



# LEHM URBAN

Anwendungsmöglichkeiten von Lehm  
im städtischen Wohnungsbau  
am Beispiel Wien



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria

## DIPLOMARBEIT

### LEHM URBAN

Anwendungsmöglichkeiten von Lehm  
im städtischen Wohnungsbau  
am Beispiel Wien

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Diplom-Ingenieurin**

unter der Leitung

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Andrea Rieger-Jandl**

E251-01 - Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege  
Fachbereich Baugeschichte und Bauforschung

**eingereicht an der Technischen Universität Wien**  
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

**Beatrix Hauer**  
00968003

Wien, am 12. Mai 2020

## Kurzfassung

Lehm zählt zu den ältesten Baustoffen der Architekturgeschichte und diente auch im deutschsprachigen Raum lange als wichtiges Baumaterial. Historisch betrachtet kam Lehm vor allem in Zeiten der Not zum Einsatz, da er billig zu beschaffen war und vom Menschen aus eigener Kraft zu Gebäuden verarbeitet werden konnte.

Mit der Industrialisierung und dem wachsenden Wohlstand geriet dieser uns lange vertraute Baustoff jedoch zunehmend in Vergessenheit – das Bauen mit Lehm beschränkt sich in Österreich heute vorrangig auf kleine Bauwerke vereinzelter Lehmliebhaber, während der mehrgeschossige Wohnbau sowie andere Großprojekte vorrangig aus energie- und ressourcenintensiven Baustoffen realisiert werden.

In Anbetracht der wachsenden Hitzeinseln in Städten, der Verknappung endlicher Ressourcen und des zunehmenden Problems steigender Abfallmassen im Bausektor darf dem Streben der Bauwirtschaft, immer mehr und immer günstiger zu bauen, zukünftig nicht mehr uneingeschränkt nachgegeben werden. Angesichts des wachsenden Zuzugs in Städte und des dort zusätzlich entstehenden Wohnbedarfs ist es notwendig, nachhaltigen Baustoffen wie Lehm insbesondere auch im städtischen Gefüge mehr Präsenz zu verleihen.

Der Baustoff kämpft jedoch seit der Entwicklung von Produkten wie Stahlbeton mit seinem Image als Krisenbaustoff, der nicht die notwendigen Eigenschaften aufweist, moderne High-Tech Architektur zu schaffen. Diesem Vorurteil gilt es angesichts der wachsenden Klimakrise entgegenzuwirken. Die vorliegende Diplomarbeit soll daher einen Beitrag dazu leisten, das Potential von Lehm als Baustoff aufzuzeigen und ein Bewusstsein für seine Einsatzmöglichkeiten zu schaffen.

Aufbauend auf der Entwicklung verschiedener Lehmbauteile für den urbanen Wohnungsbau erfolgt ein konkreter Vergleich dieser mit aktuell vorherrschenden Bauweisen am Beispiel der Wiener Wohnbauten. Durch die Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen, ökologischen und ökonomischen Qualitäten wird in dieser Diplomarbeit beurteilt, welche Rolle Lehmbaustoffe zukünftig im städtischen Wohnbau einnehmen können. Konkrete Berechnungen technischer und ökologischer Kennwerte erlauben dabei unter der Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte greifbare Schlussfolgerungen über die Konkurrenzfähigkeit von Lehm gegenüber anderen Baustoffen. Diese sollen eine Argumentationsgrundlage bilden, dem Lehmbau wieder Raum im Bausektor zu geben.

## Abstract

Clay is one of the oldest building materials in the history of architecture and was also used in German-speaking countries for a long time. Historically, clay was mainly used during crises, as it was cheaply obtainable and could be processed into buildings by people on their own.

With industrialization and growing prosperity, however, this building material has increasingly been forgotten – nowadays, building with clay in Austria is quite rare and primarily restricted to small construction projects by very few clay lovers. Multi-storey residential buildings and other large-scale projects on the other hand are mostly made from highly energy- and resource-consuming building materials.

Considering the growing heat islands in cities, the scarcity of finite resources and the increasing problem of waste volumes in the construction sector, the striving to build more and more and to build as cheaply as possible can no longer be balanced with sustainable architecture. Given the growing influx into cities and the additional need for housing, there is an urgent necessity to give sustainable building materials such as clay a greater presence in urban areas.

However, since the development of products like reinforced concrete, clay has struggled with its image as a material of crisis that lacks the necessary qualities to create modern high-tech architecture. Considering climate change and its future threat to the world, this prejudice has to be counteracted urgently. The following diploma thesis is therefore intended to help demonstrate the potential of clay as a building material and to raise awareness of its possible uses.

To do so, various construction components made of clay are developed and contrasted to building elements currently used in Viennese residential buildings. By comparing the different types of construction methods with regard to their physical, ecological and economic qualities, this diploma thesis assesses the position that clay can take in future urban housing. Taking economic aspects into account, calculations of technical and ecological parameters allow tangible conclusions to be drawn about the competitiveness of clay against other building materials. These shall provide a basis for argumentation on why clay deserves to be acknowledged in the construction sector again.

## Danksagung

Die Entwicklung der vorliegenden Diplomarbeit war ein spannender Prozess, der meinen letzten Studienabschnitt definiert hat. Die Entscheidung zur Bearbeitung des Themas Lehm in der Stadt beruht nicht zuletzt auf den Erfahrungen, die ich im Studium und insbesondere im Austausch mit Lehrenden und anderen Studierenden sammeln durfte. Mein Bewusstsein für die Notwendigkeit nachhaltiger Architektur konnte stetig wachsen und löste in mir letztlich den Wunsch aus, diesem Themengebiet mit meiner Abschlussarbeit die nötige Präsenz zu verleihen.

Dabei hat mich vor allem meine Betreuerin Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Andrea Rieger-Jandl inspiriert, die sich dem Thema Lehm an der Technischen Universität Wien besonders widmet. Ich möchte mich an dieser Stelle für ihre stets ermutigenden Worte und hilfreiche Unterstützung herzlich bedanken. Ihre Ratschläge und ihr Feedback haben wesentlich zur Lösung verschiedener Probleme beigetragen und mich aus gedanklichen Sackgassen geleitet.

Ebenso großer Dank gilt meiner Familie, Dr. Gerhard Hauer, Dr. Maria Hauer und Alexander Hauer, die mich nicht nur während dem Verfassen meiner Arbeit, sondern bereits mein ganzes Studium über unterstützt haben und die bis heute mein sicheres Auffangnetz sind. Die Werte, die sie mir vermittelt haben, haben meinen Lebensweg geprägt und mir gezeigt, wie wichtig die Rücksichtnahme auf andere Lebewesen und die Natur ist. Für all ihre tröstenden, ermutigenden und erheiternden Worte und Taten bin ich ihnen von Herzen dankbar.

Auch meinem Lebensgefährten Martin Krauk möchte ich meinen Dank dafür aussprechen, mich durch die Höhen und Tiefen meines Studiums begleitet zu haben. Seine Unterstützung in allen Lebenslagen hat mir die Kraft gegeben, über mich selbst hinauszuwachsen und mir gezeigt, dass ich alles schaffen kann, was ich mir vornehme.

Bei meinen Freundinnen, Freunden, Studienkolleginnen und -kollegen möchte ich mich zudem für die anregenden Diskussionen und aufmunternden Worte bedanken. Auch ihr Rückhalt hat mir die Kraft gegeben, mein Studium zu meistern und selbst in schwierigen Situationen nicht den Mut zu verlieren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Über das Bauen in Wien</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Vorschriften, Normen, Regelwerke</b>	<b>8</b>
1.1.1 Bauakustische Anforderungen	8
1.1.2 Wärmetechnische Grenzwerte	11
1.1.3 Anforderungen an den Brandschutz	12
1.1.4 Zulässige Gebäudehöhen	14
<b>1.2 Wiener Bauteilaufbauten</b>	<b>15</b>
1.2.1 Außenwandsysteme	17
1.2.2 Innenwandsysteme	18
1.2.3 Geschossdecken	21
1.2.4 Dachaufbauten	23
1.2.5 Erdberührte Bauteile	25
<b>2 Der Baustoff Lehm</b>	<b>28</b>
<b>2.1 Bestandteile von Lehm</b>	<b>28</b>
2.1.1 Ton	28
2.1.2 Schluff, Sand und Kies	29
2.1.3 Wasser	30
2.1.4 Zusatzstoffe und Zuschläge	30
<b>2.2 Statische und bauphysikalische Eigenschaften von Baulehm</b>	<b>31</b>
2.2.1 Festigkeit	32
2.2.2 Rohdichte	32
2.2.3 Verhalten von Lehm bei Wassereinwirkung	33
2.2.4 Regen- und Frosterosion	34
2.2.5 Verhalten von Lehm bei Wasserdampfeinwirkung	34
2.2.6 Wärmeleitfähigkeit	35
2.2.7 Wärmespeichervermögen	35
2.2.8 Brandverhalten	35
2.2.9 Schalldämmvermögen	36
2.2.10 Der Einfluss von Lehm auf das Raumklima	37
<b>3 Lehm im großen Stil</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Überblick über die wichtigsten Lehmbaustoffe</b>	<b>38</b>
3.1.1 Stampflehm	39
3.1.2 Lehmsteine (Adobe)	41
3.1.3 Lehmplatten	42
3.1.4 Lehmschüttungen	43
3.1.5 Lehmestrich	43
3.1.6 Lehmmörtel	44
3.1.7 Lehmfarben	46

<b>3.2 Über die Rolle von Lehm in mehrschichtigen Bauteilen</b>	<b>46</b>
3.2.1 Lehm als Tragstruktur	46
3.2.2 Lehm als Speicher- und Dämmmaterial	48
3.2.3 Lehm im Trockenbau	49
3.2.4 Lehm als Flächenlast in horizontalen Bauteilen	49
3.2.5 Oberflächengestaltung mit Lehm	49
<b>3.3 Lehm-Hybride: Lehm in Kombination mit anderen Baustoffen</b>	<b>51</b>
3.3.1 Tragende Baustoffe	51
3.3.2 Wärmedämmstoffe	53
3.3.3 Putzsysteme und Anstriche	59
3.3.4 Trennlagen und Abdichtungen	60
<b>3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten</b>	<b>61</b>
3.4.1 Außenwandsysteme	64
3.4.2 Innenwandsysteme	71
3.4.3 Geschossdecken	75
3.4.4 Dachaufbauten	82
3.4.5 Erdberührte Bauteile	89
3.4.6 Wiener Lehmbauteile	91
<b>4 Lehm macht Konkurrenz</b>	<b>92</b>
<b>4.1 Ein bauphysikalischer Vergleich</b>	<b>92</b>
4.1.1 Wärmedurchgangskoeffizient der Außenbauteile	93
4.1.2 Wärmespeichervermögen	100
4.1.3 Erfüllung des Niedrig-, Niedrigst- und Passivhaus-Standards	104
4.1.4 Schalldämmvermögen	113
4.1.5 Brandschutz	118
4.1.6 Feuchteregulierung von Baustoffen	120
<b>4.2 Ein ökologischer Vergleich</b>	<b>123</b>
4.2.1 Ökologische Kennwerte und ihre Bedeutung	124
4.2.2 Ökologische Bewertungssysteme	128
4.2.3 Ökologische Bauteilbewertung - OI3 Index	130
4.2.4 Über das Schließen des Stoffkreislaufes - Abfallmassen im Bauwesen	158
4.2.5 Recyclingpotential und Entsorgungseinstufung der Bauteile	160
<b>4.3 Ein ökonomischer Vergleich</b>	<b>168</b>
4.3.1 Bauzeiten & Kostenschätzung	169
4.3.2 Nutzflächenanalyse	177
4.3.3 Notwendiges Vorwissen und Schulungen	186
4.3.4 Komplexität und Fehleranfälligkeit der Bauteile	187
4.3.5 Rechtliche Komplikationen - Lehmbaunorm	193
<b>Eine Perspektive für den Lehmbau</b>	<b>196</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>200</b>
<b>Abbildungsnachweis &amp; Tabellenverzeichnis</b>	<b>210</b>
<b>Anhang</b>	<b>214</b>

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass in der vorliegenden Diplomarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums benutzt wird, um die Lesbarkeit zu erleichtern. Die ausschließliche Verwendung der männlichen Form ist im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsunabhängig zu verstehen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Einleitung

Die Bauwirtschaft hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem immer schnelllebigeren Wirtschaftssektor entwickelt, das Prinzip *schneller – besser – günstiger* gilt vielerorts als typisches Credo des Bauwesens. Das erhöhte Wohnbedürfnis und wachsende Bevölkerungszahlen führen dabei zu einer gesteigerten Nachfrage an oftmals endlichen Ressourcen. Gleichmaßen verursacht die Bauwirtschaft heute einen beträchtlichen Teil der weltweit ausgestoßenen Treibhausgase.<sup>1</sup> Zu bauen bedeutet längst nicht mehr, den Menschen bloß vor Witterung und Gefahr zu schützen, vielmehr stellen Bauwerke heute hochtechnologische Objekte dar, an die immer größere Anforderungen an Nutzerkomfort und Energieeffizienz gestellt werden.

Architekturschaffende stehen vor der Herausforderung, unter stetig wachsendem Wettbewerb kreatives, multifunktionales Raumdesign, hocheffiziente Gebäudetechnik und gleichzeitig möglichst niedrige Errichtungskosten zu vereinen. Der Spielraum für nachhaltige Lösungen und ökologisch verträgliche Konstruktionen wird dabei zusehends geringer. In Anbetracht der wachsenden Hitzeinseln in Städten, der Verknappung endlicher Ressourcen und des zunehmenden Problems steigender Abfallmassen im Bausektor darf dem Streben der Bauwirtschaft, immer mehr und immer günstiger zu bauen, zukünftig nicht mehr uneingeschränkt nachgegeben werden.

Zeitgemäße Architektur hat die Aufgabe, nicht nur die Bedürfnisse von Investoren und Bauherren zu stillen, sondern unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit auch eine für die Zukunft verträgliche Bauweise zu forcieren, die sich auf nachwachsende und energiearme Rohstoffe stützt und den Eingriff in die Umwelt so gering wie möglich hält. Dies beinhaltet auch, nicht länger nur die zur Zeit der Errichtung verursachten Emissionen und stofflichen Ressourcen zu berücksichtigen, sondern eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse in den Planungsprozess einfließen zu lassen – die Gebäude von heute dürfen nicht zum Sondermüll der Zukunft werden. Eine nachhaltige, zukunftsorientierte Bauweise muss sorgsam mit Ressourcen umgehen, stofflich trennbare Bauteile aus recycelbaren Materialien hervorbringen und auf energiearme Herstellungsprozesse setzen.

Ein Baustoff, der all diese Kriterien erfüllt und der seit Jahrhunderten weltweit eingesetzt wird, ist Lehm. Das Material, das durch die Verwitterung von Gesteinsschichten entsteht, ist in weiten Teilen der Welt in großer Menge verfügbar und kann im Wesentlichen direkt aus dem Boden entnommen und zu Bauteilen geformt werden. Das Bauen mit Lehm ist für den Menschen vollkommen ungefährlich, das Leben in Lehmhäusern wirkt sich nachweislich positiv auf den Nutzerkomfort und das Raumklima aus.<sup>2</sup>

Historisch betrachtet kam das Material vor allem in Zeiten der Not zum Einsatz, da es billig zu beschaffen war und aus eigener Kraft zu Gebäuden verarbeitet werden konnte. Es ist daher kaum überraschend, dass sich das Bauen mit Lehm heute vor allem auf arme Länder beschränkt, während in den zunehmend reichen Regionen Europas kaum noch auf diese Bauweise zurückgegriffen wird.

1 vgl. hierzu beispielsweise: UMWELTBUNDESAMT 2019

2 vgl. z.B. Untersuchungen von MINKE 1994/2001

Der Baustoff Lehm kämpft seit der Entwicklung von Produkten wie gebrannten Ziegeln und Stahlbeton mit seinem Image als Baustoff der Armen, der nicht die notwendigen Eigenschaften aufweist, moderne High-Tech Architektur zu schaffen. Diesem Vorurteil gilt es angesichts der wachsenden Klimakrise entgegenzuwirken. Aufgrund seiner ressourcenschonenden Herstellungsweise, der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und des hohen Recyclingpotentials kann Lehm als besonders nachhaltiger Baustoff angesehen werden. Gleichzeitig bedeutet das Bauen mit diesem Material keineswegs, auf ansprechendes Raumdesign und energieeffiziente Gebäudesysteme verzichten zu müssen. Auch wenn Lehm gewisse Schwächen wie eine vergleichsweise geringe und durch Wassereinwirkung beeinflussbare Festigkeit aufweist, erlaubt eine materialgerechte Anwendung dieses Baustoffes eine Aufwertung vieler architektonischer Aspekte. Bauteile mit ausreichend hohem Lehmanteil wirken beispielsweise feuchtigkeitsregulierend, schalldämmend und schadstoffbindend, eine von Lehm ummantelte Holzstruktur wird auf natürliche Weise vor Feuer, Insekten- und Pilzbefall geschützt.

Die nachfolgende Diplomarbeit soll einen Beitrag dazu leisten, Lehm nicht mehr als Baustoff der Entwicklungsländer und Hobbyhandwerker wahrzunehmen. Das Bauen mit Lehm darf sich nicht länger auf kleine Bauvorhaben wie Einfamilienhäuser beschränken. Pioniergebäude wie die Kapelle der Versöhnung in Berlin oder das Ricola Kräuterzentrum in Laufen haben längst gezeigt, dass das Bauen mit Lehm auch im großen Maßstab funktioniert.

Angesichts des wachsenden Zuzugs in Städte und des dort zusätzlich entstehenden Wohnbedarfs ist es notwendig, nachhaltigen Baustoffen wie Lehm auch im städtischen Gefüge mehr Präsenz zu verleihen. Aus diesem Grund wird im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit untersucht, in welcher Weise sich das Bauen mit Lehm für den urbanen Raum realisieren lässt. Durch eine genaue Analyse der stoffspezifischen Eigenschaften des Baumaterials sowie seiner Einsatzmöglichkeiten in mehrschichtigen Bauteilen wird ein Lehm-Bauteilkatalog erstellt, der den Anforderungen des modernen städtischen Wohnbaus entspricht. Um eine möglichst detaillierte Analyse zu ermöglichen, wird der Bearbeitungsrahmen dabei auf neu errichtete Wohngebäude im Raum Wien beschränkt.

Unzählige Autoren haben sich bislang mit dem Baustoff Lehm im Detail auseinandergesetzt und seine positiven Eigenschaften aufgezeigt. Es erscheint jedoch notwendig, diese Analyse auf konkrete Bauteile umzulegen und derzeitigen Bauweisen gegenüberzustellen.

Durch den Vergleich von Bauteilaufbauten mit unterschiedlich hohem Lehmanteil mit herkömmlichen Bausystemen hinsichtlich ihrer bauphysikalischen, ökologischen und ökonomischen Qualitäten erfolgt auf Basis von konkreten Berechnungen eine zielgerichtete Beurteilung, welche Rolle Lehm zukünftig im urbanen Wohnbau einnehmen kann. Die direkte Gegenüberstellung von Lehm-, Ziegel-, Stahlbeton- und Holzbauteilen ermöglicht aussagekräftige Schlussfolgerungen, in welchen Bereichen die Lehmbauweise gegenüber konventionellen Ausführungsvarianten bereits Vorteile bietet und an welcher Stelle zusätzliche Maßnahmen getroffen werden müssen, um den Baustoff für den städtischen Wohnungsbau attraktiver zu machen.

Auf diese Weise soll ein Bewusstsein für das Potential des Baustoffes Lehm geschaffen und Bauträger sowie Planer angeregt werden, Bauteile aus diesem Material in ihren Bauvorhaben einzusetzen und dadurch einen Beitrag zu nachhaltiger und zukunftsfähiger Architektur im städtischen Raum zu leisten.

## Gliederung und Forschungsmethoden

Während sich das Bauen mit Lehm im kleinen Rahmen – insbesondere im Bereich der Einfamilienhäuser – auf eine lange Bautradition stützt, ist die Umsetzung mehrgeschossiger Lehm-Wohnbauten im städtischen Raum kaum bekannt. Beispiele wie die sechsgeschossigen Lehmhäuser in Schibam (Jemen) oder das Pisé-Haus in Weilburg an der Lahn (D) bilden vereinzelte historische Ausnahmen im Gegensatz zu den sonst immer mehr von Beton geprägten Stadtlandschaften. Gleichsam verdeutlichen sie, dass das Bauen mit Lehm im großen Stil möglich ist und Gebäude aus diesem Baustoff eine lange Lebensdauer aufweisen können.

Da das Bauen in Wien vor allem von Baustoffen wie Stahlbeton und Ziegel geprägt, der Lehmbau hier hingegen kaum vertreten ist, wird in der vorliegenden Arbeit zunächst die grundlegende Situation des Wiener Wohnbaus erläutert.

Um die Rahmenbedingungen zu verstehen, denen das Bauen in Wien unterliegt, muss in [1 Über das Bauen in Wien](#) geklärt werden, welche bauphysikalischen Anforderungen an Bauteilaufbauten gestellt werden, die im Wohnbau Anwendung finden sollen. Auf Grundlage der Wiener Bauordnung, der OIB-Richtlinien sowie einschlägiger Normen werden einige wichtige Grenzwerte aufgezeigt, denen diese Bauteile entsprechen müssen.

Im Anschluss werden die in der Bauordnung festgelegten Gebäudeklassen vorgestellt, die die zulässigen Gebäudehöhen in Wien definieren. Basierend auf Informationen des Flächenwidmungsplanes wird auf diese Weise festgestellt, welche Gebäudehöhen für Wohnbauten in Wien im Durchschnitt üblich sind, um die im späteren Verlauf der Arbeit entwickelten Bauteilaufbauten entsprechend dimensionieren zu können.

Abschließend werden in diesem Kapitel typische Konstruktionen gezeigt, die im Wiener Wohnbau aktuell Anwendung finden. Als unterstützendes Hilfsmittel wird hierfür neben der Erfahrung der Autorin insbesondere der *IBO Passivhaus Bauteilkatalog*<sup>3</sup> herangezogen, der eine Vielzahl üblicher Bauteilaufbauten ausweist. Die gezeigten Bauteile stellen dabei einen Querschnitt gängiger Ausführungsvarianten dar, können jedoch nicht die Gesamtheit aller in Wien umgesetzten Bauteile abbilden.

Nach Abgrenzung der Rahmenbedingungen, denen die in dieser Arbeit entwickelten Lehmteile unterliegen, erfolgt in [2 Der Baustoff Lehm](#) eine Analyse dieses Materials und seiner Eigenschaften auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, um ein Verständnis für die Stärken und Schwächen von Lehm zu vermitteln. Dieses ist bedeutend für die spätere Planung der Lehmteile, da das Verhalten des Baustoffes gegenüber unterschiedlichen Formen von Lasteinwirkung, Wärme oder Feuchtigkeit maßgebend beeinflusst, wie das Material eingesetzt werden kann.

Aufbauend auf dem Wissen über die spezifischen Eigenschaften des Baustoffes Lehm wird in [3 Lehm im großen Stil](#) der Versuch unternommen, Bauteile mit verschiedenen Lehmstoffen zu entwickeln. Die eigenständige Erarbeitung dieser Aufbauten ist insofern notwendig, da sich das Bauen mit Lehm in Österreich sowohl aktuell als auch im historischen Kontext vorwiegend auf kleinere Bauvorhaben beschränkt, an die geringere Anforderungen gestellt werden und deren Lastaufstellung deutlich von mehrgeschossigen Bauten abweicht. Vereinzelte Beispiele anderer Regionen, in denen mehrgeschossige Wohnhäuser aus Lehm umgesetzt wurden, liegen nur in sehr geringer Zahl vor. Die meist bereits vor mehr als 100 Jahren errichteten Bauwerke entsprechen zudem kaum den an modernen Wohnbau gestellten Anforderungen.

Anknüpfend an das in Kapitel 2 erarbeitete Wissen über den Baustoff Lehm erfolgt vor der konkreten Entwicklung besagter Bauteile eine Vorstellung einiger bedeutender Lehmbaumstoffe, ihrer Eingliederung in den Baustoffsektor sowie üblicher Vorgehensweisen bei ihrer Verarbeitung.

Des Weiteren wird an dieser Stelle eine vertiefende Analyse vorgenommen, welche Rolle Lehm in mehrschichtigen Bauteilen übernehmen kann und mit welchen Stoffen er besonders gut harmonisiert. Dabei wird ein Überblick geschaffen, in welche Baustoffkategorien Lehm eingeordnet werden kann – anders als für die meisten Baustoffe bietet das Material ein breites Einsatzgebiet und lässt sich weniger klar einer einzigen Funktion zuweisen.

Auf Grundlage dieser Untersuchung der spezifischen Baustoffeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten erfolgt schließlich die Entwicklung eines Lehm-Bauteilkatalogs für mehrgeschossige Wohnbauten. Wegen des zuvor geschilderten Fehlens entsprechender Standard-Aufbauten werden die Bauteile dabei nach Ermessen der Autorin unter Einbeziehung der stoffspezifischen Lehmeigenschaften entwickelt. Zusätzlich zur vorangegangenen Baustoffanalyse werden hierzu auch eine Vielzahl gebauter Beispiele aus kleineren Bauprojekten untersucht, um prinzipielle Planungsvorgänge nachzuvollziehen und diese anschließend an die gegebenen Anforderungen anzupassen. Da keine direkte Übernahme dieser Bauteile erfolgt, sondern deren Analyse vor allem als Vorstudie zu verstehen ist, wird auf das Ausweisen aller vorab untersuchten Beispiele verzichtet. Diese können jedoch in einschlägiger Literatur zum Bauen mit Lehm gefunden werden.

Für eine möglichst realitätsnahe und an den Markt angepasste Entwicklung der Bauteile erfolgt sooft möglich eine Umsetzung konkreter Bauprodukte in den Aufbauten. Die in den Bauteillisten ausgewiesenen Kennwerte beruhen daher zu einem großen Teil auf Herstellerangaben und sind im entsprechenden Kapitelabschnitt im Detail abgebildet.

Im Zuge der Erstellung dieses Bauteilkatalogs werden mithilfe der bauphysikalischen Berechnungssoftware *Archiphysik*<sup>4</sup> einige wesentliche Bauteilparameter berechnet und überprüft, ob diese den gesetzlich geforderten Grenzwerten entsprechen. Dabei zeigt sich jedoch ein Problem hinsichtlich der Abschätzung des erzielbaren Schalldämmvermögens der Bauteile, da für Aufbauten mit inhomogenen Bauteilschichten derzeit kein geeignetes Berechnungsverfahren vorliegt. Aus diesem Grund wird für die Bewertung der Luft- und Trittschalldämmung in Absprache mit dem Bauphysiker *Prok. DI Paul Track*<sup>5</sup> auf vereinfachte Berechnungen und Schätzungen auf Basis von Referenzbauteilen zurückgegriffen. Als solche werden insbesondere Holzbauteile der Datenbank *Dataholz*<sup>6</sup> herangezogen, für die eine Bewertung des Schalldämmvermögens durch Prüfanstalten vorliegt.

