eu/13-strohhaus/de-67> (abgerufen am 10.10.2019)
- [236] wie Anm. 189, S. 192
- [237] wie Anm. 42, S. 68
- [238] ebd.
- [239] wie Anm. 42, S. 74-75
- [240] vgl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft [Hrsg.]: Bundesabfallwirtschaftsplan 2017, Wien: BML-FUW, 2017, S. 71-73
- [241] vgl. Römer Jörg: Zement – der heimliche Klimakiller, Spiegel Online, 03.06.2019; <https://www.spiegel.de/plus/zement-der-heimliche-klimakiller-a-0d863a07-d143-4335-a64e-b10de499af21> (abgerufen am 12.10.2019)
- [242] wie Anm. 42, S. 70
- [243] vgl. Smart Crusher saves concrete and CO2, De ingénieur, 05.06.2018; <https://www.deingenieur.nl/artikel/smart-crusher-saves-concrete-and-co2> (abgerufen am 12.10.2019)
- [244] vgl. <https://de.yair-technologies.com/cement-producers-are-developing-plan-reduce-co2-emissions-730334> (abgerufen am 12.10.2019)
- [245] vgl. <https://www.trendsderzukunft.de/neue-technik-ermoeglicht-co2-neutrale-produktion-von-zement/> (abgerufen am 12.10.2019)
- [246] wie Anm. 42, S. 70-91
- [247] ebd.
- [248] wie Anm. 189, S. 184
- [249] wie Anm. 189, S. 188
- [250] wie Anm. 189, S. 187
- [251] Bruther: Frame Media House, in: El Croquis 197 Bruther, Madrid: El Croquis, 2012-2018, S. 176
- [252] vgl. <https://www.nkbak.de/projekte/europaeische-schule-frankfurt.html> (abgerufen am 16.10.2019)
- [253] wie Anm. 189, S. 202
- [254] wie Anm. 189, S. 198
- [255] wie Anm. 189, S. 210
- [256] wie Anm. 189, S. 208
- [257] vgl. Romm M. Thomas, Kasper Thomas: Ökoeffizientes Bauen mit Ressourcen vor Ort, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 36-39
- [258] vgl. Förster Wolfgang, Menking William [Hrsg.]: Das Wiener Modell – Wohnbau für die Stadt des 21. Jahrhunderts, 2. Auflage, Berlin: Jovis Verlag, 2017, S. 7
- [259] vgl. Richtlinien für umweltfreundliche Baustellenaufwicklung, Kurzbericht, Wien: MD-Stadtbau-direktion der Stadt Wien, 2004; http://www.rumba-info.at/files/kurzbericht_rumba.pdf (abgerufen am 17.10.2019)
- [260] wie Anm. 257
- [261] ebd.
- [262] vgl. <https://www.optigruen.de/produkte/substrate/> (abgerufen am 18.10.2019)
- [263] vgl. https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&me_nue_id_in=300&id_in=11731 (abgerufen am 18.10.2019)
- [264] wie Anm. 189, S. 204
- [265] vgl. Projektbeschreibung Spaceshop Architekten; http://www.spaceshop.ch/pdf/spaceshop_115.pdf (abgerufen am 19.10.2019)
- [266] vgl. Helmus Manfred, Kesting Holger: BIM zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 32-33
- [267] vgl. Tautschnig, Fröch, Gächter [Hrsg.]: Österreichischer BIM-Bericht 2017 – Repräsentative Umfrage in österreichischen Unternehmen zu Nutzen, Chancen und Risiken von BIM, Innsbruck: Studia Universitätsverlag, 2017
- [268] vgl. <https://www.baulinks.de/bausoftware/2016/0024.php4> (abgerufen am 25.10.2019)
- [269] vgl. <http://biblus.accasoftware.com/de/bim-im-internationalen-vergleich-in-den-skandinavischen-laendern-eine-bereits-etablierte-praxis-im-bauwesen/> (abgerufen am 25.10.2019)
- [270] vgl. <http://www.waermedaemmstoffe.com/html/mineralwolle.htm> (abgerufen am 23.10.2019)
- [271] vgl. <https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/die-deponie-ist-keine-endstation/> (abgerufen am 23.10.2019)
- [272] vgl. Schwarz Willfried [Hrsg.]: Ingenieurgeodäsie - Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [273] vgl. Riegler-Floors P., Hillebrandt A.: Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 120-133
- [274] ebd.