Auf Grundlage der ermittelten Daten wird abschließend ein Fazit gezogen, welche der überlegten Bauteilaufbauten für den Wiener Wohnbau voraussichtlich zulässig und für einen Vergleich mit konventionellen Konstruktionen geeignet sind.

Kapitel 4 *Lehm macht Konkurrenz* ergründet anschließend die Frage, ob die zuvor entwickelten Lehmteile das Potential haben, an Stelle aktuell gängiger Bauteilaufbauten zu treten. Die in diesem Abschnitt durchgeführten Vergleiche teilen sich dabei prinzipiell in die drei Themenbereiche Bauphysik, Ökologie und Ökonomie.

4 A-NULL Development GmbH: Archiphysik - Software für bauphysikalische Berechnungen

5 Prok. DI Paul Track, Abteilungsleitung Bauphysik, RWT Plus, Woschitz Group

6 DATAHOLZ: *Katalog bauphysikalischer und ökologisch geprüfter Holzbauteile*

Eine erste Gegenüberstellung erfolgt anhand der in Kapitel 1.2 und 3.4 ermittelten bauphysikalischen Kennwerte der Konstruktionen. Neben den berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten und dem Wärmespeichervermögen der Bauteile wird hier auch untersucht, inwieweit sich die gezeigten Aufbauten für den Niedrig-, Niedrigst- und Passivhaus-Standard eignen. Dies kann jedoch nur anhand der erzielten U-Werte geschehen, da in eine allumfassende Bewertung viele weitere Faktoren wie beispielsweise die tatsächliche Luftdichtigkeit der Bauteilanschlüsse oder die Geometrie des Gebäudes einfließen. Da sich die vorliegende Diplomarbeit indes rein auf mögliche Bauteilaufbauten beschränkt, kann die Energieeffizienz an dieser Stelle nur auf Grundlage der wärmetechnischen Kennwerte bewertet werden.

Neben dem Verhalten der Bauteile gegenüber Wärme wird anschließend das zuvor abgeschätzte Schalldämmvermögen der Aufbauten gegenübergestellt, um auch in diesem Bereich eine Aussage über den Einfluss von Lehm auf diese für den Wohnbau besonders relevante Eigenschaft zu treffen.

Als dritter Themenschwerpunkt gilt im Bereich des bauphysikalischen Vergleichs eine Abschätzung des Brandverhaltens konventioneller Bauteile gegenüber den gezeigten Konstruktionen aus Lehm. Dabei muss in Ermangelung geeigneter Berechnungsmethoden auf entsprechende Brandversuche verwiesen werden. Wenngleich diese für konventionelle Bauteilaufbauten meist in ausreichender Zahl vorliegen, sind Bauteilaufbauten aus Lehm auf diesem Gebiet zu wenig erforscht, um auf entsprechende Daten zugreifen zu können.

Anstelle eines konkreten Vergleichs der gezeigten Bauteilaufbauten wird daher das Brandverhalten von Lehmbaustoffen im Detail analysiert und auf Basis von Brandversuchen, die von versierten Lehmbauern in Eigeninitiative durchgeführt wurden, eine Abschätzung getroffen, in welche Baustoffklasse Lehm hier einzuordnen ist.

Nach dieser bauphysikalischen Beurteilung der Lehmbauteile erfolgt in einem zweiten Vergleich eine detaillierte Analyse über die ökologischen Vor- und Nachteile der entwickelten Lehm-Konstruktionen gegenüber herkömmlichen Bauweisen.

Als geeignetes Mittel erscheint hier besonders die Durchführung einer Ökobilanzierung, da diese rechnerisch nachvollziehbar und ausreichend objektiv ist. Dabei kann auf eine Vielzahl an Berechnungsmodellen zurückgegriffen werden, die sich meist anhand der gesetzten Schwerpunkte und einbezogenen Öko-Indikatoren voneinander unterscheiden.

Für die vorliegende Arbeit wird die Bilanzierungsmethode *OI3 Index* gewählt, da diese in der Berechnungssoftware *Archiphysik* implementiert ist, mit der bereits sämtliche bauphysikalischen Bewertungen durchgeführt wurden. Somit ist gewährleistet, dass sich die den Bauteilschichten zugewiesenen Bauprodukte von jenen des zuvor geführten bauphysikalischen Vergleichs nicht unterscheiden, wodurch Fehler auf diesem Gebiet vermieden werden. Zusätzlich bietet das Ökobilanz-Modell *OI3 Index* den Vorteil, nicht nur Gebäude oder Bauteile, sondern auch einzelne Bauteilschichten bzw. Materialien zu bewerten. Die erstellte Punktebewertung bietet dadurch eine rasche Hilfestellung bei der Identifikation ökologisch ungünstiger Materialien, wodurch die Beurteilung besonders einfach nachzuvollziehen ist.

Neben der Bewertung der direkten Umweltwirkungen der gezeigten Bauteilaufbauten erfolgt in einem weiteren Schritt auch eine Betrachtung der Langzeitwirkungen der Konstruktionen. Anhand des ebenfalls im *OI3 Index* enthaltenen Entsorgungsindikators wird analysiert, inwieweit sich die Entsorgung von Lehmbaustoffen auf die Umwelt

auswirkt und welche Vor- und Nachteile diese dabei gegenüber heute üblichen Aufbauten aufweisen.

Die dritte Säule der vergleichenden Analyse bildet ein Blick auf die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Lehmbauteile gegenüber den heute meist ausgeführten Wand- und Deckenaufbauten.

Aufgrund der lückenhaften Datenlage im Bereich der Zeit- und Kostenaufstellung kann hier jedoch keine exakte Gegenüberstellung dieser Parameter zwischen den einzelnen Bauteilaufbauten erfolgen. Anhand gesammelter Daten aus Herstellerpreislisten sowie Richtpreisen wird jedoch zumindest hinsichtlich der Materialkosten ein Überblick gegeben, in welchem Preissegment sich Lehmbaustoffe gegenüber konventionellen Materialien bewegen.

Die exakte Berechnung der Bauzeiten, mit denen für die entwickelten Lehmbauteile gerechnet werden muss, erweist sich aufgrund der geringen Anzahl realisierter Beispiele ebenfalls als schwierig. Zudem beeinflussen einige Faktoren wie die Gegebenheiten auf der Baustelle und die Verfügbarkeit von Material und Geräten üblicherweise den tatsächlichen Zeitaufwand – diese sind jedoch für theoretische Bauteilaufbauten ohne konkretes Bauprojekt kaum zu erfassen. Dennoch wird an dieser Stelle der Versuch unternommen, eine ungefähre Einordnung der einzuplanenden Bauzeiten für das Bauen mit Lehm zu treffen. Zudem wird anhand einiger Beispiele gezeigt, durch welche Maßnahmen sich die voraussichtlichen Errichtungszeiten beeinflussen lassen. Da die Wirtschaftlichkeit eines Gebäudes nicht nur von Herstellungskosten und -zeiten abhängig ist, wird anschließend untersucht, inwieweit sich Bauteilaufbauten aus Lehm in ihrer Komplexität von anderen Aufbauten unterscheiden. Dabei wird einerseits analysiert, welches Vorwissen die ausführenden Arbeiter benötigen, andererseits aufgezeigt, in welchem Maße sich der Aufbau solcher Konstruktionen von bekannten Ausführungsvarianten unterscheidet.

Als letzter Aspekt wird abschließend die rechtliche Situation um das Bauen mit Lehm beleuchtet. Da die österreichische Normenlage auf diesem Gebiet bis heute kaum ausgeprägt ist, wird an dieser Stelle der Frage nachgegangen, welche Hürden im Laufe eines Genehmigungsprozesses hinsichtlich des Einsatzes von Lehmbaustoffen auftreten können. Ein Blick in Länder wie Deutschland soll dabei verdeutlichen, welchen Nutzen das Einführen entsprechender Richtlinien haben kann und welche Schritte notwendig sind, um den Lehm auch in Österreich planungssicher zu verankern.

Am Ende der Gegenüberstellungen aus den drei Themenbereichen Bauphysik, Ökologie und Ökonomie wird ein Fazit gezogen, ob das Bauen mit Lehm im städtischen Raum in Österreich zukunftsweisend sein kann. Dabei werden bereits bestehende Vorteile des Baustoffes aufgezeigt und eine Perspektive geschaffen, wie das Bauen mit Lehm in Zukunft aussehen kann. Neben den Hürden, die dem Lehm im Wiener Wohnbau aktuell noch im Weg stehen, wird auch dargestellt, welches Potential hier bei einer Verbesserung der Rahmenbedingungen noch besteht.

### ***Abgrenzung und Einschränkung des Themas***

Obwohl das Bauen mit Lehm den Menschen seit Jahrhunderten begleitet, ist seine Anwendung in der modernen Architektur dennoch zu einem großen Teil in Vergessenheit geraten. Durch seine Verdrängung im Bausektor durch andere Baustoffe fehlt es dem Material heute vielerorts an entsprechenden Umsetzungsrichtlinien und der grundlegenden Erforschung seiner Anwendbarkeit in größeren Bauprojekten. Die

Vielzahl bestehender Forschungslücken im Bereich des urbanen mehrgeschossigen Lehmbaus kann im Rahmen einer Diplomarbeit nicht in ihrer Gänze aufgearbeitet werden, weshalb für die vorliegende Arbeit einige Eingrenzungen getroffen werden müssen. Im Fokus steht aus diesem Grund die Entwicklung von Wand-, Decken- und Dachaufbauten aus Lehm, die sich für den städtischen Wohnbau eignen. Eine zusätzliche Erarbeitung der dazugehörigen Anschlussdetails kann jedoch nicht erfolgen, da diese aufgrund aktuell kaum vorhandener Standardlösungen noch einem hohen Maß an zusätzlicher Forschung bedürfen. Die vorliegende Arbeit unternimmt den Versuch, die prinzipielle Umsetzbarkeit von Lehmteilen im urbanen Wohnbau zu demonstrieren, weshalb es zielführend erscheint, den Schwerpunkt an dieser Stelle auf die Entwicklung der Bauteile selbst zu legen. Eine Erarbeitung möglicher Anschlussdetails dieser Aufbauten ist wünschenswert, muss aber in zukünftiger Forschung erfolgen.

Ohne die Ausarbeitung von Bauteilanschlüssen erscheint zudem auch die Implementierung der vorgestellten Aufbauten in beispielhafte Gebäude nicht als zielführend. Aussagekräftige Gebäudesimulationen können nur auf Grundlage umfassender Hintergrundinformationen erfolgen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht zur Verfügung gestellt werden können. Auch hier muss auf weitere Forschungsprojekte verwiesen werden.

Die notwendige Eingrenzung der vorliegenden Arbeit auf die Behandlung von Bauteilaufbauten bedingt, dass nicht alle der nachfolgend behandelten Themengebiete in ihrer Gänze erforscht werden können. Als Beispiel gilt hier unter anderem die durchgeführte Untersuchung der Bauteile auf eine Eignung für den Niedrig-, Niedrigst- und Passivhausstandard, der an dieser Stelle nur auf Grundlage der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile geführt werden kann und daher nur eine ungefähre Einschätzung erlaubt, ob die Erreichung der genannten Standards prinzipiell möglich ist. Eine dezidierte Aussage, ob die entsprechenden Energieklassen mit den vorgestellten Bauteilen tatsächlich erreichbar sind, kann ohne die Betrachtung aller Einflussfaktoren jedoch nicht getroffen werden. Dies wird erst in zukünftigen Studien im Zuge von Gebäudesimulationen möglich sein.

Neben dieser durch die Themeneingrenzung bedingten notwendigen Vereinfachung muss auch im Bereich des Brand- und Schallschutzes auf eine vollständige und durch Versuchsreihen untermauerte Beurteilung verzichtet werden. Da aktuell kaum offiziell gültige Klassifizierungen von Lehmstoffen und -bauteilen hinsichtlich ihres Brandverhaltens und ihrem Schalldämmvermögen vorliegen, kann eine exakte Beurteilung dieser Eigenschaften nur durch entsprechende Labor-Messungen und Versuche erfolgen. Diese können im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht umgesetzt werden und müssen in eigenständigen Forschungen ermittelt werden.

Die nachfolgende Diplomarbeit gibt einen möglichst breitgefächerten Überblick über die generelle Umsetzbarkeit von Lehmstoffen im urbanen Wohnbau und ist dabei vor allem auf die Entwicklung von Bauteilaufbauten fokussiert. Die zuvor beschriebenen Eingrenzungen des Forschungsgebiets sind dabei notwendig, bedingen aber auch, dass nicht alle im Lehmbau noch offenen Forschungsfragen beantwortet werden können. Diese Diplomarbeit stellt einen ersten Forschungsschritt auf dem Gebiet des modernen Lehm-Wohnbaus dar, den es in zukünftigen Studien und Projekten aufzugreifen und zu vertiefen gilt.

# 1 Über das Bauen in Wien

Um einen möglichst realitätsnahen Vergleich zwischen Konstruktionen aus Lehm und den derzeit in Wien üblichen Bauteilaufbauten durchführen zu können, müssen zunächst die vorliegenden Rahmenbedingungen erläutert werden. Im Folgenden wird gezeigt, welchen bauphysikalischen Grenzwerten und städtebaulichen Vorschriften neu errichtete Wohnbauten in Wien aktuell unterliegen. Anschließend werden die gängigsten in Wien angewandten Bauteilsysteme vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit mit Aufbauten aus Lehm verglichen werden sollen. Die gezeigten Bauteile können dabei nicht den gesamten Umfang technisch umsetzbarer Aufbauvarianten abbilden, sondern stellen vielmehr einen repräsentativen Querschnitt der im Neubau gebräuchlichen Ausführungen dar.

## 1.1 Vorschriften, Normen, Regelwerke

Wohngebäude, die in der Stadt Wien neu errichtet werden, müssen einer Vielzahl von Anforderungen genügen. Diese werden einerseits durch die Wiener Bauordnung festgelegt, andererseits durch ÖNORMEN sowie OIB-Richtlinien definiert, die den Stand der Technik abbilden, jedoch weniger verbindlich sind als gesetzliche Regelungen. Dabei werden sowohl bauphysikalische Grenzwerte bestimmt als auch ganz allgemeine Anforderungen an die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit gestellt. So müssen in Wien errichtete Bauwerke zum Beispiel in jener Art ausgeführt sein, dass sie über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum alle Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Alle Bauteile müssen zudem aus ausreichend widerstandsfähigen Baustoffen hergestellt oder vor schädigenden Einwirkungen geschützt werden.<sup>7</sup> Dies bedeutet beispielsweise, dass außen liegende Putzsysteme ausreichend feuchtebeständig sein müssen, um keine Schäden durch Schlagregen oder Frost zu erleiden oder durch entsprechende Maßnahmen vor solchen Witterungseinflüssen zu schützen sind.

Um ein ausreichendes Verständnis zu erlangen, welchen Kriterien die im Fokus dieser Arbeit stehenden Lehmbauteile genügen müssen, werden an dieser Stelle einige relevante, gesetzlich festgelegte Mindestanforderungen an Baustoffe und Bauteile aufgezeigt.

### 1.1.1 Bauakustische Anforderungen

Schallschutz zählt zu den wichtigsten Kriterien für ein angenehmes Wohnklima. Abhängig von der Entstehung des Schalls wird im Bauwesen zwischen Luft- und Körper- bzw. Trittschallschutz unterschieden. Während Luftschall sich durch Schwingungen in der Luft ausbreitet, die beispielsweise durch Sprechen entstehen, wird bei Körperschall ein Bauteil direkt zu Bewegungen angeregt. Trittschall stellt eine Form des Körperschalls dar, bei der eine Decke durch Impulse wie Gehen zu schwingen beginnt.

Abhängig von ihrer Position im Gebäude müssen Bauteile, die eine Nutzungseinheit von einer anderen oder vom Außenraum abtrennen, einen ausreichenden Luft- bzw. Trittschallschutz aufweisen.

7 vgl. §88 Abs 3 wr BauO LGBl 11/1930 idF LGBl 71/2018

Das Schalldämmvermögen von Bauteilen gegen Luftschall wird durch das Schalldämm-Maß  $R$  beschrieben, welches das Verhältnis der auf das Bauteil auftreffenden zu der durch das Bauteil übertragenen Schalleistung angibt und für eine bestimmte Frequenz im Labor gemessen wird. Um diese Angabe besser an das menschliche Gehör anzupassen, kann das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  herangezogen werden, das eine Einzahlangabe aus den  $R$ -Werten für jede Frequenz bildet.

Die Schalldämm-Maße  $R$  und  $R_w$  stellen dabei reine Labor-Prüfwerte dar, bei denen nur das Trennbauteil allein gemessen wird. In der Realität erfolgt die Luftschallübertragung jedoch nicht nur durch ein Bauteil, sondern auch durch alle an dieses angrenzenden Flankenbauteile. Analog zu  $R$  und  $R_w$  können daher entsprechend das Bau-Schalldämm-Maß  $R'$  und das bewertete Bau-Schalldämm-Maß  $R'_w$  vor Ort gemessen werden, wobei sowohl das trennende als auch die flankierenden Bauteile berücksichtigt werden.

Für Bauteile, die aus mehreren Teilflächen – beispielsweise massiven Wänden und Fenstern – bestehen, wird dabei das bewertete resultierende Bau-Schalldämm-Maß  $R'_{res,w}$  gebildet, das sich aus den bewerteten Bau-Schalldämm-Maßen der einzelnen Elemente zusammensetzt.<sup>8</sup>

Die beschriebenen Schalldämm-Maße haben den Nachteil, dass sie nur die Schallübertragung durch ein Bauteil und ggf. seine Flanken abbilden. Die tatsächliche Luftschallübertragung hängt jedoch zusätzlich zum Schalldämmvermögen des Bauteils auch von der Nachhallzeit im Empfangsraum ab. Aus diesem Grund wird die Luftschalldämmung zwischen zwei Räumen mittlerweile durch die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT,w}$  ausgedrückt, die die vom Nutzer wahrgenommene Schallübertragung realitätsnäher darstellt. Sie wird unter Berücksichtigung der gemessenen Nachhallzeit  $T$  auf eine genormte Nachhallzeit  $T_0$  von 0,5s bezogen und beschreibt die Schallpegeldifferenz zwischen Sende- und Empfangsraum.<sup>9</sup>

Während das Schalldämmvermögen eines Bauteils gegenüber Luftschall sowohl Wand- als auch Deckenelemente betrifft, bezieht sich die Dämmung eines Bauteils gegen Trittschall ausschließlich auf Geschossdecken. Zur Beschreibung des Trittschalldämmvermögens eines Bauteils wird der bewertete Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT,w}$  herangezogen, der das Verhältnis der auftreffenden zur übertragenen Schalleistung angibt und dabei ebenfalls die genormte und gemessene Nachhallzeit berücksichtigt.<sup>10</sup>

Die Mindestwerte, die Bauteile für einen ausreichenden Schallschutz erreichen müssen, sind in Österreich in der ÖNORM B 8115-2 geregelt – die OIB-Richtlinie 5 bezieht sich ebenfalls auf diese Werte. Die nachstehenden Tabellen geben auszugsweise einen Überblick über die festgelegten Mindestanforderungen an Bauteile hinsichtlich ihres Schalldämmvermögens.

8 vgl. Informationsdienst Holz, S.4

9 vgl. KUENZ, S.16ff.

10 vgl. ebenda, S.14

<i>Mindestforderliches bewertetes Schalldämm-Maß für Außenbauteile</i>			
Maßgeblicher Außenlärmpegel [dB]		Außenbauteile gesamt $R'_{res,w}$ [dB]	Außenbauteile opak $R_w$ [dB]
Tag	Nacht		
46-50	36-40	33	43
51-60	41-50	38	43
65	55	40,5	45,5
70	60	43	48

Tabelle 1: Mindestforderliche Schalldämmung von Außenbauteilen<sup>11</sup>

Die in obenstehender Tabelle angegebenen Schalldämm-Maße beziehen sich auf für städtisches Gebiet relevante Außenlärmpegel. Diese beeinflussen die Anforderungen an den Schallschutz von Außenbauteilen und werden zur vereinfachten Berechnung als Planungsrichtwerte in der ÖNORM B 8115-2 zur Verfügung gestellt. Der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel beträgt demnach für städtisches Wohngebiet 55dB bei Tag bzw. 45dB bei Nacht und für städtisches Kerngebiet 60dB bzw. 50dB.<sup>12</sup> Neben diesen Richtwerten kann der tatsächliche Lärmpegel der Umgebung auch aus Schallimmissionskarten ermittelt oder vor Ort gemessen werden.

Das Schalldämmvermögen von Bauteilen im Gebäudeinneren gegen Luftschall wird nach aktueller Normenlage über die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT,w}$  beurteilt. Diese berücksichtigt neben dem Bauteil und seinen Flanken auch die gegebene Raumsituation.

<i>mindestforderliche bewertete Standard-Schallpegeldifferenz <math>D_{nT,w}</math></i>		
zu	aus	$D_{nT,w}$ [dB]*
Aufenthaltsräumen	Räumen anderer Nutzungseinheiten	55/50
	allgemein zugänglichen Bereichen (z.B. Treppenhaus)	55/50
Nebenräumen	Räumen anderer Nutzungseinheiten	55/35
	allgemein zugänglichen Bereichen (z.B. Treppenhaus)	55/35

\* Werte ohne / mit Verbindung durch Türen, Fenster oder sonstige Öffnungen

Tabelle 2: Mindestforderliche Luftschalldämmung zwischen Räumen in Wohnbauten<sup>13</sup>

Die Berücksichtigung der an ein Bauteil angrenzenden Flankenbauteile sowie der umliegenden Raumvolumen und -geometrien erzielt eine realitätsnahe Abbildung der Schalldämmung des untersuchten Aufbaus. Für diese Diplomarbeit ist eine solch umfassende Betrachtung allerdings problematisch, da keine konkreten Gebäudesituationen, sondern einzelne Bauteile beurteilt werden. Aus diesem Grund wird für die in den Kapiteln [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) und [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) gezeigten Wand- und Deckensysteme anstelle der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT,w}$  das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  ermittelt. Dieses repräsentiert das Schalldämmvermögen eines einzelnen Bauteils ohne angrenzende Wände oder Decken. Als Faustformel kann für dieses beispielsweise eine Mindestanforderung von 58dB angenommen werden, damit das Trennbauteil unter Berücksichtigung der Flankenübertragung einen  $D_{nT,w}$ -Wert von 55dB erzielt.<sup>14</sup>

11 vgl. OIB-Richtlinie 5 2019, S.2

12 vgl. ÖNORM B8115-2 2006, S.6

13 vgl. OIB-Richtlinie 5 2019, S.4

14 vgl. Land Oberösterreich 2017, S.7

<i>mindestforderliches bewertetes Schalldämm-Maß <math>R_w</math></i>	
Bauteilgruppe	$R_{w,min}$ [dB]
Außenwand	43
Wohnungsinnenwand	keine Anforderung
Wohnungstrennwand	58
Geschossdecke	58
Dach	33

Tabelle 3: *mindestforderliches bewertetes Schalldämm-Maß einiger Bauteilgruppen<sup>15</sup>*

Im Bereich der Geschossdecken wird zusätzlich zur Beurteilung des Luftschallschutzes auch eine Bewertung des Trittschalldämmvermögens gefordert. Die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Trittschallpegel stellen jeweils Maximalwerte dar, die von den Bauteilen unterschritten werden müssen.

<i>höchstzulässiger bewerteter Standard-Trittschallpegel <math>L'_{nT,w}</math></i>		
in	aus	$L'_{nT,w}$ [dB]
Aufenthaltsräumen	Räumen anderer Nutzungseinheiten	48
	allgemein zugänglichen Terrassen, Dachgärten, Balkonen, Loggien, Dachböden	48
	allgemein zugänglichen Bereichen (z.B. Treppenhaus)	50
	nutzbaren Terrassen, Dachgärten, Loggien, Dachböden	53
	Balkonen	55
Nebenräumen	Räumen anderer Nutzungseinheiten	53
	allgemein zugänglichen Terrassen, Dachgärten, Balkonen, Loggien, Dachböden	53
	allgemein zugänglichen Bereichen (z.B. Treppenhaus)	55
	nutzbaren Terrassen, Dachgärten, Loggien, Dachböden	58
	Balkonen	60

Tabelle 4:  *$L'_{nT,w}$ -Grenzwerte für Wohnbauten<sup>16</sup>*

Analog zu  $D_{nT,w}$  berücksichtigt auch der bewertete Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT,w}$  neben dem Trennbauteil zusätzlich dessen Flanken sowie die angrenzende Raumkubatur. Für die Berechnung der im Zuge dieser Arbeit gezeigten Beispiele wird daher auf den Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  verwiesen, der ähnlich wie das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  nur das Bauteil selbst beurteilt.

### 1.1.2 Wärmetechnische Grenzwerte

Die thermische Hülle eines Gebäudes hat unter anderem die Aufgabe, den Wärmestrom vom Gebäudeinneren nach außen weitestgehend zu minimieren, um den Heizwärmebedarf des Objekts möglichst gering zu halten.

Der Wärmestrom durch die Gebäudehülle hängt dabei neben der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten auch von der Position des Bauteils, seiner Größe sowie der Außen- und Innentemperatur ab, die sich im Laufe eines Tages stetig ändert. Durch die Vielzahl von Einflussfaktoren ist es schwierig, den Wärmedurchgangswiderstand verschiedener Aufbauten mithilfe des tatsächlichen Wärmestroms zu vergleichen.

<sup>15</sup> Grenzwerte basierend auf der Software Archiphysik, A-NULL Development GmbH

<sup>16</sup> vgl. OIB-Richtlinie 5 2019, S.4

Aus diesem Grund wurde ein Wärmedurchgangskoeffizient eingeführt, der den Wärmestromdurchgang für Außenbauteile im stationären Zustand, d.h. ohne stetige Temperaturänderung, unter festgelegten Rahmenbedingungen angibt und als U-Wert bezeichnet wird. Dieser beschreibt die Energiemenge, die in einer Sekunde durch eine 1m<sup>2</sup> große Fläche des Bauteils fließt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum 1K beträgt.

Die folgende Tabelle zeigt die in Österreich festgelegten Grenzwerte des Wärmedurchgangs, die Außenbauteile maximal aufweisen dürfen.

<i>höchstzulässiger Wärmedurchgangskoeffizient</i>	
Bauteil	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Wand gegen Außenluft	0,35
Wand gegen unbeheizte oder nicht ausgebaute Dachräume	0,35
Wand gegen unbeheizte, frostfreie Gebäudeteile und Garagen	0,60
Wand erdberührt	0,40
Wand zwischen Wohneinheiten oder konditionierten Treppenhäusern	1,30
Wand innerhalb einer Wohneinheit	–
Decke / Dachschräge gegen Außenluft	0,20
Decke / Dachschräge gegen ungedämmte Dachräume	0,20
Decke gegen unbeheizte Gebäudeteile	0,40
Decke zwischen Wohneinheiten	0,90
Decke innerhalb einer Wohneinheit	–
Decke über Außenluft (z.B. Durchfahrten)	0,20
Decke gegen Garage	0,30
Decke (Boden) erdberührt	0,40

*Tabelle 5: maximal zulässiger U-Wert unterschiedlicher Bauteile<sup>17</sup>*

### 1.1.3 Anforderungen an den Brandschutz

Neben dem Schall- und Wärmeschutz von Gebäuden ist insbesondere auch deren Brandschutz von Bedeutung, da er die Sicherheit der Bewohner im Brandfall gewährleistet.

Die Anforderungen an Bauteile und Baustoffe hinsichtlich ihres Brandwiderstandes und Tragverhalten bei Brand hängen einerseits von ihrem Einsatzgebiet im Gebäude ab, andererseits von der Gebäudehöhe, Gebäudenutzung und Länge der Fluchtwege.

Aufgrund der Vielzahl von Brandschutzbestimmungen in Abhängigkeit vom Gebäudetyp kann an dieser Stelle kein vollständiger Überblick über alle brandschutztechnischen Vorgaben gegeben werden – vielmehr werden einige beispielhafte und für den Verlauf dieser Arbeit relevante Anforderungen aufgezeigt. Eine umfassende Auflistung aller Brandschutzmaßnahmen kann beispielsweise in der OIB-Richtlinie 2 nachgelesen werden.

<sup>17</sup> vgl. OIB-Richtlinie 6 2019, S.5f.

<i>Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen</i>				
Bauteil	Gebäudeklasse			
	GK3	GK4	GK5	
			max. 6 Geschosse	mehr als 6 Geschosse
<i>Fassaden</i>				
WDVS	D	C-d1	C-d1	C-d1
vorgehängte Fassade	D-d1	B-d1	B-d1	B-d1
Bodenbeläge	D <sub>fl</sub>	C <sub>fl</sub> -s1	C <sub>fl</sub> -s1	C <sub>fl</sub> -s1
<i>Treppenhäuser</i>				
Wandbekleidungen	C	B	A2	A2
abgehängte Decken	C-s1, d0	B-s1, d0	A2-s1, d0	A2-s1, d0
Bodenbeläge	C <sub>fl</sub> -s1	B <sub>fl</sub> -s1 bzw. C <sub>fl</sub> -s1	A2fl-s1 bzw. B <sub>fl</sub> -s1	A2 <sub>fl</sub> -s1
<i>Dächer mit max. 60° Neigung</i>				
Dacheindeckungen	B <sub>roof</sub> (t1)	B <sub>roof</sub> (t1)	B <sub>roof</sub> (t1)	B <sub>roof</sub> (t1)
Wärmedämmung in der Dachkonstruktion	E	B	B	B
A1/2...kein Beitrag zum Brand B...sehr begrenzter Beitrag zum Brand C...begrenzter Beitrag zum Brand D...hinnehmbarer Beitrag zum Brand E...hinnehmbares Brandverhalten F...keine Leistung (im Hinblick auf Flammwidrigkeit) feststellbar s1/2/3...Qualmbildung; schwach / normal / stark qualmend d0/1/2...Tropfenbildung; nicht tropfend / tropfend / zündend tropfend				

Tabelle 6: Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen<sup>18</sup>

<i>Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen</i>				
Bauteil	Gebäudeklasse			
	GK3	GK4	GK5	
			max. 6 Geschosse	mehr als 6 Geschosse
<i>Tragende Bauteile, ausgenommen Decken und brandabschnittsbildende Wände</i>				
oberstes Geschoss	R30	R30	R60	R60
oberirdische Geschosse	R60	R60	R90	R90, A2
unterirdische Geschosse	R90, A2	R90, A2	R90, A2	R90, A2
<i>Trennwände, ausgenommen Wände von Treppenhäusern</i>				
oberstes Geschoss	REI30 / EI30	REI60 / EI60	REI60 / EI60	REI60 / EI60
oberirdische Geschosse	REI60 / EI60	REI60 / EI60	REI90 / EI90	REI90, A2 / EI90, A2
unterirdische Geschosse	REI90, A2 / EI90, A2			
<i>Brandabschnittsbildende Wände und Decken</i>				
Zu Nachbargrundstück oder Bauplatzgrenze	REI90, A2 / EI90, A2			
sonstige	REI90 / EI90	REI90 / EI90	REI90 / EI90	REI90, A2 / EI90, A2

18 vgl. OIB-Richtlinie 2 2019, S.20

<i>Decken, Dachschrägen mit max. 60° Neigung</i>				
Decke über oberstem Geschoss	R30	R30	R60	R60
Trenndecke über oberstem Geschoss	REI30	REI60	REI60	REI60
Trenndecke über oberirdischem Geschoss	REI60	REI60	REI90	REI90, A2
Decke innerhalb von Wohneinheiten	R30	R30	R60	R90, A2
Decken über unterirdischem Geschoss	REI90, A2	REI90, A2	REI90, A2	REI90, A2
<i>R...Tragfähigkeit</i> <i>E...Raumabschluss</i>	<i>I...Wärmedämmung</i> <i>30/60/90...Feuerwiderstandsdauer in Minuten</i>			

Tabelle 7: Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen<sup>19</sup>

### 1.1.4 Zulässige Gebäudehöhen

Auch wenn Wien die größte Stadt Österreichs ist, sind die vorliegenden Gebäudehöhen im Vergleich zu anderen Großstädten verhältnismäßig niedrig, was unter anderem auf den großen Anteil historischer Gebäude zurückzuführen ist. Um ein einheitliches Stadtbild zu gewährleisten, gelten daher auch für Neubauten vergleichsweise restriktive Höhenbeschränkungen, die durch von der Wiener Bauordnung festgelegte Gebäudeklassen definiert sind.

Gebäudeklasse	Mindesthöhe [m]	Maximale Höhe [m]
GK1	2,5	9
GK2	2,5	12
GK3	9	16
GK4	12	21
GK5	16	26
GK6	21	lt. Bebauungsplan

Tabelle 8: zulässige Gebäudehöhen in Wien<sup>20</sup>

Für jedes, in Wien als Bauland gewidmetes Grundstück ist eine solche Gebäudeklasse im Flächenwidmungsplan bestimmt. Dieser sieht derzeit für Gebiete innerhalb des Gürtels vor allem die Gebäudeklassen 3 und 4 vor, was einer maximalen Gebäudehöhe von 16m bzw. 21m entspricht und bei der gesetzlich festgelegten lichten Mindestraumhöhe von 2,50m für Aufenthaltsräume in Abhängigkeit von den gewählten Bauteilaufbauten durchschnittlich 5 bis 7 Geschosse ermöglicht.

Festlegungen von Gebäudeklassen, die deutlich größere Gebäudehöhen erlauben, sind in Wien derzeit nur in geringer Menge vorgesehen. Beispiele für derartige Neubau-Wohntürme sind das Projekt „Triiple“ am äußeren Rand des 3. Bezirks mit ca. 30 Geschossen und einer Höhe von etwa 120m je Turm oder das Projekt „HoHo“ in der Seestadt Aspern mit 24 Geschossen auf ungefähr 85m Höhe.

Da es sich bei diesen neuen Wohnhochhäusern in Wien derzeit noch um Ausnahmefälle handelt und im Bestand ebenfalls keine große Zahl an derart hohen Wohnbauten vorliegt, werden sich die im späteren Verlauf der Arbeit gezeigten Bauteilaufbauten in ihrer Dimensionierung nicht an diesen Hochhäusern orientieren, sondern für Gebäude mit einer für Wien durchschnittlichen Höhe bemessen werden.

<sup>19</sup> vgl. OIB-Richtlinie 2 2019, S.22

<sup>20</sup> §75 Abs 2 wr BauO LGBl11/1930 idF LGBl 71/2018

## 1.2 Wiener Bauteilaufbauten

Das folgende Kapitel stellt exemplarisch einige Bauausführungen vor, die aktuell im Wiener Wohnungsneubau Anwendung finden. Der Fokus liegt hier vor allem auf der Stahlbeton- und Ziegelbauweise, die aufgrund ihrer einfachen Handhabung und günstigen Umsetzung besonders häufig ausgeführt wird. Im Innenausbau werden zusätzlich Wandaufbauten in Trockenbauweise vorgestellt.

Da im Zuge des wachsenden Interesses an nachhaltiger Architektur auch der Holzbau immer mehr an Bedeutung im Bauwesen zurückgewinnt und längst nicht mehr auf den Dachgeschossausbau beschränkt ist, werden außerdem einige beispielhafte Holzrahmen- und Holzmassivbauteile angeführt.

Als Basis für die gezeigten Bauteile dienen insbesondere der *IBO Passivhaus Bauteilkatalog*<sup>21</sup> sowie die Datenbank *Dataholz*.<sup>22</sup> Die für die Aufbauten verwendeten Materialkennwerte basieren großteils auf den Angaben dieser Plattformen. Ausgenommen hiervon sind Baustoffe, die auch in [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) Anwendung finden und deren Materialkennwerte meist auf Herstellerangaben zu konkreten Produkten basieren. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Baustoffe und die Quelle der entsprechenden Materialkennwerte:

<i>Holz und Holzwerkstoffe</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Fichtenholz <sup>1</sup>	BAUBOOK	Nutzholz 425 rauh luftgetrocknet
Brettstapelelement <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Massivholz verleimt
OSB-Platte	Agepan	OSB 3 / PUR
<i>Dämmstoffe</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
EPS <sup>1</sup>	BAUBOOK	EPS F
EPS-Drainageplatte <sup>1</sup>	IBO	Drainplatte EPS
XPS-Dämmplatte	Austrotherm GmbH	XPS Top30SF
Mineralwolle <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Mineralwolle
Mineralwolle TSD <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Trittschalldämmung MW-T
Mineralfaserplatte <sup>1</sup>	BAUBOOK	Mineral Plus HB 034
Zellulosefaser <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Zellulosefaser
Holzwole-Leichtbauplatte <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Holzwoleleichtbauplatte
Holzfaserdämmplatte	Steico SE	Steico Isorel Standard Holzfasерplatte
<i>Massive Baustoffe</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Vollziegel, tragend <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Ziegel KV25
Vollziegel, nicht tragend <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Ziegel KV12
Ziegelhohlkörperelement <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Ziegelhohlkörper ohne Aufbeton (Decke)
Stahlbeton <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	STB Wand / STB Decke
Beton unbewehrt <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Beton R1600
Zementestrich <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Zementestrich

21 IBO: *Passivhaus Bauteilkatalog, ökologisch bewertete Konstruktionen*

22 DATAHOLZ: *Katalog bauphysikalischer und ökologisch geprüfter Holzbauteile*

<i>Bepunktung, Oberflächenabschluss</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Gipskartonplatte <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Gipsplatte Typ DF (GKF)
Zement-Putz <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Zementputz R2000
Kalk-Gips-Putz <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Kalk-Gips-Putz R1300
Silikat-Putz o. Kh. <sup>1</sup>	ARCHIPHYSIK	Silikatputz ohne Kunstharz
Parkettboden <sup>1</sup>	BAUBOOK	Massivparkett
Betondachstein <sup>1</sup>	BAUBOOK	Bramac Classic PP
Blecheindeckung <sup>1</sup>	BAUBOOK	Rheinzink Stehlfalzdach
Kies <sup>1</sup>	Stoffwertkatalog IB Rauch	Kies (Schüttstoff)
<i>Folien, Trennlagen</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Filtervlies PP <sup>1</sup>	BAUBOOK	Vlies PP
Bitumenbahn <sup>1</sup>	BAUBOOK	Sopro Thene Bitumenabdichtungsbahn
Trennlage Kunststoff <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Trennschicht Kunststoff
Baupapier <sup>1</sup>	BAUBOOK	Baupapier
Rieselschutzpapier	Ampack	Sisalex 30 Rieselschutz Cellulose
Unterdeckbahn	Würth Handelsges.m.b.H.	WÜTOP Thermo ERS
Dampfbremse PE <sup>1</sup>	Stoffwertkatalog IB Rauch	Dampfbremse PE 0,25mm
<i>Schüttungen</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Splittschüttung l.z.g. <sup>1</sup>	IBO	Splittschüttung leicht zementgebunden
Schüttung lose <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Schüttung lose
<i>1 Baustoffkennwerte entsprechen Richtwerten gem. Datenbank</i>		

*Tabelle 9: Bauprodukte und Hersteller*

Die im Folgenden gezeigten Bauteilaufbauten werden größtenteils den oben genannten Datenbanken entnommen. Für Bauteilschichten wie Putzsysteme, bei denen keine eindeutigen Baustoffe in den Referenzbauteilen angeführt sind, werden zur besseren Vergleichbarkeit mit den in [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) gezeigten Bauteilen konkrete Produkte hinzugefügt. Dadurch können die Bauteilkennwerte der hier gezeigten Aufbauten in geringem Maß von den durch die Datenbanken angegebenen Werten abweichen.

Da die im Zuge dieser Arbeit gezeigten Holz-Lehm-Bauteile jeweils für einen bestimmten Achsabstand und Stützenquerschnitt der Holzkonstruktion berechnet werden, wird auch für die hier vorgestellten Bauteile eine Berechnung des U-Werts durch die Autorin vorgenommen, wodurch sich geringfügige Unterschiede zu den von den Datenbanken beurteilten Werten ergeben können.

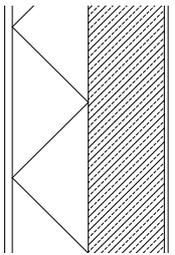
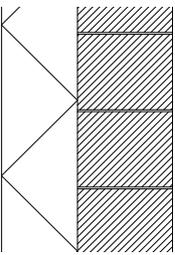
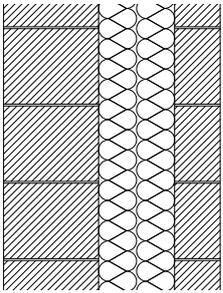
Die nachstehende Tabelle zeigt, welche Holzquerschnitte und Achsabstände für die Berechnung der jeweiligen U-Werte exemplarisch angenommen werden. Die tatsächlich notwendige Dimensionierung der Tragelemente und deren Abstände sind im Falle einer baulichen Umsetzung anhand der statischen Erfordernisse anzupassen. Dies kann folglich zu geringfügigen Änderungen in den ermittelten U-Werten führen.

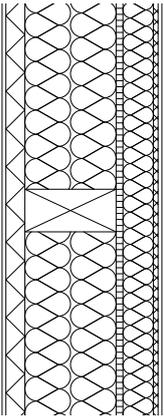
Bauteilkategorie	Querschnitt [m]	Achsabstand [m]
Außenwand, Tragstruktur	0,12 x 0,24	2,00
Außenwand, Lattung	0,05 x 0,08	1,00
Wohnungstrennwand	0,06 x 0,10	1,00
Geschossdecke	0,10 x 0,20	2,00
Steildach, Dachbalken	0,12 x 0,24	2,00
Steildach, Lattung	0,05 x 0,08	1,00

Tabelle 10: gewählte Achsabstände und Querschnitte

### 1.2.1 Außenwandsysteme

Die folgenden Außenwände zeigen exemplarisch die häufigsten Ausführungsvarianten im Wiener Wohnbau auf. Wenngleich der Einsatz von Holzbauteilen derzeit weit weniger häufig ist als jener von Stahlbeton und Ziegel, wächst der Marktanteil dieser Bauweise dennoch seit einigen Jahren. Da in [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) zudem oft Kombinationen aus Lehm und Holz gezeigt werden, sollen die hier vorgestellten Holz-Aufbauten die Vergleichbarkeit der verschiedenen Ausführungsvarianten verbessern.

	<i>K_AW1: Stahlbetonwand</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Zement-Putz	0,020	2000	1,000	30
	EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,430</b>				
	<i>K_AW2: Ziegelmauerwerk, Außendämmung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Zement-Putz	0,020	2000	1,000	30
	EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1
	Vollziegel	0,250	740	0,195	5
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,480</b>				
	<i>K_AW3: Ziegelmauerwerk, Kerndämmung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Zement-Putz	0,020	2000	1,000	30
	Vollziegel	0,250	740	0,195	5
	Mineralwolle	0,200	16	0,040	1
	Vollziegel n.t.	0,120	820	0,307	5
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,600</b>				

	<i>K_AW4: Holzständerwand</i>			
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]
Silikatputz o. Kh.	0,010	1800	0,800	20
HWL-Platte	0,050	370	0,090	5
Mineralwolle zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	16 425	0,040 0,110	1 50
OSB-Platte	0,018	600	0,130	200
Mineralwolle zw. Lattung	0,080 0,080	16 425	0,040 0,110	1 50
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,421</b>			

*Bauteilliste 1: konventionelle Außenwandsysteme*

Die ausgewählten Außenwandsysteme zeigen einige häufig ausgeführte Außenwände auf Grundlage der zuvor genannten Datenbanken, die die gesetzlich festgelegten Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz ausreichend erfüllen.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_AW1	0,189	<	0,350
K_AW2	0,154	<	
K_AW3	0,145	<	
K_AW4	0,120	<	
<i>K_AW4, Berechnung lt. DATAHOLZ</i>	<i>0,130</i>	<	

*Tabelle 11: U-Werte der Außenwandsysteme*

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
K_AW1	62	>	43
K_AW2	51	>	
K_AW3	56	>	
K_AW4	54	>	

*Tabelle 12: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Außenwandsysteme*

### 1.2.2 Innenwandsysteme

Hinsichtlich der Innenwandsysteme muss zwischen Scheidewänden und Trennwänden unterschieden werden. Scheidewände bezeichnen Wände innerhalb einer Wohneinheit, an die keine bauphysikalischen Anforderungen gestellt werden. Unter Trennwänden werden hingegen Wandsysteme verstanden, die Wohneinheiten voneinander oder von allgemeinen Hausbereichen abgrenzen. An diese bestehen anders als an Scheidewände Anforderungen an den Wärme-, Schall- und Brandschutz.

Die Bauteilaufbauten K\_IW1 und K\_IW2 zeigen Beispiele für in Wien übliche Trockenbausysteme, die aufgrund ihrer kurzen Herstellungsdauer immer häufiger eingesetzt werden. Da Wohnungsinnenwände oft nur die Funktion der Raumteilung übernehmen, sind die hier angeführten Aufbauten als nicht tragende Wände dimensioniert. Bei einer Ausführung als Tragelement sind die Bauteildicken entsprechend anzugleichen. Bauteil K\_IW3 zeigt eine konventionelle Ziegelmauer, die wie die Bauteile K\_IW1 und K\_IW2 nicht als tragendes Bauteil dimensioniert ist.

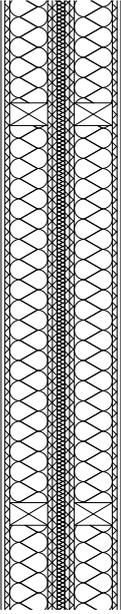
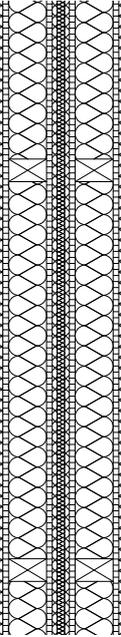
## Innenwandsysteme: Scheidewände

	<i>K_IW1: Metallständerwand</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Mineralwolle zwischen Metallprofil	0,075	16	0,040	1
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,120</b>			
	<i>K_IW2: Holzständerwand</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Mineralwolle zwischen TW Fichte	0,080	16	0,040	1
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,125</b>			
	<i>K_IW3: Ziegelmauerwerk</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	Vollziegel n.t.	0,120	820	0,307	5
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,140</b>				

Bauteilliste 2: konventionelle Scheidewände

## Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände

	<i>K_WTW1: Stahlbetonwand</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Mineralfaserplatte	0,040	50	0,040	1
	Stahlbeton	0,170	2400	2,300	100
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,243</b>				
	<i>K_WTW2: Ziegelmauerwerk</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Mineralfaserplatte	0,060	50	0,040	1
	Vollziegel	0,250	740	0,195	5
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,343</b>				

		<i>K_WTW3: Holzständerwand, GK</i>				
		Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	0,040	1	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Mineralwolle	0,020	16	0,040	1	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	0,040	1	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,315</b>				
			<i>K_WTW4: Holzständerwand, GK/OSB</i>			
			Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	OSB-Platte	0,015	600	0,130	200	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	0,040	1	
	OSB-Platte	0,015	600	0,130	200	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Mineralwolle	0,020	16	0,040	1	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	OSB-Platte	0,015	600	0,130	200	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	0,040	1	
	OSB-Platte	0,015	600	0,130	200	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				

Bauteilliste 3: konventionelle Wohnungstrennwände

Die Bauteile K\_WTW2 bis K\_WTW4 erfüllen sowohl den geforderten Wärmeschutz für Wohnungstrennwände gegen konditionierte angrenzende Räume als auch gegen unbeheizte Gebäudeteile. Die Stahlbetonwand K\_WTW1 überschreitet hingegen den maximal zulässigen U-Wert von 0,6W/(m<sup>2</sup>K) für Bauteile, die an unbeheizte Gebäudebereiche angrenzen. Für den Einsatz in unkonditionierten Gebäudeteilen ist daher eine Erhöhung der Wärmedämmstärke oder Verbesserung des Dämmstoffs notwendig.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_WTW1	0,708	> / <	0,600 <sup>1</sup> 1,300 <sup>2</sup>
K_WTW2	0,321	<	
K_WTW3	0,177	<	
K_WTW3, Berechnung lt. DATAHOLZ	0,190	<	
K_WTW4	0,166	<	
K_WTW4, Berechnung lt. DATAHOLZ	0,190	<	
1: Wand gegen unbeheizte, frostfreie Gebäudeteile und Garagen 2: Wand zwischen Wohneinheiten oder konditionierten Treppenhäusern			

Tabelle 13: U-Werte der Wohnungstrennwände

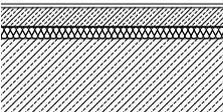
Im Bereich des Schallschutzes zeigt sich, dass alle Wandsysteme ein ausreichendes Schalldämmvermögen aufweisen.

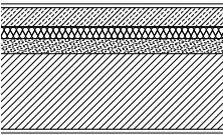
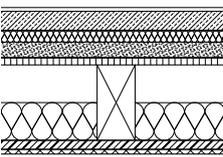
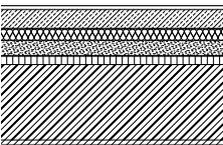
Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
K_WTW1	62	>	58
K_WTW2	59	>	
K_WTW3	58	=	
K_WTW4	59	>	

Tabelle 14: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Wohnungstrennwände

### 1.2.3 Geschossdecken

Die im Folgenden gezeigten Deckenaufbauten stellen mögliche Ausführungsvarianten für Wohnungstrenndecken dar, die ausschließlich unterschiedliche Wohneinheiten voneinander trennen. Bauteilaufbauten für Erdgeschossdecken über unbeheizten Kellern werden in [1.2.5 erdberührte Bauteile](#) behandelt. Da die Planung unbeheizter Dachböden im Wiener Wohnungsneubau mittlerweile kaum noch üblich ist, sondern die Flächen im Dachgeschoss ebenfalls als Wohneinheiten ausgebildet werden, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, spezielle Deckenaufbauten für die oberste Geschossdecke anzuführen.

	K_GD1: Stahlbetondecke				
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,300</b>			

<i>K_GD2: Ziegelhohlkörperdecke</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
	Splittschüttung l.z.g.	0,040	1800	0,700	6	
	Ziegelhohlkörper	0,200	1135	0,670	8	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,340</b>			
<i>K_GD3: Holzbalkendecke</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
	Schüttung lose	0,040	1800	0,700	1	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	OSB-Platte	0,018	600	0,130	200	
	Mineralwolle zwischen TW Fichtenholz	0,200	425	0,110	50	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,395</b>			
	<i>K_GD4: Brettstapeldecke</i>					
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
	Schüttung lose	0,040	1800	0,700	1	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Brettstapelelement	0,200	500	0,130	50	
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,353</b>			

*Bauteilliste 4: konventionelle Geschossdecken*

Die Deckenaufbauten K\_GD1 und K\_GD2 zeigen Bauteilvarianten massiver Deckensysteme, während die Decken K\_GD3 und K\_GD4 in Holzbauweise ausgeführt sind und ein deutlich geringeres Flächengewicht aufweisen. Durch den wesentlich höheren Anteil an Wärmedämmstoffen erzielen die beiden Holzdecken einen U-Wert, der sowohl die Anforderungen für Decken zwischen Wohneinheiten ( $U_{\max} = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) als auch für Decken gegen unbeheizte Gebäudeteile ( $U_{\max} = 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) erfüllt. Die Geschossdecken K\_GD1 und K\_GD2 weisen hingegen höhere U-Werte auf und dürfen nur im Bereich beheizter Gebäudeteile eingesetzt werden.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m²K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_GD1	0,836	<	0,900
K_GD2	0,683	<	
K_GD3	0,243	<	
K_GD3, Berechnung lt. DATAHOLZ	0,260	<	
K_GD4	0,363	<	

Tabelle 15: U-Werte der Deckensysteme

Im Bereich des Schallschutzes wird für Deckensysteme neben dem bewerteten Schalldämm-Maß  $R_w$ , das den Luftschallschutz beurteilt, zusätzlich der bewertete Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  zur Bewertung des Trittschallschutzes angegeben. Die derzeitige Normenlage sieht zur Beurteilung des Trittschalldämmvermögens von Bauteilen eine Angabe des Trittschallpegels des gebauten Objekts vor, welcher mit  $L'_{nT,w}$  beschrieben wird. Im Zuge dieser Diplomarbeit muss jedoch auf den im Labor gemessenen Wert  $L_{n,w}$  zurückgegriffen werden, da eine Messung tatsächlicher Bauteile nicht möglich ist.

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
K_GD1	66	>	58
K_GD2	62	>	
K_GD3	70	>	
K_GD4	59	>	

Tabelle 16: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Deckensysteme

Bauteilbezeichnung	bewerteter Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ [dB]		
	vorhanden		max. zulässig
K_GD1	37	<	53
K_GD2	44	<	
K_GD3	41	<	
K_GD4	51	<	

Tabelle 17: voraussichtlicher Trittschallschutz der Deckensysteme

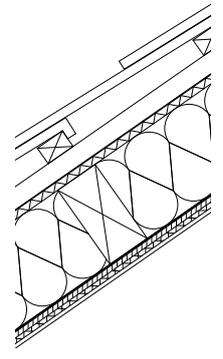
Alle gewählten Bauteilaufbauten erreichen sowohl einen ausreichend Trittschall- als auch Luftschallschutz und sind somit als Wohnungstrenndecken geeignet.

### 1.2.4 Dachaufbauten

Der oberste Gebäudeabschluss wird in Wien teils als Flach-, teils als Steildach ausgeführt, weshalb im Folgenden Beispiele für beide Ausführungsvarianten gezeigt werden.

Da im Wiener Wohnungsneubau mittlerweile kaum noch klassische, unbeheizte Dachböden ausgebildet, sondern auch direkt unter dem Dach Wohneinheiten geplant werden, sind alle Aufbauten ausreichend wärmezudämmen und innseitig zu verputzen oder verkleiden.