- [275] Riegler-Floors P., Hillebrandt A.: Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, in: Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource, München: Detail Verlag, 2018, S. 125
- [276] vgl. Paschko K., Drewer A.: Wie »Öko« ist »natürlich«?, in: db deutsche bauzeitung, Ausgabe: 11/2019, Leinfelden-Echterdingen: Konradin Medien, S. 72-77

11. Abbildungsverzeichnis

- | | | | | | |
|---------|--|---------|--|--|---|
| Abb.1: | Anteil der nicht-metallischen Mineralstoffe am Gesamt DMC | Abb.24: | Übersicht der ausgewählten Wandaufbauten und deren Kreislaufpotenziale | Haken-Ösen-System; http://romenpdf.info/hook-fasteners/ | |
| Abb.2: | Wertewandel in der Architektur | Abb.25: | Schnitt durch den Hörsaal und Laborgebäude Halle 14, Technische FH Wildau | Abb.49: | Linoleum-Fußbodenpaneele mit Klicksystem |
| Abb.3: | Prinzip einer Linearwirtschaft | Abb.26: | Innenraumansicht Halle 14, Technische FH Wildau; https://anderhalten.com/projekte/technische-fachhochschule-wildau | Abb.50: | Keramische Fliesen im Trockenverlegesystem; https://www.db-bauzeitung.de/db-empfehltdrytile-agrob-buchtal/ |
| Abb.4: | Grundriss 2. Obergeschoss, Rathausstraße 1 / Glaspalast | Abb.27: | Prinzipskizze Schwammstadt / nachhaltiges Regenwassermanagement | Abb.51: | Schwimmende Verlegung von Teppichfliesen; http://afrivio.mail2many.de/mailings/4/25/128/index-browser.html |
| Abb.5: | Standzeiten ausgewählter Projekte | Abb.28: | Prinzipskizzen flexibler/umbaubarer Strukturen | Abb.52: | Pappwabenplatte als Einbringhilfe für Masseschüttungen; https://www.m-h-c.at/partnerunternehmen-im-mhc/unser-nachrichtenportal-ihre-medienpraesenz/detail/news/sicherer-bodenaufbau-fuer-grosse-fliesen/ |
| Abb.6: | Schnitt Terrassenhaus Inzersdorferstraße (Harry Glück 1971) | Abb.29: | traditionelles japanisches Wohnhaus; https://im-tee-raume.zenwort.de/zw2_hm/zw2_toko.html | Abb.53: | Trockenestrich als Sichtoberfläche; Estrichziegel; https://www.oekoplus.de/bodenheizung-und-wandheizung~534.de.html |
| Abb.7: | Materialien eines konventionellen Wandaufbaus | Abb.30: | Schröder-Haus in Utrecht Obergeschoss mit offenen Raumteilern | Abb.54: | Ausführungsmöglichkeiten in einstofflicher Bauweise |
| Abb.8: | Übersicht über die Verwertungsmöglichkeiten und Anwendungen von Baurestmassen | Abb.31: | Bausystem mit Betonskelett, Typ C, Normalgeschoss (Adolf Rading 1927) | Abb.55: | U-Werte und Schalldämmmaße ausgewählter einstofflicher Außenwandkonstruktionen |
| Abb.9: | Altholzkategorien nach deutscher Altholzverordnung | Abb.32: | Neuengland/USA Siedlerhaus „Salt-box“ (ca. 1670) | Abb.56: | Kraftwerk Lausward; https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/objekte/gewerbe-industrie/block-fortuna-im-kraftwerk-lausward-in-duessel-dorf-4803736 |
| Abb.10: | Auswahl von Bestandteilen einer hochwertigen Verglasung | Abb.33: | Support und Infill System (SAR) | Abb.57: | Horizontalschnitt M 1:20 |
| Abb.11: | Nutzungskaskade von Glas (sinkendes Verwertungsniveau von oben nach unten) | Abb.34: | Hammersholt / DK, Saettedammen (Bjerg + Dyreborg, 1973) | Abb.58: | Schnitt durch das Stadtfenster M 1:500 |
| Abb.12: | Marktanteile in Europa eingesetzter Dämmstoffe laut einer Marktstudie aus dem Jahr 2012 [97] | Abb.35: | Algier/Algerien - Plan obus (Le Corbusier 1931) | Abb.59: | Innenansichten Stadtfenster; <i>ebd.</i> |