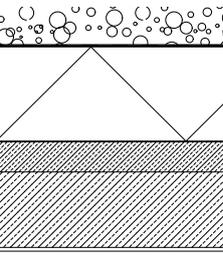
## Dachaufbauten: Steildächer

	<i>K_SD1: Holzsparrendach</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Betondachstein	0,020	2150	1,7	100
	Lattung Fichte	0,050	425	0,110	50
	Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	50
	Unterdeckbahn	0,0001	300	0,050	26
	Holzfaserdämmplatte	0,020	230	0,050	5
	Mineralwolle zwischen Dachbalken Fichte	0,240	16	0,040	1
	Dampfbremse	0,0002	1000	0,170	20.000
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50
	Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	10
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,427</b>			

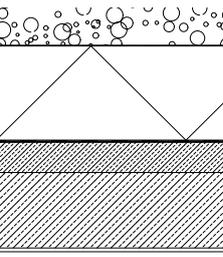
Bauteilliste 5: konventionelle Steildächer

Das gezeigte Steildach besteht aus einem tragenden Holzdachstuhl mit ausfachender Mineralwolledämmung. Es erzielt bei einer flächenbezogenen Masse von  $94,0 \text{ kg/m}^2$  einen U-Wert von  $0,159 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und einen  $R_w$ -Wert von 51dB. Der Steildachaufbau erfüllt somit sowohl den gesetzlich geforderten Wärme- als auch Schallschutz.

## Dachaufbauten: Flachdächer

	<i>K_FD1: Stahlbeton-Warmdach</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kies	0,100	1600	0,470	50
	Vlies PP	0,0001	300	0,220	1
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	1570	0,230	dampfdicht
	Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	20.000
	EPS-Dämmplatte	0,250	17	0,040	1
	Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	20.000
	Gefällebeton	0,080	1600	0,980	100
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>			

	<i>K_FD2: Stahlbeton-Umkehrdach</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kies	0,100	1600	0,470	50
	Vlies PP	0,0001	300	0,220	1
	XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	200
	Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	20.000
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	1570	0,230	dampfdicht
	Gefällebeton	0,080	1600	0,980	100
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>			

Bauteilliste 6: konventionelle Flachdächer

Als Flachdachaufbauten haben sich im Wiener Wohnungsbau insbesondere Konstruktionen aus Stahlbeton etabliert. Die zwei gezeigten Bauteile repräsentieren die beiden wichtigsten Ausführungsvarianten eines Warm- bzw. Umkehrdachs. Beide Flachdachvarianten erreichen einen ausreichenden Schallschutz und liegen unterhalb des maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_SD1	0,159	<	0,200
K_FD1	0,152	<	
K_FD2	0,134	<	

Tabelle 18: U-Werte der Dachsysteme

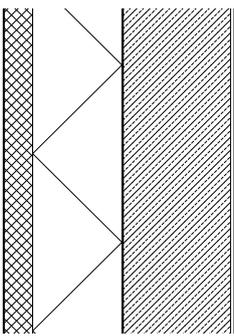
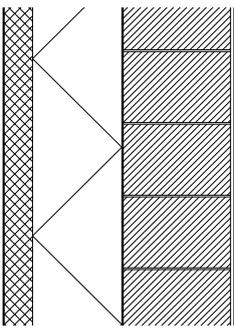
Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
K_SD1	51	>	33
K_FD1	66	>	
K_FD2	66	>	

Tabelle 19: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Dachsysteme

### 1.2.5 Erdberührte Bauteile

Im folgenden Abschnitt werden Fundamente, Kelleraußenwände sowie Erdgeschossdecken über unbeheizten Kellern vorgestellt. In diesen Bereichen stellt sich der Einsatz von Holz aufgrund der Feuchteempfindlichkeit des Materials als schwierig heraus, weshalb diese Bauteile seit einigen Jahren hauptsächlich in Stahlbetonbauweise hergestellt werden. Vereinzelt wird im Bereich der Kelleraußenwände auch Ziegelmauerwerk angewandt.

#### Kelleraußenwände

		K_KAW1: Stahlbetonwand			
		Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]
	Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	1
	bit. Drain. EPS	0,080	20	1,000	1
	XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	200
	Dampfsperre	0,0002	1570	0,230	dampfdicht
	Stahlbeton	0,300	2300	1,500	10
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,640</b>			
		K_KAW2: Ziegelmauerwerk			
		Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]
	Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	1
	bit. Drain. EPS	0,080	20	1,000	1
	XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	200
	Dampfsperre	0,0002	1570	0,230	dampfdicht
	Vollziegel	0,300	760	0,152	5
	Zement-Putz	0,020	2000	1,000	30
	<b>Gesamt</b>	<b>0,650</b>			

Bauteilliste 7: konventionelle Kelleraußenwände

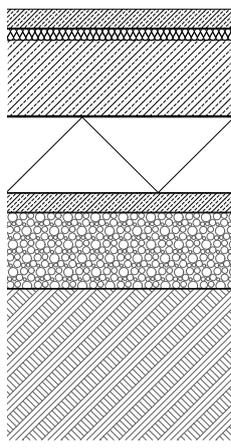
Das Bauteil K\_KAW1 zeigt eine tragende Stahlbetonwand, während der Aufbau K\_KAW2 aus einem tragenden Ziegelmauerwerk besteht. Beide Ausführungen werden mit einer XPS-Perimeterdämmung isoliert und zusätzlich mit einer Drainageplatte ausgestattet.

Beide Bauteilaufbauten erreichen einen U-Wert unterhalb des zulässigen Grenzwertes, wie die nachstehende Tabelle zeigt. Das bewertete Schalldämm-Maß ist für Kelleraußenwände nicht relevant.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m²K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_KAW1	0,133	<	0,400
K_KAW2	0,107	<	

Tabelle 20: U-Werte der Keller-Außenwände

### Fundamentplatten

	K_F1: Stahlbetonfundament				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100	
Dampfsperre	0,0002	1570	0,230	dampfdicht	
XPS-Dämmplatte	0,200	30	0,035	200	
Trennlage PE	0,0001	220	0,170	40	
Beton unbewehrt	0,050	1600	0,980	100	
Baupapier	0,0001	500	0,170	5900	
Rollierung Kies	0,200	1800	0,700	2	
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	1	
<b>Gesamt</b>	<b>0,530</b>				

Bauteilliste 8: konventionelle Fundamente

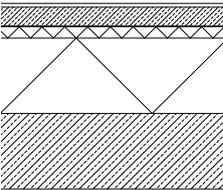
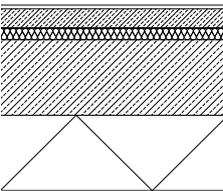
Das Bauteil K\_F1 zeigt ein typisches Stahlbetonfundament mit unterseitiger XPS-Dämmung, das eine Bauteilstärke von 0,530m aufweist.

Wie für Kelleraußenwände werden auch an Fundamentplatten keine Anforderungen an den Schallschutz gestellt. Der maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizient für diese Bauteilkategorie wird mit einem U-Wert von 0,145W/(m²K) problemlos eingehalten.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m²K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_F1	0,145	<	0,400

Tabelle 21: U-Wert des Fundaments

## Geschossdecke über unbeheiztem Keller

		<i>K_EGD1: Stahlbetondecke</i>				
		Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
	EPS-Dämmplatte	0,030	17	0,040	1	
	EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1	
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,490</b>				
		<i>K_EGD2: Stahlbetondecke</i>				
		Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Zementestrich	0,050	2000	1,330	50	
	Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
	Stahlbeton	0,200	2400	2,300	100	
	EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	10	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,500</b>				

Bauteilliste 9: konventionelle Erdgeschossdecken

Im Bereich der Geschossdecken über einem unbeheizten Keller werden zwei Stahlbetondecken gezeigt. Während Bauteil K\_EGD1 oberseitig gedämmt wird, weist Bauteil K\_EGD2 eine unterseitige Dämmung auf. Die Bauteilstärken der beiden Aufbauten unterscheiden sich mit 0,49m und 0,50m kaum und auch die bauphysikalisch relevanten Kennwerte beider Konstruktionen liegen nur wenig auseinander.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
K_EGD1	0,161	<	0,400
K_EGD2	0,158	<	

Tabelle 22: U-Werte der Erdgeschossdecken

Mit 0,161W/(m<sup>2</sup>K) bzw. 0,158W/(m<sup>2</sup>K) unterschreiten beide Erdgeschossdecken den geforderten U-Wert von 0,400W/(m<sup>2</sup>K). Gleichsam werden auch die Anforderungen an den Schallschutz ausreichend erfüllt.

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
K_EGD1	65	>	58
K_EGD2	66	>	

Tabelle 23: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Erdgeschossdecken

Bauteilbezeichnung	bewerteter Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ [dB]		
	vorhanden		max. zulässig
K_EGD1	35	<	48
K_EGD2	37	<	

Tabelle 24: voraussichtlicher Trittschallschutz der Erdgeschossdecken

## 2 Der Baustoff Lehm

Neben den im vorangegangenen Kapitel geschilderten Vorschriften für das Bauen in Wien allgemein ist auch ein ausreichendes Grundverständnis für den Baustoff Lehm notwendig, um technisch und ökologisch nachhaltige Lehmaufbauten zu entwickeln, die das Potential haben, die vorherrschenden Bausysteme abzulösen. Im Folgenden werden daher die Bestandteile des Baustoffes Lehm vorgestellt und seine wesentlichen Eigenschaften aufgezeigt.

### 2.1 Bestandteile von Lehm

Lehm bezeichnet im Wesentlichen ein Gemisch aus Ton, Sand, Schluff und gegebenenfalls Kies, das durch die Verwitterung von Gesteinsschichten entsteht. Der Ton dient in diesem Gemisch als Bindemittel, während Sand und Schluff das mineralische Gerüst der Mischung bilden.

Abhängig von der Art seiner Entstehung wird zwischen Berg- oder Gehängelehm, Geschiebelehm, Schwemtlehm und Lösslehm unterschieden.

Berg- oder Gehängelehm entsteht durch die Verwitterung von Gestein an Bergen oder Berghängen und ist mit Gesteinsbrocken unterschiedlicher Größen durchsetzt. Bei einem ausreichend hohen Tongehalt eignet er sich aufgrund seiner hohen Bindekraft und Druckfestigkeit besonders für den Stampflehmbau.<sup>23</sup> Wenn der Lehm nicht übermäßig tonig ist, ist auch sein Trockenschwindmaß gering.

Geschiebelehm bezeichnet Lehm, der in der Regel sehr kalkhaltig ist und aus der Verwitterung von glazialen Sediment an einer Gletscherbasis oder unter Inlandeis resultiert. Weist der Geschiebelehm einen besonders hohen Kalkanteil auf, wird er als Mergel bezeichnet. Dieser ist aufgrund seiner geringen Bindekraft für den Lehmbau eher ungeeignet.

Unter Schwemtlehm versteht man Geschiebelehm, der durch Wasserströmungen von seiner ursprünglichen Lagerstätte abgeschwemmt worden ist. Neben schwachen Linsen aus Sand, Kies und Geröll kann Schwemtlehm auch Humusbeimengungen enthalten.

Lösslehm entsteht durch die Auswaschung des Kalkgehalts aus windverfrachtetem, kalk- und tonhaltigem Feinsand (Löss). Dieser somit kalkfreie und stark schluffhaltige Lehm hat einen sehr geringen Tongehalt und dementsprechend geringe Bindekraft.

Lehm weist abhängig von seiner Entstehung unterschiedliche Stoffzusammensetzungen und Korngrößenverteilungen auf, was seine Eigenschaften maßgeblich beeinflusst. Nicht alle Lehm-Mischungen sind daher als Baulehm geeignet.

#### 2.1.1 Ton

Ton entsteht durch die Zersetzung von Feldspat und anderen Mineralien der Urgesteine und entspricht chemisch betrachtet einem Aluminiumsilicathydrat. In der Natur sind reine Tonminerale selten – meist treten sie in Kombination mit anderen chemischen Verbindungen wie Eisen oder Mangan auf, wodurch unterschiedliche Farbgebungen entstehen.

14 vgl. MINKE 1994/2001, S.28

Außerdem enthalten Tonminerale chemisch gebundenes Wasser, das den Lehm weich und plastisch verformbar macht. Dieses Kristallwasser entweicht erst bei Temperaturen von 400-900°C, was durch Brennen des Tons erreicht wird und zu einem vollständigen Erhärten des Materials führt.

Zusätzlich zu chemisch gebundenem Wasser kann Ton außerdem flüssiges Wasser aus seiner Umgebung aufnehmen, das sich in den Poren ablagert.

Aufgrund seines strukturellen Aufbaus hat Ton die Fähigkeit, andere Stoffe zu binden und verleiht auch dem Lehmgemisch seine Bindekraft. Diese ist bedingt durch eine große spezifische Oberfläche des Tons, die für ein hohes Kationenaustauschvermögen sorgt. Die Intensität der Bindekraft hängt von der chemischen Zusammensetzung des Tons ab, da diese die Größe der spezifischen Oberfläche bestimmt. Eine genauere Beschreibung unterschiedlicher Tonminerale und deren Einfluss auf die Bindekraft bietet beispielsweise *Minke*.<sup>24</sup>

Ton ist ein nicht hydraulisches Bindemittel. Das bedeutet, dass die Erhärtung des Tons nur an der Luft erfolgt. Anders als bei hydraulischen Bindemitteln kommt es zu keiner chemischen Reaktion mit Wasser und das Material ist nach dem Erhärten bei Kontakt mit flüssigem Wasser nicht raumbeständig. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Lehm abhängig von seinem Wassergehalt plastisch formbar oder steif ist, wobei dieser Zustand jederzeit und beliebig oft durch Wasserzugabe oder Austrocknung veränderbar ist.

Der Anteil an Ton in einem Lehmgemisch ist aufgrund seiner Bindekraft ausschlaggebend für die Verarbeitbarkeit und Anwendungsmöglichkeit des Lehms. Abhängig vom Tongehalt wird Baulehm als sehr mager, mager, fast fett, fett, sehr fett oder Ton bezeichnet. Magerer Lehm stellt dabei ein Lehmgemisch mit einem sehr geringen Tongehalt dar, während fetter Lehm einen hohen Tonanteil aufweist. Welche Tonmenge für eine Lehmmischung notwendig ist, hängt stark vom gewünschten Verwendungszweck des Lehms ab.

### 2.1.2 Schluff, Sand und Kies

Schluff, Sand und Kies bilden die Zuschlagstoffe im Lehmgemisch, die vom Ton an sich gebunden werden. Die Gesteinskörner unterscheiden sich primär durch ihre Korngröße. Bei einem Durchmesser von 0,002 bis 0,006mm spricht man von Schluff (Feinsand), bei 0,006 bis 2mm von Sand und bei 2 bis 60mm von Kies.

Die Kornverteilung dieser Zuschlagstoffe hat wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Lehmgemisches. Vor allem die Druckfestigkeit von Lehm hängt neben dem Tongehalt auch von der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen ab. Ähnlich wie bei Beton ist bei der Zusammensetzung von Lehm darauf zu achten, das Porenvolumen im Lehm durch eine ausgewogene Mischung unterschiedlich großer Körner zu minimieren. Zur Beurteilung der Lehmzusammensetzung wird in diesem Zusammenhang daher auch oft eine Analyse der Korngrößenverteilung durchgeführt, wobei hier zusätzlich Ton, der eine Korngröße von weniger als 0,002mm aufweist, berücksichtigt wird. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs einer solchen Analyse kann beispielsweise bei *Schroeder*<sup>25</sup> gefunden werden.

24 vgl. MINKE 1994/2001, S.29f.

25 vgl. SCHROEDER 2010, S.53ff.

### 2.1.3 Wasser

Für seine Verarbeitung muss Lehm eine ausreichende Menge Wasser enthalten. Wie viel Wasser eine Lehmmischung benötigt, hängt vor allem vom Tongehalt und in geringem Ausmaß auch von der Tonart ab.

Seiner natürlichen Lagerstätte erdfeucht entnommener Lehm enthält bereits verschiedene Arten von Wasser. Wie in [2.1.1 Ton](#) beschrieben, findet sich im Ton chemisch gebundenes Kristallwasser, das erst durch hohe Temperaturen entweicht. Zusätzlich bindet Lehm aber auch Wasser in Form von Absorptions- und Porenwasser. Dabei handelt es sich um flüssiges Wasser, das sich an der inneren Oberfläche des Lehms sowie in seinen luftgefüllten Poren festsetzt. Anders als das im Ton befindliche Kristallwasser verdampft dieses Wasser bereits bei geringeren Temperaturen, da sich zwischen Lehm und umgebender Luft eine Ausgleichsfeuchte einstellt.

Kommt Lehm mit flüssigem Wasser in Berührung, wandert dieses in die luftgefüllten Poren des Materials und umhüllt die kristallinen Plättchen des Tons mit einem dünnen Wasserfilm, wodurch diese aneinander vorbeigleiten können und der Lehm plastisch formbar wird. Trocknet Lehm hingegen aus, entweicht das Wasser und die kristallinen Strukturen des Tons lagern sehr dicht aneinander – der Lehm erhärtet aufgrund der Kohäsionskräfte der Kristallplättchen des Tons.

Der Wassergehalt einer Lehmmischung ist somit ausschlaggebend für seine Formbarkeit und Konsistenz. Abhängig davon, ob die Lehm-poren mit Luft, Wasser oder beidem gefüllt sind, ist der Lehm von fester oder breiiger Konsistenz und eignet sich für unterschiedliche Anwendungen.

### 2.1.4 Zusatzstoffe und Zuschläge

Das Lehmgemisch aus Ton, Schluff, Sand und Kies kann für den Einsatz in Bauwerken entweder direkt verwendet oder mit weiteren Zuschlag- und Zusatzstoffen versetzt werden, um die Materialeigenschaften zu verbessern.

Zuschlagstoffe – zu denen auch der im Lehm stets enthaltene Schluff, Sand und Kies zählen – verändern dabei vorrangig die physikalischen Eigenschaften des Materials, Zusatzstoffe beeinflussen hingegen die chemische Struktur der Tonminerale im Lehm.<sup>26</sup>

<i>Zuschlagstoffe</i>			
mineralisch		organisch	
natürlich	synthetisch	natürlich	synthetisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sand</li> <li>- Kies</li> <li>- Splitt</li> <li>- Gesteinsmehl</li> <li>- Lava</li> <li>- Bims</li> <li>- Perlite</li> <li>- Blähton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glasfasern</li> <li>- Hüttenbims</li> <li>- Blähglas</li> <li>- Eisenspäne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stroh</li> <li>- Hanf</li> <li>- Jute</li> <li>- Flachsfasern</li> <li>- Haare</li> <li>- Strohhäcksel</li> <li>- Holzspäne</li> <li>- Zellulose</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunstfasern</li> <li>- Styroporkugeln</li> </ul>

*Tabelle 25: häufige Zuschlagstoffe<sup>27</sup>*

<sup>26</sup> vgl. SCHROEDER 2010, S.94

<sup>27</sup> vgl. ebenda, S.94

<i>Zusatzstoffe</i>			
mineralisch		organisch	
natürlich	synthetisch	natürlich	synthetisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ton</li> <li>- Kalk</li> <li>- Gips</li> <li>- Salz</li> <li>- Trass</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zement</li> <li>- Wasserglas</li> <li>- Soda</li> <li>- Eisenoxid</li> <li>- gebrannter Ton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Harze</li> <li>- Wachse</li> <li>- Lignin</li> <li>- Algen, Seetang</li> <li>- Gluten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunstharze</li> <li>- Seife</li> <li>- Kautschuk</li> <li>- Erdölprodukte</li> <li>- Kunststoffe</li> </ul>

*Tabelle 26: häufige Zusatzstoffe<sup>28</sup>*

Wenngleich viele Zuschläge und Zusätze das Verhalten einer Lehmmischung positiv beeinflussen können, muss der Einsatz dieser Stoffe dennoch gut überlegt werden, da sie oft auch andere Eigenschaften als die gewünschten beeinflussen und abhängig von ihrem Herstellungsprozess eine negative Auswirkung auf die Ökologie der Lehmmischung haben können. Vor allem thermisch aufbereitete Stoffe benötigen bei ihrer Herstellung oft einen hohen Energieaufwand, was sich negativ auf den Primärenergieinhalt des Lehmgemisches auswirkt. Zudem lässt sich der Lehm nach Abbruch des Gebäudes gegebenenfalls nicht mehr einwandfrei recyceln, falls die Zusätze nicht vom Lehm getrennt werden können. Das Material kann in weiterer Folge nicht nur nicht erneut als Baumaterial genutzt werden, auch die Entsorgung eines solchen Lehmgemisches wird wesentlich erschwert.

Wird Lehm mit mineralischen Bindemitteln wie Kalk oder Zement vermengt, die durch die chemische Reaktion mit Wasser erhärten, verliert Lehm zudem seine positiven Eigenschaften der Replastifizierbarkeit und Sorptionsfähigkeit. Die Kombination von Lehm mit Zement erhöht zwar dessen Festigkeit, verhindert jedoch, dass der Baustoff zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwendet werden kann, da die beiden Ausgangsstoffe nicht wieder getrennt werden können. Diese Verarbeitung von Lehm zu „niederm Beton“<sup>29</sup> steht im Widerspruch zu der nachhaltigen Bauweise, die dem Baustoff Lehm inhärent ist.

Ein weiterer Nachteil einiger Zuschlags- und Zusatzstoffe liegt darin, dass sie die positive Wirkung des Lehms auf das Raumklima stören, indem sie seine Wasseraufnahmefähigkeit ungünstig beeinträchtigen oder Schadstoffe an den Raum abgeben.

Auch bei der Anwendung von organischen Stoffen muss beachtet werden, dass diese Lehm negativ beeinflussen und beispielsweise Schimmelbildung fördern können.

Zuschlag- und Zusatzstoffe sollten daher nur dann eingesetzt werden, wenn sie eine Funktion erfüllen, die der reine Lehm nicht übernehmen kann.

## 2.2 Statische und bauphysikalische Eigenschaften von Baulehm

Lehm ist ein natürlicher Rohstoff, der anders als industriell hergestellte Baustoffe abhängig von seiner Herkunft und Entstehung aufgrund feiner Unterschiede im Korngefüge größere Schwankungen in seinen Materialeigenschaften aufweisen kann. Neben diesen natürlich bedingten Abweichungen führen aber auch unterschiedliche Lehmzusammensetzungen zu einer Änderung seines Materialverhaltens.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Eigenschaften des Baustoffes Lehm aufgezeigt und darauf wirkende Einflussfaktoren erläutert werden.

<sup>28</sup> vgl. SCHROEDER 2010, S.94

<sup>29</sup> BLASCHEK 2015, S.50

## 2.2.1 Festigkeit

Die Festigkeit von Lehm ist bedeutend für seinen Einsatz als tragendes Bauteil und hängt vor allem vom Tongehalt, der Korngrößenverteilung, der Aufbereitung der Lehmmischung, der Menge des Anmachwassers, den Trocknungsbedingungen sowie den gegebenenfalls zugeführten Zuschlags- und Zusatzstoffen ab.<sup>30</sup>

Insbesondere der strukturelle Aufbau des Tons spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle, da die Anziehungskräfte der Tonminerale erst durch Wasser und Bewegung aktiviert werden. Durch das Kneten des feuchten Tons lagert sich seine Blättchenstruktur dichter aneinander und wird parallel ausgerichtet. Dadurch erreicht der Lehm eine höhere Bindekraft im plastischen Zustand. Die Bindekraft beschreibt in diesem Kontext ein Maß für die Zugfestigkeit von plastisch formbarem Ton. Neben der Menge an Ton in einer Lehmmischung hängt sie auch von der Art der Tonminerale ab. So weisen Tone mit einem hohen Anteil an Natrium oder Kalium eine hohe, Tone mit viel Kalzium eine geringere Bindekraft auf.<sup>31</sup>

Je höher die Bindekraft einer plastisch formbaren Lehmmischung ist, umso höher ist auch ihre Druck- und Zugfestigkeit im trockenen Zustand. Die Druckfestigkeit von Lehm liegt in der Regel zwischen 3 und 6 N/mm<sup>2</sup>, bei idealer Zusammensetzung können bis zu 10 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.<sup>32</sup>

Neben der Druckfestigkeit ist für Lehmbauteile – insbesondere für Mauersteine, Platten und Putze – auch ihre Kantenfestigkeit von Bedeutung. Diese hängt vor allem von der Biegezugfestigkeit des Lehmgemisches ab, die ihrerseits wiederum vorrangig vom Tongehalt und der Art des Tons abhängig ist. Je höher die Biegezugfestigkeit des Lehms, desto besser ist auch seine Kantenfestigkeit und desto geringer daher die Wahrscheinlichkeit, dass die Kanten des Lehmprodukts bei mechanischer Beanspruchung abbrechen.

Für die Anwendung von Lehm in Bauwerken ist außerdem seine Abriebfestigkeit von Bedeutung. Ein Abrieb auf Lehmoberflächen entsteht durch mechanische Beanspruchung, beispielsweise durch das Gehen mit rauen Schuhen auf Fußböden oder das Anstreifen an einer Wandoberfläche. Entscheidend für die Abriebfestigkeit eines Lehmbauteils ist einerseits die Bindekraft und Biegezugfestigkeit der Lehmmischung, andererseits die Oberfläche des Lehmbauteils selbst. Je glatter und geschlossener die Oberfläche des Lehms ist, umso höher ist auch dessen Abriebfestigkeit.

## 2.2.2 Rohdichte

Die Rohdichte von Lehm bezeichnet seine Trockenmasse bezogen auf sein Volumen inklusive Hohlräume. Sie hängt vor allem von der Verdichtung des Lehmbaustoffes und der Lehmzusammensetzung ab. So verringern beispielsweise Leichtzuschläge wie Stroh, Blähton oder expandierter Kork die Rohdichte eines Lehmgemisches. Eine Verdichtung des Lehms, zum Beispiel zur Herstellung von Lehmsteinen oder Stampflehm, erhöht hingegen die Rohdichte. Während krümeliger, erdfeuchter Lehm eine Rohdichte von 1000 bis 1500kg/m<sup>3</sup> aufweist, steigt diese bei verdichtetem Lehm auf 1700 bis 2200kg/m<sup>3</sup>.<sup>33</sup>

30 vgl. SCHROEDER 2010, S.149

31 vgl. MINKE 1994/2001, S.58

32 vgl. ebenda, S.60

33 vgl. ebenda, S.32

Lehmstoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Stampflehm	1700-2400
Leichtlehm	300-1200
Lehmschüttung	300-2200
Lehmsteine	600-2200
Lehmplatten	300-1800
Lehmmörtel	600-1800

Tabelle 27: übliche Rohdichten von Lehmstoffen<sup>34</sup>

### 2.2.3 Verhalten von Lehm bei Wassereinwirkung

Lehm ist ein offenporiger Baustoff, der Wasser bei direktem Kontakt aufnimmt und weiterleitet. Wie bereits in 2.1.3 Wasser beschrieben, führt dies zu einer plastischen Verformbarkeit des Lehms, was zwar hinsichtlich seiner Wiederverwendbarkeit positiv zu beurteilen ist, jedoch gewisse Probleme bei seiner Anwendung in Bauwerken mit sich bringen kann. Um die Standsicherheit von Lehmteilen nicht zu gefährden, müssen diese daher stets vor direkter Wassereinwirkung geschützt werden. Neben einer Festigkeitsminderung des Bauteils kann ein längerer Kontakt mit Wasser zudem zu Schimmelbildung oder Verrottung organischer Bestandteile im Lehm führen.