| Abb.13: | Schadstoffübersicht der wichtigsten Schadstoffe im Bauwesen, deren Herstellungs- und Verwendungszeitraum, sowie Beispiele und Entsorgungswege | Abb.36: | Nissenhütte (Peter Norman Nissen 1916) | Abb.60: | Gemeindezentrum St. Gerold; https://www.cn-architekten.at/projekt/gemeindezentrum-st-gerold |
| Abb.14: | Bewertung der Kreislaufpotenziale von Holz, Stahl, Ziegel und Beton als konstruktive Elemente (Kategorie 1) | Abb.37: | AIROH-Haus (Aircraft Industry Research Organization on Housing 1944) | Abb.61: | Vertikalschnitt M 1:20 |
| Abb.15: | Bewertung der Kreislaufpotenziale von biotischen, mineralischen und fossilen Dämmstoffen (Kategorie 2) | Abb.38: | Dymaxion Haus (R. Buckminster Fuller, 1944) | Abb.62: | Grundriss und Schnitt M 1:250 |
| Abb.16: | Bewertung der Kreislaufpotenziale von Glas und Fensterrahmen (Kategorie 3) | Abb.39: | Aktivhaus-Siedlung Winnenden; https://www.wernersobek.de/projekte/focus-de/strukturen/aktivhaus-siedlung/ | Abb.63: | Bürogebäude 2226; https://www.archdaily.com/451653/2226-be-baum-schlager-eberle/52928fb1e8e44ece58000272-2226-be-baumschlager-eberle-photo |
| Abb.17: | Bewertung der Kreislaufpotenziale von Beispielen biotischer, mineralischer und metallischer Außen- und Innenverkleidungen (Kategorie 4) | Abb.40: | Grundrisse Raummodule M 1:200 | Abb.64: | Schnitt und Grundriss M 1:500 |
| Abb.18: | Erforderliche LKW-Fahrten für die Errichtung einer Wohnung in der aktuellen Baupraxis | Abb.41: | Fundamentdetail mit Schraubfundamenten | Abb.65: | Vertikalschnitt M 1:20 |
| Abb.19: | Fünfstufige Hierarchie der europäischen Abfallrahmenrichtlinie | Abb.42: | Schaumglasschotter (SGS) als Perimeterdämmung unter der Bodenplatte und an der Kellerwand | Abb.66: | Außenwand im Rohbau; https://www.ziegel.at/buerogebeude-2226-low-tech-fuer-high-comfort |
| Abb.20: | Gegenüberstellung der BauPVO und der OIB-Richtlinien | Abb.43: | Zimmermannsmäßige Verbindungen | Abb.67: | Wohnhaus Dornbirn; http://bechter.eu/13-strohhaus/de-67 |
| Abb.21: | Gegenüberstellung von Abbruch- bzw. Rückbaukosten und deren spezifischer Entsorgungs- und Personalkosten basierend auf vier Modellrechnungen für ein Wohngebäude in Massivbauweise (Baujahr: 1856, Brutto-Rauminhalt. 4.200 m ³) | Abb.44: | Rückbaufreundliche verdeckte Befestigung von Natursteinplatten; https://www.linea-cladding.com/ | Abb.68: | Errichtung / Montageprinzip; http://www.breathe-aut.com/de/portfolio/haus-aus-stroh/ |
| Abb.22: | National Footprint Accounts 2016 des Global Footprint networks | Abb.45: | „Click Brick“ Trockenstapelsystem; https://materialdistrict.com/material/daas-clickbrick/ | Abb.69: | Grundriss M 1:500 |
| Abb.23: | biotischer und technischer Verwertungskreislauf im Bauwesen in Anlehnung an die C2C-Strategie | Abb.46: | Lösbare Befestigung von Dachabdichtungsbahnen | Abb.70: | Montageprinzip Vertikalschnitt M 1:20 |
| | | Abb.47: | Metallklettband als Schnappverschluss; https://www.engadget.com/2010/07/14/researchers-create-super-strong-metallic-velcro/ | | |
| | | Abb.48: | Metallklettband als | | |

- Abb.71: Wood Innovation and Design Centre; <https://architizer.com/idea/1432319/>
- Abb.72: Innenraumansicht; <http://wood-works.ca/wp-content/uploads/151203-WoodWorks-WIDC-Case-Study-WEB.pdf>
- Abb.73: Grundriss M 1:500
- Abb.74: Konstruktionsprinzip; <https://www.archdaily.com/630264/wood-innovation-design-centre-michael-green-architecture/5552153be58ece92c700026f-wood-innovation-design-centre-michael-green-architecture-detail>
- Abb.75: Schnitt M 1:500
- Abb.76: Ausbildungszentrum Gordola; <http://www.durischnolli.ch/de/portfolio/centro-formazione-professionale-ssic/gallery>
- Abb.77: Schnitt und Grundriss M 1:1000
- Abb.78: Innenraumansicht Werkstatt; <https://www.baunetzwissen.de/geneigtes-dach/objekte/bildung/ausbildungszentrum-fuer-den-baummeisterverband-in-gordola-1582669>
- Abb.79: Fensterfabrik Hagendorn; <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/objekte/gewerbe-industrie/erweiterung-einer-fensterfabrik-in-hagendorn-679321>
- Abb.80: Innenansicht Halle Fensterfabrik; https://www.dbz.de/artikel/dbz_Integrierenstatt_kaschieren_Fensterfabrik_G_Baumgartner_Hagendorn_CH_803531.html
- Abb.81: Schnitt M 1:400
- Abb.82: Vertikalschnitt M 1:20
- Abb.83: The Nelson Atkins Museum of Art; <https://www.flickr.com/photos/scottsnorsworthy/9677425689>
- Abb.84: Horizontalschnitt M 1:20
- Abb.85: Innenraumansicht The Nelson Atkins Museum of Art; <https://www.archdaily.com/4369/the-nelson-atkins-museum-of-art-steven-holl-architects/500ef1e028ba0d0cc7000f03-the-nelson-atkins-museum-of-art-steven-holl-architects-image>
- Abb.86: Frame Media House; <http://www.belgianbuildingmagazine.be/fr/actualite/19573/frame-maison-des-medias>
- Abb.87: Grundriss M 1:500
- Abb.88: Südfassade - Stahlrahmenkonstruktion auf Betonstützen im Erdgeschoss, 7,5 x 7,5 m Raster mit Aussteifungselementen; <https://afasiaarchzine.com/2018/03/baukunst-bruther-3/baukunst-bruther-frame-media-house-brussels-9/>
- Abb.89: Nordfassade - vorgefertigte Stahlbetonstützen (T-Form); *ebd.*
- Abb.90: Europäische Schule Frankfurt; https://www.baunetzwissen.de/meldungen/Meldungen-Europaeische_Schule_in_Frankfurt_am_Main_4330421.html
- Abb.91: Grundriss M 1:500
- Abb.92: Innenraumansicht und Montage der Module; *ebd.*
- Abb.93: Montageprinzip Modulbau
- Abb.94: Wattenmeerzentrum Ribe; <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/objekte/bildung/wattenmeerzentrum-in-ribe-5300252>
- Abb.95: Längs- und Querschnitt M 1:500
- Abb.96: Lageplan M 1:2000
- Abb.97: Vertikalschnitt M 1:20
- Abb.98: Bürogebäude St.Johann; <http://archimos.at/index.php/auszeichnungen/72-sozialzentrum-kundl-breitenbach-2>
- Abb.99: Schnitt M 1:500
- Abb.100: Vertikalschnitt M 1:20
- Abb.101: Upcycle House; <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter/52abe350e8e44ec9e0000083-upcycle-house-lendager-arkitekter-photo>
- Abb.102: Explosionszeichnung
- Abb.103: Innenraumansicht; *ebd.*
- Abb.104: Villa Welpeloo; <http://ootdmagazine.com/villa-welpeloo-superuse-studios/>
- Abb.105: Konzeptdarstellung Re-Use-Bauteile
- Abb.106: Fassadenbretter aus alten Kabeltrommeln; <https://inhabitat.com/modern-dutch-house-built-from-salvaged-billboards-and-umbrellas/harvest-boom-5>
- Abb.107: Ortbetonanlage Seestadt Aspern
- Abb.108: Wohnhaus Rauch; <https://www.iglehm.ch/lehmbau/bauten/lehmhaus-rauch>
- Abb.109: Schnitt und Grundriss M 1:400
- Abb.110: Baustellenfoto - Errichtung Lehmwände; *ebd.*
- Abb.111: horizontale Struktur der Lehmwände; *ebd.*
- Abb.112: Wohnhaus Flury; <https://www.hochparterre.ch/nachrichten/architektur/blog/post/detail/fin-de-chantier-leben-im-manifest/1299746514/>
- Abb.114: Innenraumansicht; https://www.iglehm.ch/ccm/mesch_filter_list/pages/load_pages?&pageID=224&blD=3901&myfilterID=&prev_message=Zur%C3%BCck&next_message=Weiter&ccm_paging_p=3&locale=de_DE
- Abb.113: Schnitt und Grundriss M 1:250
- Abb.115: Baustellenfoto - Errichtung der Wände in Wellerbauweise; <https://www.md-mag.com/materialien/lehmhaus/>
- Abb.116: Grundriss und Schnitt - Einfamilienhaus 145 m² Bruttogeschossfläche
- Abb.117: Detailausschnitte M 1:20