Die Menge Wasser, die Lehm pro Quadratmeter Fläche in einer bestimmten Zeit aufnehmen kann, wird als Wasseraufnahmekoeffizient bezeichnet und hängt von der Lehmzusammensetzung, der Porosität, der Rohdichte, der Temperatur und der Ausgangsfeuchte des Lehms ab.<sup>35</sup>

Das Wasseraufnahmevermögen verschiedener Lehmmischungen ist dabei zum Teil sehr unterschiedlich. Magere Lehme können im Vergleich zu fetten Lehmen nur wenig Wasser aufnehmen, dafür ist die hierzu benötigte Zeitspanne deutlich kürzer. Dies liegt vor allem an der geringeren Menge an Tonmineralien, die maßgebend für das Wasseraufnahmevermögen des Lehms sind. Fette Lehme, die einen sehr hohen Tonanteil aufweisen, können daher wesentlich mehr Wasser speichern. Gleichzeitig bedingt die größere Menge an Tonmineralien eine Zeitverzögerung bei der Wasseraufnahme, da das Eindringen von Wasser durch Verformungen im Ton behindert wird. Fetter Lehm benötigt also eine längere Zeit, um Wasser aufzunehmen.<sup>36</sup>

Jede Aufnahme und Abgabe von flüssigem Wasser führt im Lehm zu Volumenänderungen. Das vom Lehm aufgenommene Wasser lagert sich in seinen Poren ab, was das Volumen des Lehms vergrößert und als Quellen bezeichnet wird. Trocknet Lehm hingegen aus, erhärtet das Material und sein Volumen nimmt ab – der Lehm schwindet. Diese Volumenänderungen im Lehm sind belastungsunabhängig und laufen nur bei einer Änderung des Wassergehalts ab. Zudem handelt es sich hierbei um reversible Verformungen.

Das Quell- und Schwindmaß, das die Größe der Volumenänderung beschreibt, hängt von der Art und Menge des Tons im Lehm und der Menge an Porenwasser ab. Auch eine Optimierung der Zusammensetzung von Schluff, Sand und Kies kann das Quell- und Schwindverhalten beeinflussen.

Das Quellen und Schwinden von Lehm muss bei seinem Einsatz in Bauwerken besonders beachtet werden, da die Volumenänderungen zu Bauschäden führen

34 vgl. SCHROEDER 2010, S.134

35 vgl. ebenda, S.166

36 vgl. ebenda, S.167f.

können, wenn sie nicht ungehindert ablaufen können. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch darauf hingewiesen werden, dass das Quellen und Schwinden von Baustoffen nur bei Kontakt mit flüssigem Wasser auftritt – Wasserdampf führt zu keinen Volumenänderungen.

### **2.2.4 Regen- und Frosterosion**

Da Lehm ohne Anwendung von Zusatzstoffen keinen chemischen Erhärtungsprozess durchläuft, sondern nur durch die Austrocknung von Wasser aushärtet, sind unbehandelte Lehmbaustoffe witterungsempfindlich. Ist ein Lehmbauteil über längere Zeit Schlagregen ausgesetzt, wird seine Oberfläche abgespült. Zudem quillt der Lehm durch die Wasseraufnahme und schwindet durch Austrocknung wieder, was zu Rissen im Bauteil führt. Bei geringen Temperaturen gefriert zusätzlich das im Lehm enthaltene Wasser, wobei sich sein Volumen vergrößert und Sprengungen im Lehm verursacht.

Für eine schadenfreie Anwendung von Lehmbauteilen im Außenbereich müssen daher entsprechende bauliche Schutzmaßnahmen getroffen oder der Lehm mit entsprechenden Zuschlägen und Zusätzen modifiziert werden. Auch eine Änderung des Tongehalts in einer Lehmmischung führt zu einer Verbesserung der Witterungsbeständigkeit. Fetter Lehm weist eine höhere Bindekraft auf als magerer Lehm, weshalb die Gesteinskörner weniger leicht ausgewaschen werden können. Der Widerstand gegen Regenerosion fetter Lehme ist somit höher als bei mageren Lehmen. Gleichzeitig bedingt ein erhöhter Tonanteil jedoch in der Regel auch ein größeres Schwindmaß. Dringt Wasser in diese Schwindrisse ein und gefriert, sprengt es kleine Teile des Lehms ab. Je mehr Risse eine Lehmoberfläche aufweist, umso geringer ist daher ihre Frostsicherheit. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Frostbeständigkeit von Lehm ist seine Porosität. Je höher der Porenanteil, desto resistenter ist ein Lehmbaustoff gegenüber Frost, da seine Poren ausreichend groß sind, um eine Volumenzunahme des gefrierenden Wassers aufzunehmen.<sup>37</sup>

### **2.2.5 Verhalten von Lehm bei Wasserdampfeinwirkung**

Wasserdampfdiffusion beschreibt die Bewegung von Wasserdampf in der Luft aufgrund eines Dampfdruckgefälles, wobei die Diffusionsbewegung von Bereichen des höheren zu Bereichen des niedrigeren Dampfdrucks verläuft. Bei einer Druckdifferenz zwischen Raum- und Außenluft versucht der Wasserdampf in der Luft solange in Richtung des Druckgefälles zu strömen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird und diffundiert dabei durch das raumtrennende Bauteil.

Jeder Baustoff setzt diesem Vorgang einen gewissen Widerstand entgegen, was mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ausgedrückt wird. Diese ist abhängig von der Rohdichte und Porenstruktur des Baustoffes – je höher die Rohdichte, umso geringer ist der Porenraum und umso größer ist der Widerstand, den das Bauteil der Wasserdampfdiffusion entgegensetzt. Diffusionsoffene Baustoffe haben eine geringe Widerstandszahl, während Stoffe mit sehr hohen Werten als dampfdicht angesehen werden.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von Lehm liegt bei 5-10, jene von Leichtlehm bei 2-5. Lehm setzt Wasserdampf somit aufgrund seiner sehr feinporigen und feuchteleitfähigen Struktur nur einen geringen Widerstand entgegen. Wasserdampf kann daher sehr rasch aus der Umgebungsluft aufgenommen und an diese

37 vgl. MINKE 1994/2001, S.49

zurückgegeben werden, wenn dieser Prozess nicht durch andere Bauteilschichten behindert wird. Dadurch ermöglichen Lehmbaustoffe eine natürliche Regulierung der Luftfeuchtigkeit im Raum (vgl. [2.2.10 Der Einfluss von Lehm auf das Raumklima](#)). Während Lehm also auf die Einwirkung von flüssigem Wasser sehr empfindlich reagiert und für das Bauen nachteilige Eigenschaften zeigt, ist sein Verhalten bei Wasserdampfeinwirkung als sehr positiv zu bewerten.

### 2.2.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes gibt an, wie viel Wärme durch  $1\text{m}^2$  eines  $1\text{m}$  dicken Bauteils bei einer Temperaturdifferenz von  $1\text{K}$  fließt. Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit ist dabei gleichbedeutend mit einer schlechten Wärmeleitung und daher mit einem guten Wärmedämmvermögen. Baustoffe, deren Wärmeleitfähigkeit unter  $0,05\text{W}/(\text{mK})$  liegt, werden in der Regel als Wärmedämmstoffe angesehen.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Lehmbaustoffes hängt im Wesentlichen von seiner Rohdichte und seinem Feuchtegehalt ab. Mit zunehmendem Porenanteil und damit abnehmender Rohdichte sinkt die Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Luft in den Poren, während ein zunehmender Feuchtegehalt des Lehmbaustoffes zu einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit führt, da Wasser ein guter Wärmeleiter ist.

Die Wärmeleitfähigkeit von Lehm liegt abhängig von seiner Zusammensetzung und Rohdichte zwischen  $0,1$  und  $1,4\text{W}/(\text{mK})$ .<sup>38</sup> Eine geringe Wärmeleitfähigkeit kann insbesondere durch entsprechende Leichtzuschläge wie Stroh und Hanf erreicht werden.

### 2.2.7 Wärmespeichervermögen

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils ist ausschlaggebend dafür, ob sich kurzzeitige Schwankungen der Außentemperatur auf die Raumtemperatur auswirken. Ein Bauteil mit großer Wärmespeicherwirkung verzögert den Wärmedurchgang und wirkt wärmedämpfend. Eine hohe Wärmespeicherfähigkeit bedeutet jedoch anders als eine geringe Wärmeleitfähigkeit nicht, dass der Wärmeverlust durch das Bauteil dauerhaft gemindert wird.

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Baustoffes wird durch die Wärmespeicherzahl ausgedrückt, die von der spezifischen Wärmekapazität und Rohdichte des Materials sowie der Bauteildicke abhängig ist (vgl. [3.2.2 Lehm als Speicher- und Dämmmaterial](#)). Die spezifische Wärmekapazität beschreibt dabei die Energie, die benötigt wird, um  $1\text{kg}$  eines Baustoffes um  $1\text{K}$  zu erwärmen. Lehmbaustoffe weisen hier abhängig von ihrer Zusammensetzung Werte von  $1\text{kJ}/(\text{kgK})$  bis  $1,5\text{kJ}/(\text{kgK})$ <sup>39</sup> auf.

Das Wärmespeichervermögen von Lehm kann allgemein als gut angesehen werden, wobei massive Lehmbauteile wie Stampflehmwände aufgrund der höheren Rohdichte bessere Werte erzielen als poröse Leichtlehmbaustoffe.

### 2.2.8 Brandverhalten

Lehm wird in der deutschen Norm DIN 4102-4<sup>40</sup> der Baustoffklasse A1 zugeordnet und gilt als nicht brennbar. Obwohl bislang keine umfassende Klassifizierung

38 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.93

39 vgl. ebenda, S.94

40 Aufgrund des Fehlens einer entsprechenden österreichischen Norm muss an dieser Stelle auf die deutsche Norm verwiesen werden.

einzelner Lehmbaustoffe hinsichtlich ihres Brandverhaltens vorliegt, kann aufgrund von Versuchsreihen belegt werden, dass Lehmbaustoffe mit einer Rohdichte über  $1200\text{kg/m}^3$  als nicht brennbar und mit über  $600\text{kg/m}^3$  als schwer entflammbar anzusehen sind.<sup>41</sup> Lehm gilt auch dann noch als nicht brennbar, wenn ihm organische Zuschläge wie beispielsweise Strohhäcksel oder Sägespäne beigemischt sind, solange gewisse Mindestrohddichten eingehalten werden.

Zuschlag	Erforderliche Rohdichte für A1 (nicht brennbar)	Erforderliche Rohdichte für B1 (schwer entflammbar)
Strohhäcksel	> $1200\text{ kg/m}^3$	> $600\text{ kg/m}^3$
Sägemehl	> $2000\text{ kg/m}^3$	
Sägespäne	> $1600\text{ kg/m}^3$	
Holzhackschnitzel	> $1400\text{ kg/m}^3$	> $800\text{ kg/m}^3$
Hanf		> $600\text{ kg/m}^3$

Tabelle 28: Brandverhalten von Lehm mit organischen Zuschlägen<sup>42</sup>

Im Brandfall wirkt Lehm feuerhemmend und verhält sich ähnlich wie Gips. Durch die Verdunstung des an den Oberflächen der Tonminerale angelagerten Kristallwassers wird der Baustoff vor einer Entzündung geschützt. Werden andere Bauteile oder Bauteilschichten ausreichend von Lehm ummantelt, können diese ebenfalls vor einem Brandausbruch bewahrt werden.

### 2.2.9 Schalldämmvermögen

Das Schalldämmvermögen von Lehm hängt vor allem von seinem Elastizitätsmodul, der Rohdichte und der Porosität ab.

Allgemein weisen Lehmbaustoffe ein gutes Schalldämmvermögen auf und erzielen abhängig von ihrer Zusammensetzung oft bessere Schallschutzwerte als Porenbeton- oder Leichtbetonbaustoffe.<sup>43</sup> Dies liegt unter anderem daran, dass Lehm im Vergleich zu anderen Baustoffen einen kleinen E-Modul und somit eine geringe Steifigkeit aufweist, wodurch eine hohe Flexibilität gegenüber Schallwellen gegeben ist und ein schneller Frequenzabbau ermöglicht wird. Auch die hohe Kapillarität und Porosität des Lehms beeinflussen das Verhalten gegenüber Schall positiv.

Das Schalldämmmaß eines Lehmbauteils hängt neben dem Material selbst insbesondere von seiner Bauteildicke, Beschaffenheit und dem Aufbau ab. Zur Verbesserung des Schalldämmvermögens eines Lehmbauteils kann beispielsweise die Bauteildicke und somit Masse erhöht oder die Oberfläche des Bauteils entsprechend behandelt werden. Das Aufrauen und Strukturieren der Lehmoberfläche sowie das Einbinden von Pflanzenhalmen und -fasern in den Lehm führt zu einer erhöhten Brechung und Absorption der Schallwellen und dämpft so den Luftschall in einem Raum. Es ist durch diese Maßnahmen sogar möglich, Decken oder Wände aus Lehm als Schallabsorber auszubilden.<sup>44</sup>

41 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.97

42 vgl. SCHROEDER 2010, S.278

43 vgl. DEHN / KÖNIG / MARZAHN 2003, S.280

44 vgl. SCHOENBURG 2008/2017, S.87ff.

## 2.2.10 Der Einfluss von Lehm auf das Raumklima

Ein für den Menschen angenehmes und gesundes Raumklima muss frei von gesundheitsgefährdenden Bakterien sowie Schadstoffen sein und eine entsprechend geregelte Temperatur aufweisen. Zudem soll die relative Luftfeuchtigkeit möglichst konstant zwischen 40 und 60% gehalten werden. Eine zu geringe Feuchtigkeit im Raum führt beim Menschen zu einer Austrocknung der Schleimhäute und somit zu erhöhter Anfälligkeit für Erkältungskrankheiten. Eine zu hohe Luftfeuchtigkeit erschwert hingegen die Sauerstoffaufnahme im Blut und begünstigt Schimmelbildung in geschlossenen Räumen. Eine ausreichend hohe Luftfeuchtigkeit verringert den Feinstaubgehalt in der Luft, verbessert die Abwehrfähigkeit der menschlichen Haut gegenüber Mikroben, erschwert das Überleben von Bakterien und Viren und reduziert Geruchsbelästigungen.

Die Höhe der Luftfeuchtigkeit in einem Raum hängt neben der Nutzung und dem Luftwechsel insbesondere vom Diffusionsvermögen der verwendeten Baustoffe ab. In Räumen, die vorrangig mit wasserdampfundurchlässigen Oberflächen versehen sind, kann die eingebrachte Luftfeuchtigkeit nicht entweichen und kondensiert auf der kühleren Fläche im Raum, was bei unzureichender Lüftung zu Bauschäden und Schimmelbildung führen kann.

Wie bereits in [2.2.5 Verhalten von Lehm bei Wasserdampfeinwirkung](#) beschrieben, ist Lehm ein diffusionsoffener Baustoff, der Wasserdampf rasch aufnehmen kann und so den Feuchtigkeitsgehalt in der Luft mindert. Trocknet die Raumluft aus, wird das im Lehm gespeicherte Wasser ebenso schnell wieder an den Raum abgegeben. Lehmstoffe sorgen so für eine natürliche Feuchteregulierung des Wohnklimas.

Minke beschreibt in diesem Zusammenhang Untersuchungen des Forschungslabors für experimentelles Bauen der Universität Kassel, die zeigen, dass ungebrannte Lehmsteine innerhalb von zwei Tagen ca. 30mal soviel Feuchtigkeit aufnehmen wie gebrannte Ziegel, wenn die relative Luftfeuchtigkeit von 50% auf 80% erhöht wird. Auch bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% werden die Lehmsteine nach 6 Monaten Lagerung dabei nicht weich, da die Feuchtigkeit in den Steinen 5 bis 7% nicht übersteigt. Ein weiteres Experiment hat ergeben, dass die relative Luftfeuchtigkeit in Räumen mit Wänden aus Lehmsteinen, Lehmsträngen und Leichtlehm das ganze Jahr über nahezu konstant bleibt. Im Mittel betrug die relative Luftfeuchtigkeit im Versuch 50% und schwankte um nicht mehr als 5%.<sup>45</sup>

Um diese positive Eigenschaft des Lehms nutzen zu können, ist jedoch darauf zu achten, dass die Lehmbauteile nur mit ausreichend diffusionsoffenen Materialien verkleidet, verputzt und angestrichen werden.

## 3 Lehm im großen Stil

Da die Eigenschaften von Lehm abhängig von seiner Zusammensetzung stark variieren, eignet sich der Baustoff je nach Mischung für eine Vielzahl von Einsatzbereichen. Im folgenden Kapitel werden daher die wichtigsten Lehmbaustoffe vorgestellt und ihre Anwendungsmöglichkeiten sowie Herstellung erläutert. Zudem wird untersucht, in welchen Bauteilschichten Lehm besonders sinnvoll eingesetzt werden kann und wo das Material zur Schwachstelle wird. Lehmbaustoffe weisen wie alle anderen Baumaterialien Vor- und Nachteile in ihren Eigenschaften auf, weshalb es für größere Bauvorhaben in Österreich unrealistisch scheint, Bauteilaufbauten rein aus Lehm zu planen. Vielmehr kann eine Kombination von Bauteilschichten aus Lehm und anderen, möglichst nachhaltigen Materialien als sinnvoll erachtet werden. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt untersucht, welche Baumaterialien sich besonders für eine Kombination mit Lehm eignen und welche Eigenschaften diese hierfür aufweisen müssen.

Basierend auf dieser Analyse werden anschließend einige Bauteilaufbauten mit unterschiedlich hohem Lehmanteil sowie aus verschiedenen Lehmbaustoffen vorgestellt. Da die Anzahl an technisch möglichen Systemen wie bei allen Baustoffen sehr groß ist, kann dabei kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt werden. Die gezeigten Aufbauten stellen vielmehr einen Querschnitt an technisch möglichen und ökologisch wie bauphysikalisch sinnvollen Ausführungsvarianten dar.

Die vorgestellten Bauteile werden an dieser Stelle insbesondere auf ihre Eignung für den Einsatz im Wiener Wohnbau untersucht, indem ihre bauphysikalischen Eigenschaften mit den rechtlich zulässigen Grenzwerten verglichen werden.

Am Ende dieses Kapitels wird festgestellt, welche Ausführungsvarianten grundsätzlich für den Wiener Wohnbau zulässig sind und sich besonders eignen, in Konkurrenz mit den derzeit vorherrschenden Bausystemen zu treten, mit denen sie im Folgekapitel verglichen werden.

### 3.1 Überblick über die wichtigsten Lehmbaustoffe

Während traditionelle Lehmbauweisen hauptsächlich den Stampflehm-, Wellerlehm- und Lehmsteinbau umfassten, ist die Anzahl verfügbarer Lehmbaustoffe am Markt heute deutlich größer. Dabei werden immer mehr Bauteile vorgefertigt oder als fertige Produktmischungen angeboten. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über einige, wichtige Lehmbaustoffe, deren Anwendungsgebiete und Verarbeitungstechniken. Dabei muss zunächst zwischen Produkten aus Leichtlehm und solchen aus Massiv- bzw. Schwerlehm unterschieden werden.

*Leichtlehm* bezeichnet ein Lehmgemisch aus Baulehm und Leichtzuschlägen, die die Rohdichte dieser Mischung auf 300–1200 kg/m<sup>3</sup> herabsenken. Als Zuschläge eignen sich hierfür sowohl mineralische als auch organische Stoffe. Die am häufigsten angewandten organischen Zuschlagstoffe sind alle Arten von Stroh sowie Holzhackschnitzel, doch auch alle anderen ausreichend gegen Feuchtigkeit beständige pflanzliche Faserstoffe sind zur Herstellung von Leichtlehm geeignet. Als mineralische Zuschläge werden vor allem porige, natürliche oder künstliche Gesteine wie beispielsweise Bims, Blähton, Perlite oder Blähschiefer verwendet.<sup>46</sup>

Baustoffe aus Leichtlehm werden für nicht tragende Bauteile – insbesondere für

46 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.30

Außen-, Innenwände, Vorsatzschalen und Deckenausfachungen – verwendet. Auch Lehmsteine und -platten sowie Lehmputze können aus Leichtlehm hergestellt werden.

*Massiv- und Schwerlehme* weisen eine deutlich höhere Rohdichte auf als Leichtlehm. Lehmstoffe mit einer Rohdichte von 1700-2000kg/m<sup>3</sup> werden dabei als Massivlehm, Produkte mit über 2000kg/m<sup>3</sup> als Schwerlehm bezeichnet. Sie werden vor allem zur Herstellung von Stampflehmelementen und Lehmsteinen verwendet. Anders als Leichtlehmstoffe können die schweren Mischungen auch tragend eingesetzt werden.

Während Baustoffe aus Leichtlehm aufgrund ihrer geringen Rohdichte vor allem im Bereich des Wärmeschutzes und als nicht tragende Ausfachungen Anwendung finden, werden schwerere Mischungen insbesondere im Bereich des Schallschutzes und der Wärmespeicherung sowie zur Herstellung lastabtragender Bauteile angewandt.

### 3.1.1 Stampflehm

Stampflehm bezeichnet eine Lehmbautechnik, bei der erdfeuchter Baulehm – meist in eine Schalung eingebracht – durch Stampfen verdichtet wird. Die Stampflehm Bauweise blickt auf eine lange Tradition zurück und wurde im Lauf der Geschichte in weiten Teilen der Erde angewandt. Insbesondere in Klimazonen, die keine zusätzlichen Wärmeschutzmaßnahmen benötigen, kommt der Stampflehm Bau auch heute wieder vermehrt zum Einsatz. Im deutschsprachigen Raum gibt es seit einigen Jahren ebenfalls vermehrt Bestrebungen, den Stampflehm Bau wieder anzuwenden, was nicht zuletzt daran liegt, dass Stampflehm Bauteile mittlerweile wie andere gängige Baustoffe vorgefertigt werden können.

Für den Stampflehm Bau eignen sich magere bis fette Baulehme. Da Stampflehm seine Tragfähigkeit und Festigkeit vor allem durch das Verdichten des Lehmgemisches erhält, muss jedoch bei der Zusammenstellung der Lehmmischung auf eine weit gestufte Körnungslinie geachtet werden. Diese stellt sicher, dass sich der Lehm später optimal verdichten lässt, da eine ausreichende Menge unterschiedlich großer Gesteinskörnungen vorhanden ist. Von Natur aus für den Stampflehm Bau geeignete Lehme sind beispielsweise Berg- oder Gehängelehm sowie Geschiebelehm.<sup>47</sup>

Als Zuschläge werden dem für den Stampflehm Bau vorgesehenen Baulehm vor allem mineralische Stoffe wie Grobsand, Kies und Splitt zugefügt. Organische Zuschläge wie Stroh werden nur in geringen Anteilen beigemischt. In einigen Ländern wird der Stampflehm heute oft mit Kalk oder Zement versetzt,<sup>48</sup> um die Festigkeit und Wetterbeständigkeit zu erhöhen.

Die Anwendungsgebiete von Stampflehm umfassen vor allem die Errichtung von massiven – tragenden oder nicht tragenden – Wänden und Fußböden.

*Fußböden aus Stampflehm* müssen auf sauberem und unnachgiebigem Grund – beispielsweise auf einer Betonbodenplatte – hergestellt werden.

Da Stampflehm keine kapillarbrechende Wirkung hat, wird unterhalb des Stampflehm Fußbodens zudem eine feuchtigkeitssperrende Bauteilschicht angeordnet. Die hierzu häufig verwendeten PE- oder Bitumenlagen müssen dabei vor Beschädigung durch das Stampfen geschützt werden, was beispielsweise mit Kalk- oder Zementestrich erreicht werden kann.

47 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.21

48 vgl. SCHROEDER 2010, S.116

Stampflehmfußböden bestehen in der Regel aus einer groben, 6cm starken Grundlage und einer feinen, 4cm starken Decklage, die nacheinander eingebracht und verdichtet werden. Mit der Herstellung der Decklage darf dabei erst begonnen werden, wenn die Grundlage verdichtet wurde und sich keine weiteren Schwindrisse mehr bilden. Die Oberfläche des Fußbodens kann nach dem Verdichten der Decklage mit Fußbodenhartwachs und Ölen behandelt werden, um den Verschleißwiderstand zu erhöhen.<sup>49</sup>

*Stampflehmwände* werden wie Fußböden durch das Verdichten einer Lehmmischung mittels Stampfgerät hergestellt, wobei der Lehm hier von einer seitlichen Schalung begrenzt wird. Die Wahl der Schalung hat dabei erheblichen Einfluss auf den benötigten Arbeits- und Zeitaufwand. Welches Schalungssystem für ein Bauvorhaben am besten geeignet ist, hängt unter anderem von der Bauteilgeometrie und dem verfügbaren Platz auf der Baustelle ab. Eine ausführliche Beschreibung der Vor- und Nachteile verschiedener Schalungen bietet beispielsweise *Minke*.<sup>50</sup>

Unabhängig vom gewählten Schalsystem wird zur Herstellung einer Stampflehmwand erdfeuchter Lehm in 10 bis 15cm hohen Schichten in die Schalung gefüllt und auf ca. zwei Drittel der Einfüllhöhe verdichtet,<sup>51</sup> bevor eine neue Lehmschicht in die Schalung geschüttet wird. Der Herstellungsprozess soll dabei möglichst „feucht in feucht“ ablaufen – die neue Lehmlage wird also auf dem noch feuchten darunterliegenden Wandstück verarbeitet.

Durch diese Technik entstehen zwischen zwei gestampften Lagen feine horizontale Fugen, da die obere Lehmschicht stärker schwindet als die darunterliegende, bereits angetrocknete. Wenngleich diese typischen Horizontalfugen bewusst als Gestaltungselement herangezogen werden können, stellen sie dennoch immer eine Schwachstelle in der Wand dar. Um dem Entstehen dieser Fugen vorzubeugen, kann eine dünne Schicht Kalkmörtel zwischen zwei Lagen Lehm aufgetragen werden.<sup>52</sup> Sollen die Fugen sichtbar bleiben, empfiehlt sich die Einlage von Leisten aus Ziegelbruch, Steinplatten oder einer dünnen Zementschicht nach jeder vierten Lehmlage. Diese verbessern die spätere Putzhaftung und dienen als Erosionsschutz.<sup>53</sup>

Stampflehmwände bieten viele Vorteile wie ein hohes Wärmespeichervermögen und einen guten Schallschutz. Ihre Herstellung ist jedoch sehr arbeits- und zeitintensiv und verursacht unangenehme Erschütterungen auf der Baustelle. Aus diesem Grund haben sich einige Firmen in den letzten Jahren bemüht, vorgefertigte Wandelemente aus Stampflehm zu produzieren. Ihre Fertigung im Werk ist terminlich genau kalkulierbar und kann wetterunabhängig durchgeführt werden. Zudem findet die gesamte Trocknungsphase der Bauteile im Werk statt, wodurch Stehzeiten auf der Baustelle in ähnlichem Maß verkürzt werden wie bei Betonfertigteilen im Vergleich zu Ortbeton. Ein weiterer Vorteil der Vorfertigung liegt im Entfall von Lärm- und Stampfdruckbelastung auf der Baustelle sowie in der hohen Maßgenauigkeit der Bauteile.

Die Größe von vorgefertigten Wandelementen aus Stampflehm ist vor allem durch die jeweilige Baustelle und den dort vorhandenen Rohbauöffnungen bestimmt. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass Wandscheiben mit einem Gewicht von 5 Tonnen auf üblichen Baustellen gut handhabbar sind und von einem Kran in

49 vgl. CLAYTEC e.K. 2012, S.6

50 vgl. MINKE 1994/2001, S.100-103

51 vgl. CLAYTEC e.K. 2012, S.4

52 vgl. MINKE 1994/2001, S.108

53 vgl. CLAYTEC e.K. 2012, S.5

Position gebracht werden können. Dies entspricht bei einer Rohdichte von  $2400\text{kg/m}^3$  in etwa einer 30cm starken Wandscheibe mit 2,50m Länge und 2,80m Höhe. Größere Wandelemente werden in der Regel aus mehreren Fertigteilen zusammengesetzt.<sup>54</sup> Ein mittlerweile etablierter Anbieter für vorgefertigte Stampflehmwände ist die Firma *Claytec*, die unter anderem freistehende Stampflehm-Wandelemente mit 25cm oder 30cm Stärke anbietet.

### 3.1.2 Lehmsteine (Adobe)

Unter Lehmsteinen versteht man quaderförmige, trockene Lehmbaustoffe, die mit Mörtel zu einem Verband gemauert oder in Decken eingelegt werden. Anders als Ziegelsteine werden Lehmsteine nicht gebrannt, sondern nach der Formgebung nur an der Luft getrocknet.

Geschichtlich zählt der Lehmsteinbau zu einer der ältesten Bauweisen in trockenheißen, subtropischen und gemäßigten Klimazonen. Aufgrund ihrer Tragfähigkeit und Verfügbarkeit wurden Lehmsteine historisch vielerorts zur Errichtung mehrgeschossiger Bauwerke verwendet. Insbesondere in Nordafrika, Zentralasien, Indien und Südamerika sind Beispiele für bis zu zehngeschossige Hochbauten aus Lehmsteinmauerwerk zu finden.<sup>55</sup>

Lehmsteine können in verschiedenen Verfahren produziert werden, wodurch unterschiedliche Bezeichnungen für die Steine entstanden sind. Sie enthalten je nach Herstellungsart, Verwendungszweck und Bauteilbeanspruchung unterschiedliche Lehmmischungen als Ausgangsstoff.

In Formen gestampfte Lehmsteine sollten beispielsweise aus erdfeuchtem, magerem Lehm hergestellt werden, während Lehmpatzen eine mittelfette, nasse und weiche Lehmmischung benötigen, die meist faserige Zuschlagstoffe enthält. Grünlinge werden wiederum aus fettem, steinfreiem Lehm hergestellt.<sup>56</sup>

Aufgrund ihrer Zusammensetzung und des Herstellungsprozesses können Lehmsteine sehr unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen – nicht jeder Stein eignet sich für alle Verwendungszwecke. Daher wurden Anwendungsklassen eingeführt, die Mindestanforderungen an Steine unterschiedlicher Einsatzgebiete stellen.

Anwendungsklasse	Einsatzbereich
AK 1	- verputztes Außenmauerwerk - tragendes Mauerwerk
AK 2	- verkleidetes, witterungsgeschütztes Außenmauerwerk - tragendes Mauerwerk
AK 3	- Trockenbau, nicht tragend (z.B. Deckenauflagen, Stapelwände)

Tabelle 29: Anwendungsklassen von Lehmsteinen<sup>57</sup>

#### Lehmsteinmauerwerk

Das Vermauern von Lehmsteinen zu einem Mauerwerksverband erfolgt ähnlich wie bei gebrannten Ziegeln – die Steine werden fugenversetzt aufgeschichtet und mit Mauermörtel „verklebt“. Höhe und Stärke der so entstehenden Wände sind abhängig vom gewählten Steinformat bzw. dessen Vielfachem.

54 vgl. o.A.: *Vorgefertigte Elemente aus Stampflehm*  
 55 vgl. DEHN / KÖNIG / MARZAHN 2003, S.285  
 56 vgl. MINKE 1994/2001, S.119  
 57 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.35

Bezeichnung	Länge [cm]	Breite [cm]	Höhe [cm]
DF	24	11,5	5,2
NF	24	11,5	7,1
2DF	24	11,5	11,3
3DF	24	17,5	11,3
4DF	24	24,0	11,3

Tabelle 30: gängige Steinformate von Lehmsteinen<sup>58</sup>

Als Mörtel eignen sich insbesondere Lehmmörtel, hydraulischer Kalkmörtel und hochhydraulischer Kalkmörtel. Von der Verwendung von Zement- und Kalk-Zementmörtel ist hingegen abzusehen, da diese für den Lehmsteinbau zu spröde sind.

Wände aus Lehmsteinen eignen sich sowohl als lastabtragende Bauteile als auch zur Ausfachung von Skelettkonstruktionen. Ungelochte, schwere Lehmsteine erhöhen insbesondere den Schallschutz und das Wärmespeichervermögen der Wand, während Leichtlehmsteine die Wärmedämmung verbessern.

### Deckenauflagen aus Lehmsteinen

Ungelochte Lehmsteine und Grünlinge können zur Verbesserung des Schallschutzes und Erhöhung des Deckengewichts zur Vermeidung des Schwingens der Decke eingesetzt werden. Vor dem Einbau der Steine ist aufgrund ihres Gewichts jedoch die Tragfähigkeit der Decke zu prüfen.

Das Verlegen der Steine als Deckenauflage erfolgt meist auf einem mit Rieselschutz versehenen Blindboden zwischen den Deckenbalken. Die Steine werden lose in den Hohlraum geschichtet, wobei zwischen den Steinen 5mm starke Fugen einzuplanen sind. Diese werden anschließend mit Sand verfüllt, um Schallbrücken zu vermeiden. Je nach Höhe der Decke kommen als Deckenauflage vor allem die Steinformate DF und NF zur Anwendung.

### 3.1.3 Lehmplatten

Lehmplatten sind plattenförmige, vorgefertigte Lehmbaumstoffe, die meist als Verkleidung von Wandelementen und Dachschrägen, Vorsatzschalen und Trockenputz, seltener auch als Fußboden- oder Trockenestrichplatten, Anwendung finden.

Sie werden im Werk aus geeignetem Baulehm und Zuschlagstoffen produziert. Den wichtigsten Zuschlag bilden dabei Faserstoffe, die die geringe Zug- und Biegezugfestigkeit von trockenem Lehm erhöhen.

Lehmplatten werden in unzähligen Formaten und Stärken angeboten, prinzipiell kann aber zwischen dünnen, dicken und starken Lehmplatten unterschieden werden.

Dünne Lehmbaumplatten werden ähnlich wie Gipsfaser- oder Gipskartonplatten zur Beplankung von Innenwänden oder der Innenseite von Außenwänden verwendet. Die Platten werden dabei an eine Unterkonstruktion geschraubt oder mit Mörtel verklebt.<sup>59</sup> Dünne Lehm-Trockenputzplatten können zudem anstelle eines Putzes zum Einsatz kommen, indem sie auf einer Unterkonstruktion befestigt und anschließend mit einer dünnen Lage Feinputz beschichtet werden. Dies bietet den Vorteil, die

58 vgl. SCHROEDER 2010, S.125

59 vgl. MINKE 1994/2001, S.142

oft langen Trocknungszeiten des Lehmputzes deutlich zu reduzieren. Ein weiteres Anwendungsgebiet dünner Lehmplatten ist die Herstellung von Trockenestrich. Mit dicken Lehmplatten können nicht tragende Innenwände ohne Unterkonstruktion errichtet werden. Sie eignen sich zudem in Geschossdecken als zusätzliche Flächenlast zur Verbesserung der Schalldämmung.

Starke Platten werden meist aus Stampflehm gefertigt und als tragende Wände eingesetzt. Sie bedürfen jedoch aufgrund des höheren Gewichts einer entsprechenden Montagetechnik und Planung.

### 3.1.4 Lehmschüttungen

Lehmschüttungen bestehen aus rieselfähigem Lehmgranulat und mineralischen oder organischen Zuschlagstoffen, wobei nahezu jeder Baulehm zu ihrer Herstellung geeignet ist. Die Schüttungen werden zur Füllung von Hohlräumen in horizontalen und vertikalen Bauteilen eingesetzt und dienen vorrangig der Erhöhung des Schall- und Wärmeschutzes sowie der Masse eines Bauteils.<sup>60</sup>

Lehmschüttungen, die in horizontalen Elementen wie Geschossdecken eingesetzt werden, müssen auf trockenem und tragfähigem Untergrund eingebracht werden. Undichte Konstruktionen sollten zudem mit einem Rieselschutz, z.B. Vlies oder Papier, versehen werden. Die Lehmmischung kann händisch oder mit einer Estrichpumpe auf den vorbereiteten Untergrund geschüttet werden. Abhängig vom Hersteller werden Schütthöhen von 6 bis 10cm empfohlen. Für stärkere Bauteilschichten wird die Schüttung schichtweise eingebracht, lagenweise abgezogen und verdichtet.

Wird die Lehmschüttung als Hinterfüllung von Wandelementen verwendet, muss zunächst eine Unterkonstruktion aufgestellt und im unteren Bereich der Wand ein Putzträger montiert werden. Anschließend wird die Lehmschüttung schichtweise eingebracht und der Putzträger ein Stück hochgezogen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das Wandelement vollständig verfüllt ist.

Lehmschüttungen sind als trockene oder feuchte Mischungen erhältlich und weisen je nach Produkt eine unterschiedliche Restfeuchtigkeit auf. Abhängig vom Feuchtegehalt fallen daher Trocknungszeiten an, die zwischen einigen Tagen und mehreren Wochen variieren. Bevor ein mit einer Lehmschüttung gefüllter Hohlraum geschlossen werden kann, muss der Lehmstoff vollständig ausgetrocknet sein. Die Trockendauer wird dabei in der Regel vom Hersteller angegeben. Zudem empfiehlt sich eine Prüfung des Feuchtegehalts auf der Baustelle.

### 3.1.5 Lehmestrich

Lehmestriche gehören zu den ältesten Estricharten und können ohne Belag wie Stampflehmfußböden eingesetzt werden. Als Baulehm eignet sich nicht zu grobkörniger Lehm mit organischen oder mineralischen Zuschlägen. Vor allem Faserstoffe wie Strohhäcksel mindern dabei die Rissanfälligkeit. Die Zugabe von Kalk zur Lehmmischung verbessert die Steifigkeit des Lehms, begünstigt jedoch gleichzeitig die Rissanfälligkeit im Alter, da das Lehm-Kalkgemisch wie Mörtel reagiert und auch bei geringen Dehnungen reißt.<sup>61</sup>

Zur Herstellung eines Lehmestrichs wird das erdfeuchte Lehmgemisch auf tragfähigem Untergrund schichtweise eingefüllt und festgestampft. Auftretende Trocknungsrisse

60 vgl. SCHROEDER 2010, S.119

61 vgl. DEHN / KÖNIG / MARZAHN 2003, S.285

werden dabei zugestampft, bis die Rissbildung abgeschlossen ist und sich keine weiteren Risse bilden.

### 3.1.6 Lehmmörtel

Lehmmörtel bezeichnen mit feinkörnigen oder feinfaserigen Zuschlagstoffen abgemagerte Lehmgemische<sup>62</sup>, die als Verbindungsmittel von Mauersteinen, zur Beschichtung von Wänden und Decken oder zur Ausfachung von Skelettkonstruktionen verwendet werden. Abhängig von ihrem Verwendungszweck werden die Mörtelmischungen als Lehm-Mauermörtel, Lehm-Putzmörtel oder Lehm-Spritzmörtel bezeichnet.

Welcher Baulehm und welche Zuschlagstoffe für Lehmmörtel gewählt werden, hängt maßgeblich vom geplanten Verwendungszweck der Mischung ab.

Mauermörtel sollte aus fast fettem bzw. schwach bindigem Baulehm hergestellt werden, während Putzmörtel schluffig-sandigen Baulehm mit einem ausreichend hohen Kornanteil im Grobschluff- bis Mittelsandbereich zur Reduktion des Schwindmaßes benötigt. Für Spritzmörtel wird fast fetter bis fetter bzw. schwach bis mittel bindiger Lehm verwendet.<sup>63</sup>

Als Zuschlagstoff wird dem Lehm in vielen Fällen Sand zur Abmagerung beigemischt, um die Rissanfälligkeit zu mindern. Für Mauermörtel wird hier insbesondere Mittel- bis Grobsand mit einer Korngröße unter 2mm verwendet, während Putzmörtel mit verschiedenen scharfkantigen Sanden gemagert wird, die die Untergrundhaftung verbessern. Putzmörtel wird zudem oft mit organischen Faserstoffen als Bewehrung gegen Rissbildung gemischt. Hierfür eignen sich beispielsweise Pflanzenfasern und Sägemehl. Spritzmörtel enthält neben Sand häufig ebenfalls Sägemehl sowie fein gehäckselte Strohfasern als Zuschläge.<sup>64</sup>

#### Lehm-Mauermörtel

Lehm-Mauermörtel wird für das Vermauern von Lehmsteinen oder anderen natürlichen oder künstlichen Mauersteinen eingesetzt. Er sorgt dabei für eine kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Steine im Mauerwerksverband und gleicht Maßungenauigkeiten der Steine aus. Aufgrund der geringen Witterungsbeständigkeit von Lehm sollten Lehm-Mauermörtel vorwiegend im Innenbereich und geschützten Außenbereich verwendet werden.

Die Herstellung von Mauerwerksverbänden mit Lehm-Mauermörtel unterscheidet sich kaum von konventionellen Systemen. Das zum Mauern bestimmte Lehmgemisch kann mit herkömmlichen Maschinen aufbereitet und mit üblichen Mörtelpumpen transportiert werden. Da Lehm nicht chemisch abbindet, hat er gegenüber anderen Mörteln den großen Vorteil, dass er lange aufbewahrt und auch über einige Zeit in Maschinen und Pumpen verbleiben kann, ohne diese dauerhaft zu verstopfen.

Stoß- und Lagerfugen aus Lehm-Mauermörtel sollten in Stärken von maximal 1cm bis 1,5cm ausgeführt werden, wodurch sich für ein Mauerwerk aus Lehmsteinen ein Mörtelbedarf von ca. 27L/m<sup>2</sup> für NF-Steine bzw. 20L/m<sup>2</sup> für 2DF- und 3DF-Steine ergibt. Die Fugen müssen dabei vollflächig ausgeführt werden, um Hohlräume zu vermeiden und Setzungen vorzubeugen. Anschließend wird der Mörtel abgezogen

62 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.41

63 vgl. SCHROEDER 2010, S.121-124

64 vgl. ebenda, S.121-124

und einige Millimeter scharfkantig ausgekratzt.<sup>65</sup> Beim Mauern mit Lehm-Mauermörtel muss darauf geachtet werden, keine zu großen Höhen in einem Stück zu mauern, da der noch feuchte und weiche Lehm sonst unter dem zunehmenden Gewicht zu stark gepresst wird. Je nach Hersteller werden hier maximale Höhen von 1,5m bis 2m pro Trag empfohlen.

### *Lehm-Putzmörtel*

Lehmputz dient der Beschichtung von Bauteiloberflächen im Innenraum und witterungsgeschützten Außenraum. Er eignet sich für mechanisch gering beanspruchte Flächen und kann in allen Räumen eingesetzt werden, deren Luftfeuchtigkeit nicht dauerhaft erhöht ist. Auch ein Einsatz von Lehmputz in Küchen und Bädern stellt kein Problem dar, solange die Flächen keinem Spritzwasser ausgesetzt sind. Als Untergrund für Fliesen eignet sich Lehmputz jedoch nur bedingt.<sup>66</sup>

Lehm-Putzmörtel kann einlagig oder mehrlagig ausgeführt werden. Welches Putzsystem zur Anwendung kommt, hängt vom Putzuntergrund sowie den Anforderungen an den Putz ab.

Einlagige Lehmputze eignen sich für planebene, maßgerechte, gleichmäßig saugende Oberflächen und werden üblicherweise 1cm bis 1,5cm dick ausgeführt. Auf ungleichmäßigen Oberflächen, bei speziellen Putzgestaltungen sowie bei benötigten größeren Putzdicken kommen mehrlagige Lehmputze zur Anwendung. Sie erreichen Stärken von mehreren Zentimetern und bestehen meist aus zwei bis drei Lehmschichten.

Lehm-Putzmörtel kann händisch oder maschinell mit handelsüblichen Geräten aufgetragen werden. Er sollte beim Auftrag eine plastische bis breiige Konsistenz haben, um eine ausreichende Untergrundhaftung zu gewährleisten und gleichzeitig das Trockenschwindmaß gering zu halten.

Abhängig von der Putzdicke, der Saugfähigkeit des Untergrunds und den raumklimatischen Bedingungen sind beim Arbeiten mit Lehmputz längere Trocknungszeiten zu berücksichtigen – eine 1cm starke Lehmputzlage ist beispielsweise erst nach mindestens einer Woche ausreichend trocken, um weiterbearbeitet zu werden.<sup>67</sup>

### *Lehm-Spritzmörtel*

Lehm-Spritzmörtel wird zur Ausfachung von Skelettkonstruktionen, zur Herstellung von Vorsatzschalen sowie als Deckenfüllung angewandt. Auch bei der Sanierung historischer Fachwerke ist der Einsatz von Lehm-Spritzmörtel sehr sinnvoll, da er das Verfüllen von ausgebrochenen Stellen, Fugen und Schadstellen im Holz erlaubt.

Die Herstellung von Wandelementen aus Lehm-Spritzmörtel erfolgt durch das Spritzen einer nassen Lehmmischung auf ein Trägerelement wie z.B. ein Geflecht aus Weidenruten oder eine verlorene Schalung. Da der hierfür benötigte Lehmmörtel sehr dünnflüssig sein muss, empfiehlt sich die Zugabe von grobkörnigen und faserigen Zuschlagstoffen zur Reduktion von Trocknungsrissen. Lehm-Spritzmörtel wird in Stärken von mindestens 3cm aufgespritzt und kann wie Lehm-Putzmörtel aus mehreren Lagen bestehen.

65 vgl. CLAYTEC e.K. 2018a, S.3

66 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.79

67 vgl. CLAYTEC e.K. 2018b, S.5

### 3.1.7 Lehmfarben

Lehmfarben dienen dem farbigen Gestalten von Bauteiloberflächen im Innenraum. Sie sind in der Regel überall anwendbar, wo auch Lehm-Putzmörtel zum Einsatz kommt. Die Farben können zudem mit körnigen Füllstoffen versetzt werden, wodurch sie den Charakter einer sehr dünnen Putzschicht erhalten. Lehmfarben dürfen überstrichen werden und sind bedingt lasierbar.<sup>68</sup>

Farben aus Lehm bestehen hauptsächlich aus Tonmehlen, Sand und Wasser. Zusätzlich werden oft auch Methylzelluloseleim, Pflanzenstärke oder Kasein als weitere Binde- und Verdickungsmittel beigemischt. Zudem können Marmorgranulat und Kreide als Füllstoffe in der Lehmmischung eingesetzt werden, wodurch die Farbsättigung und Deckkraft verbessert wird.<sup>69</sup> Die Farbgebung erfolgt bei Lehmfarben entweder direkt über farbige Lehme und Sande oder durch die Zugabe von Pigmenten.

Lehmfarben eignen sich aufgrund der Wasserlöslichkeit von Lehm hauptsächlich für den Einsatz in Innenräumen. Wie Lehmputz kann auch Lehmfarbe in Feuchträumen eingesetzt werden, sofern ein direkter Kontakt mit Wasser verhindert wird. Das Auftragen der Farbe erfolgt nach herkömmlichen Prinzipien und kann beispielsweise mittels Rolle, Pinsel oder Spritzpistolen durchgeführt werden.

## 3.2 Über die Rolle von Lehm in mehrschichtigen Bauteilen

Baustoffe aus Lehm weisen eine Vielzahl positiver Eigenschaften auf und zählen aufgrund ihrer energiearmen Herstellung zu den nachhaltigsten Baustoffen. Dennoch verfügen sie auch über gewisse Charakteristika, die sie in ihrer Anwendbarkeit einschränken. Anders als bei den meisten Baustoffen sind die Einsatzgebiete von Lehm aber weniger deutlich abgegrenzt – während Stahlbeton vor allem als Tragstruktur oder Mineralwolle vorrangig als Wärmedämmstoff genutzt wird, kann Lehm nicht ausschließlich einer Funktion zugeordnet werden. Abhängig von seiner Zusammensetzung und Aufbereitung ist der Baustoff in vielen Bauteilschichten sinnvoll einsetzbar.

Im folgenden Kapitel wird erläutert, welche Aufgaben Lehm in einem Bauteil am besten übernehmen kann und in welchen Bereichen andere Baustoffe dem Lehm vorzuziehen sind.

### 3.2.1 Lehm als Tragstruktur

Bauteile, die Lasten aus dem Bauwerk aufnehmen sollen, müssen ausreichende Festigkeitseigenschaften aufweisen. Im Lehmbau eignen sich vor allem Stampflehm und Lehmsteine für den Einsatz als tragende Bauteile, jedoch sind ihre Druck- und Zugfestigkeit wesentlich geringer als jene anderer tragender Baustoffe, wie in der nachstehenden Tabelle veranschaulicht wird.

68 vgl. FROMME 2010, S.97

69 vgl. o.A.: *Lehmfarbe*

Baustoff	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Stampflehm	2 – 5	0,3 – 1
Lehmstein	2 – 4	0,3 – 1
Stahl	–	310 – 690
Beton	20 – 80	3 – 5
Fichtenholz quer zur Faser	6	3
Fichtenholz parallel zur Faser	50	80 – 120
Ziegel	5 – 50	1 – 15

Tabelle 31: Richtwerte üblicher Festigkeitseigenschaften tragender Baustoffe

Hinzu kommt, dass aufgrund fehlender Forschung und Normung sowie den daraus resultierenden Unsicherheiten für Lehm sehr hohe Sicherheitszuschläge im Bemessungskonzept angesetzt werden, wodurch tragende Lehmbauteile wesentlich höhere Bauteildicken aufweisen müssen als andere Massivbaustoffe. Der deutsche *Dachverband Lehm* gibt in den *Lehmbauregeln* für tragende Lehmwände beispielsweise folgende Mindestwandquerschnitte an:

Baustoff	Wandtyp	Wandstärke mind. [cm]
Lehmstein-Mauerwerk	Außenwand	36,5
Stampflehm-Mauer	Außenwand	32,5
Lehmstein-Mauerwerk	Innenwand	24 / 32,5*
Stampflehm-Mauer	Innenwand	24 / 36,5*

\* bei Geschosshöhen über 2,75m

Tabelle 32: Mindestwandstärken tragender Lehmbauteile<sup>70</sup>

Diese Mindestdicken für tragende Lehmwände beziehen sich jedoch nur auf eine Höhe von maximal zwei Geschossen und Gebäude mit maximal zwei Wohnungen. Für größere Bauvorhaben sind Nachweise im Einzelfall zu erbringen und die Bemessungen entsprechend anzupassen. Für übliche Wiener Wohnbauten bedeutet dies meist eine unwirtschaftliche Wandstärke der tragenden Lehmschicht.

Während tragende Wandelemente aus Lehm dennoch prinzipiell umsetzbar sind, können plane Geschossdecken und Flachdächer nicht mit einer Tragstruktur aus diesem Material realisiert werden. Aufgrund der geringen Zug- und Biegezugfestigkeit erlauben Lehmstoffe in der Theorie nur geringe Spannweiten – in der Praxis ist die Belastung von Lehmteilen auf Zug derzeit allerdings untersagt. Gebaute Lehmdecken bestehen bislang im Regelfall aus einer Holzkonstruktion, die mit Lehm ausgefacht ist – der Lehm trägt also nicht, sondern übernimmt vorrangig brand- und schallschutztechnische Funktionen.

Zur Überspannung von Räumen mit Lehmstoffen können allerdings anstelle herkömmlicher Geschossdecken Gewölbe ausgebildet werden, solange die Gewölbegeometrie ein Auftreten von Biegespannungen verhindert. Da die Ausbildung solcher Deckenkonstruktionen jedoch sowohl zeitintensiv ist als auch einen hohen zusätzlichen Raum- und Materialbedarf aufweist, ist dieses Konzept für mehrgeschossige Bauvorhaben wenig wirtschaftlich.

### 3.2.2 Lehm als Speicher- und Dämmmaterial

Baustoffe aus Lehm können sowohl wärmespeichernd als auch wärmedämmend eingesetzt werden. Während wärmespeichernde Lehmstoffe eine hohe Rohdichte und Verdichtung aufweisen müssen, benötigen wärmedämmende Lehmmischungen eine möglichst niedrige Rohdichte und wenig wärmeleitende Zuschlagstoffe (vgl. 2.2.6 *Wärmeleitfähigkeit* und 2.2.7 *Wärmespeichervermögen*).

Wärmespeichernde Baustoffe haben den Zweck, kurzzeitige Schwankungen der Außentemperatur abzufedern. Die Speichermassen dämpfen Temperaturextreme und verzögern eine Änderung der Innenraumtemperatur. Zudem kann eine nachts von der Außenluft gekühlte Speicherwand den Raum im Sommer tagsüber kühlen oder die Heizwärme des Tages im Winter nachts an diesen abgeben.

Das Wärmespeichervermögen eines Bauteils hängt dabei von der spezifischen Wärme des Materials, dessen Rohdichte und der Bauteilstärke ab, weshalb schwere Lehmstoffe wie Stampflehm besser als Speichermasse geeignet sind als leichte Mischungen.

Baustoff	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kgK)]
Massivlehm	1200 – 2200	1000
Leichtlehm	300 – 1200	1000 – 1500
Vergleichend: Beton	2000 – 2400	960

Tabelle 33: Rohdichte und spezifische Wärmekapazität von Lehm und Beton

Im Vergleich mit anderen Massivbaustoffen zeigt sich, dass das Wärmespeichervermögen von Lehm ähnlich gut ist wie jenes von Beton. Die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils berechnet sich aus dem Produkt der Rohdichte, der spezifischen Wärmekapazität und der Schichtstärke – für eine 30cm starke Bauteilschicht ergibt sich bei einer Rohdichte von 2000kg/m<sup>3</sup> somit ein Wärmespeichervermögen von 2000kJ/m<sup>2</sup>K für Massivlehm und 1920kJ/m<sup>2</sup>K für Beton.

Anders als wärmespeichernde Materialien zielen wärmedämmende Stoffe darauf ab, ein Auskühlen der Wand und des Innenraums zu verhindern. Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe bremst den natürlichen Wärmestrom von warmen zu kalten Bereichen durch ihre poröse, mit Luft gefüllte Struktur. Um Lehm als Wärmedämmschicht einzusetzen, muss dieser daher eine möglichst geringe Rohdichte und poröse Struktur aufweisen, was durch entsprechende Leichtzuschläge erreicht wird.

Der Baustoff Leichtlehm zählt zwar nicht offiziell zu den Wärmedämmstoffen, erzielt jedoch aufgrund seiner geringen Rohdichte und seiner schlecht wärmeleitenden Zuschläge wie Stroh oder Blähton im Vergleich mit anderen Massivbaustoffen wesentlich bessere Wärmedämmeigenschaften als diese. Er ist zudem diffusionsoffen und kapillaraktiv und weist ein besseres – wenn auch nicht mit Massivlehm vergleichbares – Wärmespeichervermögen auf als die meisten Dämmstoffe.

Verglichen mit anderen Wärmedämmungen erreicht Leichtlehm dennoch nicht die für diese Baustoffgruppe üblichen Wärmeschutzwerte, weshalb der alleinige Einsatz des Materials als Dämmstoff unwirtschaftliche Bauteildicken mit sich bringen würde. Außenbauteile aus Lehm benötigen daher in jedem Fall eine zusätzliche Dämmschicht. Eine Kombination aus ausfachendem Leichtlehm im Bereich der Tragstruktur und einer zusätzlichen Wärmedämmung mit geringerer Bauteilstärke erscheint daher als sinnvolle Ausführungsvariante.

### 3.2.3 Lehm im Trockenbau

Wenngleich Lehmbaustoffe lange Zeit vor allem direkt auf der Baustelle aufbereitet und nass zu Bauteilen verarbeitet wurden, sind heute auch viele vorgefertigte Produkte erhältlich, die trocken eingebaut werden können. Vor allem Lehmplatten und -steine sind im Trockenbau geeignet und werden unter anderem als Vorsatzschalen, Bekleidungen, abgehängte Decken und Speichermassen eingesetzt.

Nicht tragende Innenwände aus Lehmplatten bieten beispielsweise den Vorteil, dass die Bauteile anders als bei Gipskartonkonstruktionen nicht hohl klingen, bessere Schallschutzwerte erreichen und feuchteregulierend wirken. Durch den Einbau trockener Lehmbaustoffe entfallen zudem die oft langen Trocknungszeiten des Lehms, wodurch Bauzeit und Konstruktion im Wesentlichen konventionellen Systemen entsprechen.

Lehmsteine dienen im Trockenbau vor allem der Herstellung von wärmespeichernden Stapelwänden, bei denen die Steine ohne Mörtel aufeinandergeschichtet und stellenweise mit Kanthölzern gesichert werden. Das Herstellen des Mauerwerkverbands erfolgt durch den trockenen Versatz der Steine wesentlich schneller als bei üblicher Mauerwerksarbeit.

Trockene Lehmprodukte im Innenausbau stellen heute ein wichtiges Anwendungsgebiet im Lehmbau dar, da sie wirtschaftlich durchaus mit derzeit verbreiteten Systemen mithalten können, gleichzeitig aber bauphysikalisch und raumklimatisch bessere Eigenschaften aufweisen als diese.

### 3.2.4 Lehm als Flächenlast in horizontalen Bauteilen

Wie bereits in [3.2.1 Lehm als Tragstruktur](#) beschrieben, eignen sich Lehmbaustoffe nicht zur Herstellung tragender Deckenelemente. Als zusätzliche Flächenlast können sie jedoch eine wesentliche Verbesserung des Trittschallschutzes in horizontalen Skelettkonstruktionen erzielen und das Schwingverhalten der Decke durch ihr Gewicht maßgeblich reduzieren. Besonders lose verlegte Lehmsteine und Lehmschüttungen eignen sich für diesen Zweck.

Festgestampfte Lehmmischungen können zudem zur Herstellung des Estrichs genutzt werden. Dieser bietet gegenüber konventionellen Betonkonstruktionen den Vorteil, diffusionsoffen zu sein und sich an das Innenraumklima anzupassen.

### 3.2.5 Oberflächengestaltung mit Lehm

Putzsysteme und Anstriche bilden den Oberflächenabschluss eines Bauteils und müssen dieses vor mechanischen und witterungsbedingten Schäden schützen. Ausschlaggebend dafür sind vor allem die Abriebfestigkeit, Kantenfestigkeit und Feuchteempfindlichkeit der Materialien. Besonders im Lehmbau müssen Putzsysteme und Anstriche jedoch auch ausreichend diffusionsoffen und elastisch sein, um eine gute Symbiose mit Lehm zu erzielen.

Putzmörtel und Anstriche aus Lehm erfüllen diese Eigenschaften im Wesentlichen und haben in den letzten Jahren stark an Beliebtheit gewonnen – Lehmputzmörtel erzielen unter allen Lehmbaustoffen heute den größten Marktanteil.

Lehmputz eignet sich insbesondere für den Auftrag auf Bauteilschichten aus Lehmbaustoffen, da sich die beiden Produkte kraftschlüssig zu einer Einheit verbinden. Er kann jedoch auch auf den meisten anderen, handelsüblichen Putzuntergründen aufgetragen werden, wie in nachstehender Tabelle gezeigt wird.

Untergrund	Eignung	Anmerkung
Lehmsteine	geeignet	
Lehmplatten	geeignet	- Stöße armieren - dünne Putzlagen
Stampflehm	geeignet	
Leichtlehm	geeignet	
Vollziegel-Mauerwerk	geeignet	
Porenbeton-Mauerwerk	bedingt geeignet	- Grundierung - dünne Putzlagen
Beton	bedingt geeignet	- rauer Spritzbewurf als Grundierung - Oberfläche auf Reste von Zementleim und Schalöl prüfen
Gipskarton-, Gipsfaserplatten	bedingt geeignet	- die Platten sind nicht für das Tragen zusätzlicher Lasten geeignet - Stöße armieren - dünne Putzlagen
Holzverschalung	geeignet	- die Platten neigen schon bei geringem Wassereintrag zum Quellen
Harte Holzwerkstoffplatten	ungeeignet	

Tabelle 34: übliche Putzuntergründe und ihre Eignung für Lehmputze<sup>71</sup>

Für alle mit Lehm zu verputzenden Untergründe gilt dabei, dass diese ausreichend fest, griffig, saugfähig und trocken sein müssen. Die Anforderungen an die Festigkeit der Materialien entspricht im Wesentlichen jenen für andere Putzsysteme. Der Putzuntergrund muss zudem so maßgerecht sein, dass der Lehmputz möglichst gleichmäßig dick aufgetragen werden kann.<sup>72</sup>

Aufgrund seiner Wasserlöslichkeit wird Lehmputz hauptsächlich im Innenraum angewandt. Gut bindiger, mit scharfkantigem Quarzsand gemagerter Lehmputzmörtel erzielt zwar in der Regel einen ausreichenden Wetterschutz für die dahinterliegende Lehmwand, stark schlagregenbeanspruchte Gebäudeseiten müssen aber trotzdem mit schützenden Anstrichen versehen werden. Da für Außenputzsysteme in Wien eine ausreichende Witterungsbeständigkeit vorgeschrieben wird, bedingt der Einsatz von Lehmputzen hier entsprechende Zusätze wie Zement oder eine andere, schützende Oberflächenbehandlung.

Im Innenraum kann Lehmputz an allen Wand- und Deckenelementen aufgebracht werden, sofern diese nicht verfließt oder direktem Spritzwasser ausgesetzt werden. An stark beanspruchten Wänden wie im Bereich des Stiegenhauses sollte ein Lehmputz mit besonders hoher Abrieb- und Kantenfestigkeit gewählt werden.

Neben Putzmörteln aus Lehm kann der Oberflächenabschluss eines Bauteiles zusätzlich mit Lehmfarben hergestellt werden. Als Untergrund eignen sich hierfür alle saugfähigen, mineralischen Oberflächen wie beispielsweise Gipskarton- und Gipsfaserplatten oder mineralische Putze,<sup>73</sup> besonders auf Lehmputz oder anderen Lehmoberflächen ist der Einsatz von Lehmfarben aber sinnvoll. Glatte, nicht saugende Flächen wie Acryloberflächen und Kunststoffbeschichtungen sind als Grundlage für Lehmfarben hingegen ungeeignet. Stark saugende Materialien sollten vor einem Lehmanstrich grundiert werden.<sup>74</sup> Die zu streichende Oberfläche muss zudem frei von Verunreinigungen, Staub und durchfärbenden Bestandteilen sowie ausreichend

71 vgl. ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.45-48

72 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.77f.

73 vgl. o.A.: *Naturton Lehmfarben, Verarbeitungs- und Gebrauchsanweisung*

74 vgl. LEVITA LEHM 2017

trocken sein. Lehmfarben haben gegenüber anderen Farbprodukten den Vorteil, dass sie nahezu schadstofffrei und somit für Mensch und Raumklima weitestgehend unbedenklich sind.

### 3.3 Lehm-Hybride: Lehm in Kombination mit anderen Baustoffen

Die vorausgehende Analyse zeigt die Vor- und Nachteile von Lehm in unterschiedlichen Bauteilschichten und verdeutlicht, dass der Baustoff nicht in allen Bereichen problemlos eingesetzt werden kann. Es ist daher nötig, das Material mit anderen Stoffen zu kombinieren, um langlebige und technisch nachhaltige Bauteile zu entwickeln.

Lehm harmoniert dabei aufgrund seiner Eigenschaften mit gewissen Baustoffen besser als mit anderen und nicht alle derzeit im Bauwesen verbreiteten Ausführungen können mit Lehm sinnvoll umgesetzt werden.

Lehm gilt aufgrund seiner Verfügbarkeit und des geringen Energieverbrauches in der Gewinnung und Herstellung zudem als sehr nachhaltiger Baustoff. Bauteilaufbauten aus Lehm sind aber stets nur so ökologisch, wie die übrigen Materialien, mit denen dieses Naturprodukt kombiniert wird.

Im Folgenden werden daher die grundsätzlichen Anforderungen an Baustoffe, die gemeinsam mit Lehm eingesetzt werden, aufgezeigt und Materialien vorgestellt, die diesen Eigenschaften entsprechen. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Baustoffe auf ihre Ökologie untersucht, um nicht nur technisch machbare, sondern auch ökologisch sinnvolle Bauteilaufbauten entwickeln zu können.

#### 3.3.1 Tragende Baustoffe

Wie bereits in [3.2.1 Lehm als Tragstruktur](#) beschrieben, weisen Lehmbaustoffe im Vergleich zu anderen Materialien nur geringe Festigkeiten auf und bedürfen wesentlich größerer Bauteilquerschnitte. Die momentan vorliegenden Beschränkungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten tragender Lehmkonstruktionen erschweren deren Einsatz im mehrgeschossigen Wohnbau, da durch höhere Bauteilstärken Nutzfläche verloren geht, längere Trocknungszeiten einzuplanen sind und die Wirtschaftlichkeit anderer, derzeit üblicher Konstruktionen nicht erreicht werden kann. Daher scheint die Überlegung sinnvoll, Lehm in mehrgeschossigen Bauvorhaben nicht tragend, sondern als raumabschließendes Element einzusetzen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die am meisten verbreiteten, tragenden Baustoffe auf ihre Verträglichkeit mit Lehm untersucht.

**Stahlbeton** zählt zu den am häufigsten verwendeten Baustoffen im Wiener Wohnungsneubau und wird vor allem zur Errichtung tragender Außenwände, Geschossdecken, Dächer und erdberührter Bauteile verwendet. Die Tragkonstruktion bildet hier meist gleichzeitig das raumabschließende Element, wodurch sich der Einsatz von Lehm im Wesentlichen auf die Ausbildung von Innenwänden, Bekleidungen und Vorsatzschalen beschränkt.

Eine flächige Ausführung der Bauteile aus Stahlbeton ist dabei aus statischer Sicht nicht notwendig, sondern entspricht eher dem Wunsch nach möglichst einfachen und raschen Bauabläufen. Dieser einfachen Handhabung steht jedoch der schlechte ökologische Fußabdruck des Materials entgegen. Der Verbundwerkstoff Stahlbeton

besteht aus zwei Ausgangsstoffen, die in ihrer Herstellung sehr große Mengen an Energie verbrauchen. Zur Zementherstellung wird zudem ausreichend Sand benötigt, was seit einigen Jahren aufgrund der Gewinnung an Meeresstränden zu einem immer größeren Umweltproblem führt. Hinzu kommt, dass Stahl und Beton im Falle eines Gebäudeabbruchs nur unter hohem Aufwand voneinander getrennt werden können und eine Wiederverwendbarkeit der Bauteile kaum gegeben ist.

In Anbetracht dieses hohen Energie- und Ressourcenverbrauchs müssen im Zuge eines nachhaltigen Bauens dringend Möglichkeiten gefunden werden, den Einsatz von diesem und ähnlich energieintensiven Baustoffen auf jene Bereiche zu beschränken, in denen sie aus statischer oder bauphysikalischer Sicht notwendig sind.

Insbesondere im Bereich der Außenwände kann der Einsatz von Stahlbeton durch die Ausführung als Skelettbau reduziert werden. Der Raumabschluss kann bei einer solchen Bauweise beispielsweise durch Lehmbaustoffe gebildet werden. Diese benötigen deutlich weniger Energie in der Herstellung und verbessern gleichzeitig das Raumklima sowie den Schallschutz der Stahlbetonbauteile.

Hinsichtlich des Verbunds von Stahlbeton und Lehmbaustoffen muss dabei allerdings beachtet werden, dass Lehm aufgrund der glatten Betonoberfläche deutlich schlechter an Stahlbeton haftet als beispielsweise an Holz oder Ziegel. Um die beiden Baustoffe ausreichend kraftschlüssig miteinander zu verbinden, muss ein Spritzbewurf aus Zement und grobkörnigem Sand auf die Stahlbetonelemente aufgebracht werden, der für eine rauere Oberfläche sorgt. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass der Beton frei von Schalöl und Zementleim ist.

Gebrannte **Ziegelsteine** werden vorrangig mit Mörtel zur Herstellung von Mauerwerk verwendet, sind aber anders als Lehmziegel je nach Produkt auch im Außenraum problemlos anwendbar. Wie Stahlbeton bilden sie in der Regel gleichzeitig mit der Tragfunktion auch den Raumabschluss des Gebäudes, wodurch der Einsatz von Lehm in Wänden in ähnlichem Maße eingeschränkt wird wie im Stahlbeton-Massivbau. Lehmbaustoffe können in Ziegelbauten allerdings als beschwerende Deckenaufgabe Anwendung finden, sofern diese als Holz- anstelle einer Betonkonstruktion ausgeführt wird. Diese Kombination wurde im Wiener Wohnungsbau beispielsweise in Gründerzeithäusern häufig umgesetzt.

Ziegelbauteile sind im Normalfall ausreichend porös und saugfähig, um eine kraftschlüssige Haftung des Lehms an ihrer Oberfläche zu gewährleisten. Das Saugvermögen der Steine entwickelt sich allerdings teilweise erst nach dem Anlassen und sollte vorab geprüft werden. Zu beachten ist außerdem der Feuchtegehalt von Ziegelmauerwerk, das längere Zeit der Witterung ausgesetzt war.

Der ökologische Fußabdruck von Ziegel ist besser zu bewerten als jener von Stahlbeton. Zwar werden die Mauersteine ebenfalls gebrannt, allerdings ist die hierfür benötigte Energie geringer als bei der Stahl- und Betonherstellung. Abhängig vom gewählten Mörtel stellt sich auch die Entsorgung und Rückführung in den Stoffkreislauf weniger problematisch dar.

Tragwerke aus **Stahl** bieten den Vorteil, dass sie als Skelettkonstruktion ausgeführt werden und Lehmbaustoffe somit in der Theorie in vollem Ausmaß als ausfachende Elemente eingesetzt werden können.

Stahl ist jedoch nahezu dampfdicht und ein sehr guter Wärmeleiter, weshalb zwischen größeren Stahlbauteilen und Lehmbaustoffen leicht Kondensat auftreten kann. Hinzu kommt, dass Stahl eine geschlossene, sehr glatte Oberfläche aufweist, an der Lehm kaum haftet. Dies erschwert die Befestigung der Lehmbaustoffe und erfordert oft sehr komplizierte Detaillösungen.

Ein weiterer, negativer Aspekt ist der hohe Energieaufwand bei der Produktion von Stahlbaustoffen. Anders als beim Verbundwerkstoff Stahlbeton können reine Stahlbauteile jedoch zumindest wiederverwendet oder zu anderen Produkten weiterverarbeitet werden.

Die Kombination von Tragwerken aus **Holz** und raumabschließenden Elementen aus Lehm baut auf einer langen Tradition auf und kann als sehr positiv bewertet werden. Aufgrund ihrer Eigenschaft, Feuchtigkeit rasch aufzunehmen, können Lehmbaustoffe das Holz vor zu starker Durchfeuchtung schützen und beugen so einem Befall durch Pilze vor. Wird die Holzkonstruktion allseitig von Lehm ummantelt, schützt dieser sie zudem vor holzschädigenden Insekten sowie im Brandfall.

Durch die raue Holzoberfläche haftet Lehm gut an Holzbauteilen und kann ohne komplizierte Verbindungen als Ausfachung eingesetzt werden. Ein vollflächiger Innenputz aus Lehm kann zudem ab einer Rohdichte von  $900\text{kg/m}^3$  als winddicht angesehen werden,<sup>75</sup> wodurch auf die sonst im Holzbau notwendige, in ihrer Ausführung oft aufwändige und fehleranfällige winddichte Folie verzichtet werden kann.

Anders als Beton, Ziegel und Stahl ist Holz ein nachwachsender und heimischer Rohstoff, der wie Lehm ohne energieaufwändigen Prozess zu einem Bauprodukt verarbeitet werden kann. Selbst die Herstellung von Holzwerkstoffen, die aus Holzresten und Bindemitteln unter Druck oder Hitze gefertigt werden, benötigt wesentlich weniger Energie als die zuvor beschriebenen Baustoffe. Holzbaustoffe können zudem ohne großen Aufwand wiederverwendet oder zu anderen Holzbauteilen weiterverarbeitet werden. Da Holz ein natürlicher Rohstoff ist, muss ausgedientes Material nicht deponiert werden, da es ohne weitere Behandlung verrottet. Dies setzt allerdings voraus, dass die Holzbaustoffe nicht mit Stoffen versetzt wurden, die diesem natürlichen Zersetzungsprozess entgegenstehen. Stark behandeltes Bauholz, das nicht direkt an die Umwelt zurückgegeben werden kann, ist jedoch zumindest hinsichtlich einer weiteren stofflichen oder energetischen Verwertung wesentlich unproblematischer als andere Baustoffe.

Wenngleich alle der oben angeführten Baustoffe prinzipiell mit Lehm kombiniert werden können, erscheint dennoch vor allem eine Kombination von Holzkonstruktion und Lehmausfachung als bautechnisch und ökologisch sinnvoll. Dies zeigt sich auch in der Fülle an gebauten Beispielen aus Holz und Lehm.

Im Bereich der Stahlbetonbauweise kann durch eine Reduktion auf ein tragendes Stahlbetonskelett und eine Ausfachung aus Lehmbaustoffen ebenfalls ein System entwickelt werden, das eine ökologische Verbesserung zum klassischen Stahlbeton-Massivbau darstellt. Diese Hybridkonstruktion ist bislang jedoch weit weniger verbreitet als die Holz-Lehm-Bauweise und bedarf zusätzlicher Forschungsarbeit.

### 3.3.2 Wärmedämmstoffe

Wenngleich Lehm abhängig von seiner Zusammensetzung im Vergleich zu anderen massiven Baustoffen gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen kann, reichen die erzielbaren Werte in der Regel dennoch nicht aus, um die gesetzlich vorgeschriebenen Energiekennzahlen einhalten zu können. Außenbauteile aus Lehm müssen daher mit einer zusätzlichen Dämmschicht kombiniert werden.

Die Auswahl der derzeit am Markt verfügbaren Wärmedämmmaterialien ist sehr

75 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.162

groß, wobei nicht nur die Preise der unterschiedlichen Produkte, sondern auch ihre Eigenschaften stark variieren. Auch wenn Lehm ein mineralischer und chemisch neutraler Stoff ist, der im Wesentlichen nicht mit anderen Materialien reagiert, eignen sich aufgrund ihrer spezifischen Charakteristika nicht alle Wärmedämmstoffe in gleichem Maße für die Anwendung in Lehmbauteilen. Dämmmaterialien, die in Kombination mit Lehm verwendet werden, müssen beispielsweise ausreichend diffusionsoffen sein, um einen Feuchtigkeitsstau im Bauteil zu verhindern.

Ob ein Wärmedämmprodukt mit Lehm harmoniert, hängt also einerseits von den Eigenschaften des Dämmstoffs ab, andererseits aber auch vom Bauteilaufbau – insbesondere davon, ob das Bauteil außen, innen oder im Kern gedämmt werden soll.

Außendämmungen bieten in jedem Bauvorhaben den Vorteil, dass die gesamte Gebäudehülle von einer wärmedämmenden Schicht umkleidet ist, wodurch Wärmebrücken an gefährdeten Bauteilanschlüssen leicht überdämmt werden können. Zudem ist die Gefahr von auftretendem Kondensat im außen gedämmten Bauteil bei richtiger Ausführung meist sehr gering. Um diesen bauphysikalischen Vorteil langfristig nutzen zu können, müssen die eingesetzten Dämmstoffe jedoch ausreichend witterungsbeständig und feuchteunempfindlich sein. Da außen liegende Wärmedämmungen in der Regel verputzt oder mit Fassadenplatten verkleidet werden, bleiben Fehlstellen und dadurch entstehende bauphysikalische Schwachpunkte meist lange Zeit unentdeckt, weshalb die voraussichtliche Lebensdauer und Witterungsbeständigkeit der Dämmstoffe vorab genau geprüft werden muss.

Im Lehmbau bieten Außendämmungen den großen Vorteil, dass die Lehmschicht vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Dadurch wird verhindert, dass der Lehm durch Wassereinwirkung an Festigkeit verliert oder einzelne Bestandteile ausgewaschen werden.

Ein großes Problem außen liegender Dämmungen stellt allerdings das derzeit im Wiener Wohnbau häufig verwendete Wärmedämmverbundsystem dar. Dieses besteht aus einer Kombination aus Dämmstoff und Putzbeschichtung und ist vor allem aufgrund der kostengünstigen Ausführung und unkomplizierten Handhabung beliebt. Diesem Vorteil steht jedoch der große Nachteil entgegen, dass die einzelnen Schichten des Systems durch geklebte Verbindungen befestigt werden, was zur Folge hat, dass die Stoffe später kaum wieder voneinander gelöst werden können. Dies verhindert, dass die einzelnen Baumaterialien wiederverwendet oder getrennt entsorgt werden können und entspricht nicht dem ökologischen Baugedanken, der mit dem Bauen mit Lehm einhergeht.

Ein weiterer Nachteil der Außendämmung liegt oftmals in der Fassadengestaltung – bei Sanierungen wird beispielsweise die historische Fassade überdeckt, im Lehmbau verhindert eine außen liegende Dämmung die oft angestrebte Sichtbarkeit von Lehmoberflächen.

Innendämmungen beeinflussen die Fassade hingegen nicht und bieten zudem den Vorteil, dass die Räume schneller erwärmt werden können. Insbesondere in Kombination mit einer Wandheizung sind Innendämmungen vorteilhaft. Sie mindern den Wärmeverlust durch die außen liegende Tragstruktur und verbessern dadurch die Effizienz des Heizsystems.

Der Nachteil der Innendämmung liegt im Vergleich zur Außendämmung in der rechnerisch schlechteren Dämmwirkung und der erhöhten Gefahr von Wärmebrücken und anfallendem Bauteilkondensat. Dämmstoffe, die in Lehmbauteilen als Innendämmung eingesetzt werden, sollten daher kapillar leitfähig sein, um im Fall von Kondensat eine Konzentration des Tauwassers zu verhindern, da die kapillare Leitfähigkeit einen Transport der Flüssigkeit in Richtung der Verdunstungsflächen

ermöglicht. Zudem ist es von Vorteil, wenn das gewählte Dämmmaterial ausreichend sorptionsfähig ist, um durch die Einlagerung von Wasserdampf im Material die Kondensatmenge schon im Vorfeld der Sättigungsgrenze reduzieren zu können. Die Innendämmung muss außerdem kapillar-kontaktschlüssig ausgeführt werden, weshalb anpassungsfähige, formbare Dämmstoffe oder in Lehmörtel verklebbare Dämmplatten anderen Materialien vorzuziehen sind.<sup>76</sup>

Ein weiterer Nachteil der innen liegenden Wärmedämmung besteht darin, dass die positiven Lehmeigenschaften der Feuchteregulierung und Wärmespeicherkapazität ungenutzt bleiben. Wenngleich für die kurzfristige Aufnahme von Feuchtigkeit eine rund zwei Zentimeter dicke Lehmschicht ausreicht, was auch durch entsprechenden Lehminnenputz erreicht werden kann, bleibt durch eine innen liegende Dämmschicht dennoch die Langzeit-Speicherkapazität des dahinterliegenden Lehmbauteils ungenutzt, da die Schichtdicke des Lehmputzes hierfür nicht ausreicht. Für den Einsatz von Lehm als Wärmespeichermasse zeigt sich eine ähnliche Situation. Lehm eignet sich – besonders bei massiver Ausführung und hoher Rohdichte – sehr gut als Wärmespeicher, jedoch nur, wenn er in Kontakt mit der Energiequelle steht, was durch eine innen liegende Dämmung verhindert wird. Diese reduziert die Speicherkapazität der Wand ähnlich wie bei der Feuchteregulierung auf den innen liegenden Lehmputz, wodurch bis zu 80% des Wärmespeichervermögens des Lehmbauteils ungenutzt bleiben.<sup>77</sup>

Die Ausführung von Bauteilen mit Kerndämmung hat den Vorteil, dass sie ähnlich wie eine innen liegende Dämmung das Fassadenbild nicht beeinflusst und gleichzeitig – im Gegensatz zur Innendämmung – die Feuchteregulierung und Wärmespeicherkapazität des Lehms nicht zwingend behindert. Der Nachteil der Kerndämmung liegt jedoch darin, dass der Bauteilaufbau komplexer und in seiner Ausführung aufwändiger wird. Zudem stellt sich für Bauteile mit Kerndämmung ähnlich wie bei innen gedämmten Systemen das Problem der unterbrochenen Dämmschicht dar, was bauphysikalisch – insbesondere hinsichtlich der Gefahr von Kondensat – berücksichtigt werden muss.

Da das Angebot an Wärmedämmstoffen am Baumarkt sehr groß ist, können an dieser Stelle nicht alle verfügbaren und für den Lehmbau geeigneten Optionen näher beleuchtet werden. Daher werden im Folgenden nur einige Wärmedämmungen beschrieben, die aufgrund ihrer Eigenschaften besonders gut mit Lehm kombiniert werden können.

**Holzwohle-Leichtbauplatten** werden aus langfaseriger Holzwohle und einem mineralischen Bindemittel hergestellt – besonders verbreitet sind zement- oder magnesitgebundene Platten. Sie sind formstabil und im Vergleich zu anderen Dämmstoffen sehr fest, weshalb sie sich auch zur Beplankung im Trockenbau eignen. Die Platten können mit Lehm verputzt werden und sind zudem sehr diffusionsoffen, jedoch kaum kapillar leitfähig. Ihr Wärmedämmvermögen ist etwas geringer als das anderer Wärmedämmstoffe.

**Holzfaserdämmplatten** bestehen aus Holzfasern, die unter Hitze und Druck zu Platten gepresst werden. Die dem Holz eigenen Harze bilden hier das Bindemittel, weshalb der Dämmstoff ohne weitere Zusätze hergestellt werden kann und so besonders ökologisch ist, sofern auf eine Imprägnierung mit Bitumen verzichtet wird. Holzfaserdämmplatten können ebenfalls mit Lehm verputzt werden, sind diffusionsoffen, aber nur gering kapillar leitfähig.

76 vgl. ROEHLER / ZIEGERT 2010, S.110

77 vgl. BREUSS 2011, S.6

**Schilfrohrplatten** bestehen aus mit Draht zusammengehaltenen Schilfrohren und können ohne chemische Zusätze hergestellt werden. Aufgrund ihrer rauen Oberfläche können sie ohne Putzträger verputzt werden und sind auch für den Auftrag eines Lehmputzes geeignet. Durch die für einen Wärmedämmstoff hohe Rohdichte erzielen sie zudem einen guten sommerlichen Wärmeschutz. Schilfrohrplatten gelten als besonders ökologisch, da zur Herstellung nur sehr wenig Energie aufgewendet werden muss und die Platten kompostierbar sind. Sie sind zudem sehr diffusionsoffen und kapillar leitfähig, wodurch sich die Platten auch als Innendämmung eignen.<sup>78</sup>

**Calciumsilikat-Platten** werden aus aufgeschlammtem Kalk, Sand und ggf. bewehrenden Fasern unter Wasserdampf und hohem Druck zu Platten gepresst. Sie sind kapillar leitfähig sowie diffusionsoffen und werden aufgrund ihres hohen pH-Wertes besonders bei Sanierungen schimmelbefallener Bauteile eingesetzt. Aufgrund des großen Calcium-Anteils eignen sie sich außerdem sehr gut als Innendämmstoff unter Lehmputz.

**Mineralschaum-Dämmplatten** bestehen aus Quarzmehl, Kalkhydrat, Zement und einem Schaumbildner und werden im Autoklaven dampfgehärtet. Kalkgebundene Mineralschaumplatten sind diffusionsoffen und anders als Porenbetonplatten auch kapillaraktiv. Da die Platten nur geringe Festigkeiten aufweisen, können sie nicht ausschließlich mit Dübeln befestigt werden, sondern müssen im Mörtelbett verklebt werden.<sup>79</sup> Mineralschaum-Dämmplatten können dabei in Lehmörtel eingebettet und auch mit Lehm verputzt werden. Die Ökologie dieser Platten ist trotz einiger Umweltsiegel zu hinterfragen, da ihre Ausgangsstoffe unter hohem Energieaufwand hergestellt und unter weiterer Energieaufwendung zu einem Werkstoff verarbeitet werden. Einige Anbieter geben jedoch zumindest die Möglichkeit an, ihre Platten dem Produktionskreislauf wieder zuzuführen, anstatt sie zu deponieren.

**Strohdämmung** wird meist aus Roggen, Gerste, Weizen oder Hafer gewonnen und zu Ballen oder Platten gepresst. Stroh ist derzeit noch kein industrieller Baustoff, sondern fällt als Nebenprodukt der Landwirtschaft an. Es ist sehr diffusionsoffen sowie kapillar leitfähig und bietet zudem einen guten Schall- und sommerlichen Wärmeschutz. Das Wärmedämmvermögen von Stroh ist im Vergleich mit anderen Dämmstoffen allerdings etwas geringer. Strohdämmungen sind außerdem insektenanfällig und nur bedingt feuchteresistent – im Außenraum verbaute Produkte müssen daher ausreichend geschützt werden. Soll eine Strohdämmung verputzt werden, kann der Putz direkt in die Strohoberfläche eingearbeitet werden – Strohplatten können zudem unter Zugabe geeigneter Bindemittel so versteift werden, dass sie auch in einem Wärmedämmverbundsystem verarbeitet werden können. Wird auf derartige Zusätze verzichtet, kann die Strohdämmung zu den nachhaltigsten Dämmstoffen gezählt werden, da das Stroh selbst vollständig unschädlich und die Herstellungsenergie sehr gering ist. Zudem können Strohdämmungen kompostiert werden.

**Hanfdämmstoffe** bestehen hauptsächlich aus verfilzten Hanffasern, die zu Matten, Vliesen und Platten verarbeitet oder als lose Schüttdämmung eingesetzt werden. Elastische Hanfvliese enthalten zusätzlich natürliche oder synthetische Stützfasern oder natürliche Bindemittel wie Kartoffelstärke, zur Erhöhung des Brandschutzes kann dem Hanfdämmstoff außerdem Soda oder Borsalz zugesetzt werden. Hanfdämmungen weisen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, einen guten sommerlichen

78 vgl. ROEHLER / ZIEGERT 2010, S.127

79 vgl. ebenda, S.128

Wärmeschutz und Schallschutz sowie eine hohe mechanische Widerstandskraft auf. Sie sind außerdem diffusionsoffen, feuchteresistent und wenig anfällig für Schimmel, Schädlinge und Insekten. Da Hanf ein rasch nachwachsender Rohstoff ist und die Herstellung von Hanfwerkstoffen nur geringe Energiemengen benötigt, kann der Dämmstoff als sehr ökologisch angesehen werden. Vorteilhaft ist auch, dass Hanfpflanzen nur geringe Ansprüche an die Bodenqualität stellen und ohne Düngemittel oder Spritzmittel gezüchtet werden können. Da Hanfdämmungen ohne chemische Zusätze herstellbar sind, können sie leicht entsorgt und recycelt werden.

*Flachsdämmplatten* werden durch die mechanische Aufbereitung von Flachsstängeln hergestellt, indem kurze Flachsfasern zu Vliesen verarbeitet und mit Stärke als Klebstoff zu Dämmplatten verklebt werden. Durch Einarbeiten von Polyestergewebe kann die Stabilität, durch den Zusatz von Borsalzen der Brandschutz verbessert werden. Dämmplatten aus Flachs weisen gute Wärmedämmeigenschaften auf und sind diffusionsoffen sowie kapillaraktiv, weshalb sie sich auch als Innendämmung gut eignen. Da die Feuchteresistenz und der mechanische Widerstand von Flachsdämmungen eher gering sind, können sie hingegen kaum als Außendämmstoff eingesetzt werden. Flachsdämmstoffe gelten als sehr ökologisch, da sie fast ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen und mit geringem Energieaufwand herstellbar sind. Sie können ebenso wie Hanf- und Strohdämmungen bedenkenlos entsorgt werden.

*Zellulosedämmung* besteht im Wesentlichen aus verfilzten Zelluloseflocken, die aus Altpapier recycelt werden. Da diese leicht entflammbar sind, werden sie meist mit einem entsprechenden Flammschutzmittel behandelt. Zellulose wird hauptsächlich lose angeboten und daher vorrangig als Hohlraumdämmung eingesetzt. Die Herstellung von Dämmmatten aus Zellulose ist seltener und bedingt ein Vermischen der Zelluloseflocken mit entsprechenden Bindemitteln und stabilisierenden Fasern. Zellulosedämmungen sind sehr diffusionsoffen, allerdings auch relativ feuchteempfindlich, weshalb sie vor direktem Wasserkontakt geschützt werden müssen. Das Wärmedämmvermögen und die Wärmespeicherkapazität von Zellulose sind hingegen sehr gut. Dämmungen aus Zellulose zählen derzeit zu den nachhaltigsten Wärmeschutzbaustoffen, da sie hauptsächlich aus Recyclingmaterial bestehen.

*Mineralwolle* bildet den Überbegriff für die Dämmstoffe Steinwolle, deren Ausgangsstoffe verschiedene Gesteinsarten sind, und Glaswolle, die vorwiegend aus Altglas, Sand, Soda und Kalk besteht. Sie wird aus mineralischen Fasern, die durch das Einschmelzen der Ausgangsstoffe bei hohen Temperaturen und anschließendem Zerfasern entstehen, hergestellt. Unter Zugabe von Bindemitteln und Imprägnierungen werden die Fasern zu Vlies verarbeitet, verdichtet und ausgehärtet. Mineralwolle wird in Form weicher Matten, festgepresster Platten oder als loses Dämmmaterial angeboten und kann in nahezu allen Gebäudeteilen eingesetzt werden. Mineralfaserdämmstoffe sind nicht brennbar, wasserabweisend und besitzen sehr gute Dämm- und Schallschutzeigenschaften. Der Dämmstoff ist am Markt aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften heute sehr verbreitet, bringt aber dennoch einige Nachteile mit sich. Mineralwolle kann bei direktem Kontakt hautreizend sein, beim Schneiden des Dämmstoffs tritt zudem unangenehmer Staub auf. Wenngleich heute nur noch Mineralwolle angeboten wird, deren Staub nicht krebserregend ist, bedarf das Arbeiten mit dem Dämmstoff entsprechender Schutzkleidung wie Handschuhe und Atemschutzmaske. Auch der Energieaufwand in der Herstellung ist wesentlich

höher als bei Dämmstoffen wie Hanf oder Flachs, da die Fasern nur unter hohen Temperaturen gewonnen werden können, was sich negativ auf den ökologischen Fußabdruck des Materials auswirkt.

Alle der beschriebenen Dämmstoffe eignen sich für den Einsatz im Lehm- und erdigen Bauteilbau und erzielen je nach Schichtdicke einen ausreichenden Wärmeschutz. An welcher Position im Bauteil die unterschiedlichen Materialien eingesetzt werden können, erschließt sich aus ihren bauphysikalischen Eigenschaften und der jeweiligen Verarbeitungsform. Die nachstehenden Tabellen geben daher abschließend einen Überblick über die wichtigsten Kennwerte der Dämmstoffe sowie mögliche Einsatzgebiete.

Baustoff	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [J/(kgK)]	$\mu$ [-]
Holzwohle-Leichtbauplatte	330 - 500	0,093	2100	2 - 5
Holzfaser-Dämmplatte hart	110 - 270	0,040 - 0,052	2100	2 - 5
Holzfaser-Dämmplatte weich	40 - 60	0,038 - 0,041	2100	1 - 3
Schilfrohrplatte	190 - 225	0,055 - 0,065	1200	1 - 3
Calciumsilikat-Platte	200 - 800	0,053 - 0,070	1000	3 - 6
Mineralschaum-Dämmplatte	90 - 115	0,040 - 0,047	1300	2 - 5
Strohdämmung	90 - 120	0,038 - 0,052	2100 - 2000	1 - 2
Hanf	20 - 150	0,039 - 0,048	1300 - 2200	1 - 2
Flachs	20 - 80	0,040 - 0,045	1550 - 2300	1 - 2
Zellulose	30 - 60	0,039 - 0,045	1700 - 2200	1 - 2
Mineralwolle: - Glaswolle - Steinwolle	16 - 80 33 - 130	0,035 - 0,040 0,036 - 0,040	840 - 1000 840 - 1000	1 - 2 1 - 2
vgl.: Leichtlehm	300 - 1200	0,100 - 0,470	1000 - 1500	2 - 5
vgl.: Massivlehm	1200 - 2000	0,910 - 1,400	1000	5 - 10

Tabelle 35: Richtwerte einiger bauphysikalischer Eigenschaften unterschiedlicher Dämmstoffe

Baustoff	Innendämmung	Außendämmung	Kerndämmung
Holzwohle-Leichtbauplatte	X	X	
Holzfaser-Dämmplatte	X	X	X
Schilfrohrplatte	X	X	
Calciumsilikat-Platte	X	X	X
Mineralschaum-Dämmplatte	X	X	
Strohdämmung	X	X	
Hanf	X	X	X
Flachs	X		X
Zellulose	X		X
Mineralwolle	X	X	X

Tabelle 36: mögliche Einsatzgebiete einiger Dämmstoffe

Neben der technischen Abwägung, welcher Dämmstoff die für ein Bauteil gewünschten Eigenschaften aufweist und an welcher Position im Bauteilaufbau er am sinnvollsten einzusetzen ist, sollte auch eine ökologische Überlegung in die Entscheidung für ein bestimmtes Produkt miteinfließen.

Aufgrund des Materialursprungs und seiner Gewinnung, des unterschiedlich hohen Energieaufwands in der Herstellung sowie der Recyclingfähigkeit gibt es zwischen den verschiedenen Wärmedämmstoffen große Unterschiede im Rohstoff- und Energieverbrauch sowie der damit einhergehenden Luft- und Wasserverschmutzung.

Da wie bereits erläutert meist sämtliche Lehmbauteile der Gebäudehülle gedämmt werden müssen, kann dem gewählten Dämmstoff ein wesentlicher Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck eines Gebäudes zugeschrieben werden. Die folgende Tabelle gibt daher einen Überblick über die bedeutsamsten ökologischen Kennwerte der beschriebenen Wärmedämmungen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Indikatoren und ihrer Bedeutung erfolgt in [4.2 Ein ökologischer Vergleich](#).

Baustoff	PENRT [MJ/kg]	GWP Summe 100 [kg CO2 equ./kg]
Holzwole-Leichtbauplatte: - zementgebunden	3,82	-0,134
- magnesitgebunden	4,07	-0,133
Holzfaser-Dämmplatte	14,4	-0,804
Schilfrohrplatte	1,15	-1,590
Calciumsilikat-Platte	0,815	1,01
Mineralschaum-Dämmplatte	12,3	1,01
Strohämmung	0,801	-1,25
Hanf	12,5	-0,701
Flachs	31,5	0,218
Zellulose	7,18	-0,885
Mineralwolle: - Glaswolle	46,2	2,45
- Steinwolle	21,4	1,93
vgl.: Leichtlehm	2,94	-0,0296
vgl.: Massivlehm	0,38	0,0216

Tabelle 37: Öko-Indikatoren einiger Baustoffe<sup>80</sup>

### 3.3.3 Putzsysteme und Anstriche

Putzsysteme und Anstriche bilden die sichtbare Oberfläche von Bauteilen, schützen diese vor Beschädigung und sind Gestaltungsmittel. Besonders im Innenraum gewinnen Lehmprodukte zur Oberflächengestaltung aufgrund ihres positiven Einflusses auf das Raumklima immer mehr an Beliebtheit. Dennoch eignen sich nicht alle Bereiche eines Gebäudes für den Einsatz von Lehmputzen und -farben, weshalb an dieser Stelle einige andere, mit Lehm verträgliche Systeme vorgestellt werden. Dabei werden nur Materialien beschrieben, die direkt auf Lehm aufgetragen werden können – Bauteile, deren Putzmörtel oder Anstriche nicht direkt mit Lehm in Kontakt stehen, können auch mit anderen Baustoffen verputzt und angestrichen werden.

**Kalkputz** eignet sich für die Anwendung auf Lehmbauteilen im Innen- und Außenraum, da seine Wetterbeständigkeit höher ist als jene von Lehmputz. Nachdem Kalkputz nur mechanisch an der Lehmoberfläche hält, muss diese stark aufgeraut oder mit einem Putzträger bekleidet werden, um eine ausreichende Haftung zu erzielen. Kalkputz ist zudem relativ starr und kann daher die Bewegungen des Lehmbauteils kaum aufnehmen – eine dünne Lehmputzschicht zwischen Lehmwand und Kalkputz kann dies aufgrund ihrer Elastizität aber ausgleichen.<sup>81</sup>

Kalkputze sind diffusionsoffen und können ähnlich wie Lehmputze feuchteregulierend wirken. Zudem sind sie aufgrund ihrer Alkalität resistent gegen Schimmel, können verfließt werden und eignen sich für die Anwendung im Außenbereich. Allerdings können sie nicht ohne entsprechende Schutzkleidung verarbeitet werden, da sie

<sup>80</sup> Die angegebenen Werte können je nach Hersteller und Rohdichte des Produkts variieren und stammen aus der Datenbank Baubook.

<sup>81</sup> vgl. BRUCKNER / SCHNEIDER / SCHWIMANN 1996, S.37

bei direktem Kontakt Hautreizungen hervorrufen. Ökologisch betrachtet ist reiner Kalkputz weitgehend unbedenklich, da er nach dem Aushärten chemisch gesehen im Wesentlichen wieder als Kalkstein betrachtet werden kann. Da Kalkputz keine chemische Verbindung mit Lehm eingeht, sondern nur mechanisch an ihm haftet, kann er leicht davon gelöst und dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden. Kalkputz wird ökologisch erst zu einem Problem, wenn ihm andere Stoffe beigemischt werden, die nicht wieder aus ihm gelöst werden können.

**Kalk-Zement-Putz** besteht im Wesentlichen aus Kalk, Zement sowie Sand und zählt heute zu den am meisten verarbeiteten Putz-Produkten im Innen- und Außenraum. Er ist bedingt diffusionsoffen und schwach saugend. Durch den Zementanteil weist Kalk-Zement-Putz eine höhere Druck- und Abriebfestigkeit auf als reiner Kalk- oder Lehmputz. Da er sehr spröde ist, eignet er sich jedoch nicht als einzige, dicke Putzschicht auf Lehm, eine Anwendung als Feinputz auf darunterliegendem Kalkputz ist hingegen möglich. Alternativ kann Kalk-Zement-Putz mit entsprechendem Putzträger direkt auf Lehmbauteilen aufgebracht werden.

Wenngleich dieser Putz eine hohe Widerstandsfähigkeit aufweist und ein breites Einsatzgebiet ermöglicht, verursacht er bei der Verarbeitung wie Kalkputz Hautreizungen sowie Reizungen der Atemwege. Hinzu kommt, dass die Bestandteile Kalk und Zement nicht wieder voneinander getrennt werden können und kaum Möglichkeiten bestehen, den Putz neu aufzubereiten und wiederzuverwenden. Auch in der benötigten Energie zur Herstellung erweist sich Kalk-Zement-Putz als wesentlich umweltbelastender als beispielsweise Lehmputz.

**Anstriche** auf Lehmbauteilen sollten möglichst wenig schichtbildend sein, da es sonst zu großflächigen Ablösungen kommen kann. Zudem sind derartige Anstriche meist kaum diffusionsoffen und wirken so der natürlichen Feuchteregulierung des Lehms entgegen. Auch die Bindemittelkonzentration muss geringgehalten werden, um Oberflächenspannungen und daraus folgende Risse zu vermeiden.<sup>82</sup>

### 3.3.4 Trennlagen und Abdichtungen

Abhängig vom Bauvorhaben und den gegebenen Bedingungen kann es bei Lehmbauteilen wie bei anderen Baustoffen notwendig sein, diese durch Abdichtungen beispielsweise vor aufsteigender Feuchtigkeit oder Spritzwasser in Nassräumen zu schützen. Allgemein sind dabei keine Unverträglichkeiten zwischen Lehmbaustoffen und handelsüblichen Dampfbremsen und -sperrern bekannt. Im Sockelbereich ist bei direktem Kontakt zwischen Abdichtung und Lehmwand aber besonders darauf zu achten, dass kein Wasser am Fußpunkt der Wand eindringen kann, da dieses sonst die Lehmwand aufweicht. Es empfiehlt sich, zwischen abdichtender Folie und Lehmwand eine zusätzliche wasserfeste Schicht aus Steinen oder Beton einzuziehen, um die Lehmwand im Sockelbereich besser zu schützen.

Abgesehen von Detailpunkten, an denen Lehm vor dem Eindringen flüssigen Wassers geschützt werden muss, sollte ein Einsatz von dampfdichten Sperrschichten im Lehm-bau generell möglichst vermieden werden, da diese der Diffusionsoffenheit des Lehms entgegenstehen. Vielmehr empfiehlt es sich, Lehm mit Stoffen zu kombinieren, die Feuchtigkeit in ähnlich gutem Maße transportieren können wie dieser.

82 vgl. ROEHLER / ZIEGERT 2010, S.79

### 3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten

Obwohl der Baustoff Lehm auf eine lange Bautradition zurückblickt und in weiten Teilen der Welt Anwendung findet, gibt es anders als bei anderen Bauweisen kaum allgemein gültige Standard-Aufbauten, die den heutigen statischen und bauphysikalischen Anforderungen an Gebäude entsprechen. Dies liegt mitunter daran, dass das Bauen mit Lehm häufig in Selbstbauweise erfolgt und sich auf kleine Bauvorhaben beschränkt. Insbesondere in der westlichen Welt wurde der Baustoff zudem im Zuge der Industrialisierung von anderen Materialien wie Beton, Ziegel und Stahl verdrängt, wodurch viel Wissen über das Bauen mit Lehm verloren gegangen ist. Wenngleich das wachsende Bewusstsein über die Notwendigkeit nachhaltiger Architektur seit den 1970er-Jahren zu einem gesteigerten Interesse an der Lehmbauweise führt, ist der Baustoff trotzdem noch nicht ausreichend etabliert, um anhand einer Vielzahl von Beispielen gängige Ausführungsvarianten abzuleiten.

Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel Bauteilaufbauten mit unterschiedlich hohem Lehmanteil entwickelt, die auf dem Grundlagenwissen der vorangegangenen Analyse basieren. Zusätzlich werden gebaute Beispiele aus dem Einfamilienhausbau sowie Bauteilvorschläge aus den wichtigsten Lehmbauwerken als Basis für diese Entwicklung herangezogen. Diese Bauteilbeispiele können jedoch nicht direkt übernommen werden, da sie sich hauptsächlich auf kleine Bauvorhaben mit geringeren Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz beziehen und auch das Traggerüst nicht für die im mehrgeschossigen Wohnbau üblichen Lasten dimensioniert ist.

Die von der Autorin hier entwickelten Aufbauten stellen daher keine tatsächlich realisierten Bauteile dar, sondern zeigen eine mögliche Ausführung von Lehmbauteilen im Kontext des urbanen Bauens.

Um bei der Analyse der entwickelten Bauteile dennoch möglichst realitätsnah vorzugehen, werden für die meisten Bauteilschichten konkrete Bauprodukte herangezogen. Die angegebenen Kennwerte des jeweiligen Materials beruhen daher größtenteils auf den Herstellerangaben der gewählten Produkte. Vereinzelt werden zusätzlich allgemeine Baustoffkennwerte hinzugezogen, sofern entsprechende Werte der Hersteller fehlen. Für einige Bauteilschichten muss zudem gänzlich auf allgemeine Baustoffkennwerte zurückgegriffen werden, da keine ausreichende Anzahl von Herstellerangaben ermittelt werden kann.

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Bauprodukte:

<i>Lehm</i> baustoffe		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Stampflehm, tragend	Claytec e.K.	Stampflehm natur
Lehmstein schwer, tragend	Claytec e.K.	Lehmstein schwer NF1800
Leichtlehmstein	Conluto	Leichtlehmstein NF800
Lehm-Ausbauplatte schwer	Claytec e.K.	Lehmix Lehmplatte schwer D16/ D22
Lehm-Trockenputzplatte	Claytec e.K.	Lehmtrockenputzplatte
Lehmputz	Claytec e.K.	Lehmputz Mineral 16
Leichtlehm-Schüttung	Claytec e.K.	Lehm-Holz-Trockenschüttung leicht
Lehmschüttung schwer	Conluto	Lehm-Deckenschüttung
Lehmestrich <sup>1</sup>	Stoffwertkatalog IB Rauch	Lehmestrich

<i>Holz- und Holzwerkstoffe</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Fichtenholz <sup>1</sup>	BAUBOOK	Nutzholz 425 rauh luftgetrocknet
Brettstapelelement <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Massivholz verleimt
Spanplatte, kunstharzgebunden <sup>1</sup>	Stoffwertkatalog IB Rauch	Spanplatte, khg. (Verkleidung)
Holzfaserplatte	FunderMax GmbH	FunderPlan Holzfaserplatte
<i>Dämmstoffe</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Holzfaserdämmplatte	Steico SE	Steico Isorel Standard Holzfaserplatte
Holzfaserplatte TSD	Steico SE	Steico Therm SD 3cm
Schilfdämmplatte	Sand & Lehm Andreas Zöchbauer GmbH	Schilfdämmplatte
Hanf dämmplatte Außenwand	Capatec Baustoffindustrie GmbH	Hanf Wall Fassadendämmplatte
Hanf-Hohlraumdämmung	Saint-Gobain Isover Austria GmbH	Thermohanf-Platte Premium
Zellulosefaser	Isocell GmbH & Co KG	Zellulose Einblasdämmung
Glaswolle-Akustikplatte	Saint-Gobain Isover Austria GmbH	Akustic SSP 1
XPS-Dämmplatte	Austrotherm GmbH	XPS Top30SF
Schaumglasdämmplatte	Glapor	Glapor PG600
<i>Beplankung, Oberflächenabschluss</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Kalkputz	Weber Saint-Gobain	Webercal 172
Schilfrohwergewebe Putzträger	Conluto	Schilfrohwergewebe
Parkettboden <sup>1</sup>	BAUBOOK	Massivparkett
Betondachstein <sup>1</sup>	BAUBOOK	Bramac Classic PP
Blecheindeckung <sup>1</sup>	BAUBOOK	Rheinzink Stehlfalzdach
Kies <sup>1</sup>	Stoffwertkatalog IB Rauch	Kies (Schüttstoff)
<i>Folien, Trennlagen</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Filtervlies PP <sup>1</sup>	BAUBOOK	Vlies PP
Bitumenbahn <sup>1</sup>	BAUBOOK	Sopro Thene Bitumenabdichtungsbahn
Rieselschutzpapier	Ampack	Sisalex 30 Rieselschutz Cellulose
Unterdeckbahn PE	Würth Handelsges.m.b.H.	WÜTOP Thermo ERS
<i>Schüttungen</i>		
Material	Referenz	
	Quelle / Firma	Produktname
Splittschüttung l.z.g. <sup>1</sup>	IBO	Splittschüttung leicht zementgebunden
Schüttung lose <sup>1</sup>	DATAHOLZ	Schüttung lose

*1 Baustoffkennwerte entsprechen Richtwerten gemäß Datenbank*

*Tabelle 38: Bauprodukte und Hersteller*

Im Folgenden werden die mit den oben genannten Produkten entwickelten Bauteilaufbauten vorgestellt und auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften untersucht. Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt dabei durch die Software

Archiphysik<sup>83</sup>, wobei für die Stahlbeton- und Holz-Lehm-Bauteile wie in [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) Annahmen hinsichtlich der Stützenquerschnitte und Achsabstände getroffen werden.

Bauteilkategorie	Querschnitt [m]	Achsabstand [m]
Außenwand, Holzskelett	0,12 x 0,24	2,00
Außenwand, STB-Skelett	0,20 x 0,20	2,00
Wohnungstrennwand	0,08 x 0,10	2,00
Geschossdecke, Balken	0,10 x 0,20	2,00
Geschossdecke, Lattung	0,024 x 0,048	1,00
Steildach, Dachbalken	0,12 x 0,24	2,00
Steildach, Lattung	0,05 x 0,08	1,00
Flachdach, Balken	0,12 x 0,24	2,00
Flachdach, Lattung	0,05 x 0,08	1,00

Tabelle 39: gewählte Achsabstände und Querschnitte

Zusätzlich zum U-Wert werden die Bauteile mittels Glaser-Verfahren darauf untersucht, ob die Gefahr von anfallendem Kondensat besteht. Es muss an dieser Stelle allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Tauwasserberechnung nach Glaser nur die Schichtdicken der einzelnen Materialien sowie deren Wasserdampfdiffusionswiderstand berücksichtigt. Lehm hat aufgrund seiner Diffusionsoffenheit und Kapillaraktivität das Potential, Feuchtigkeit aus seiner unmittelbaren Umgebung aufzunehmen und somit Bauteilschäden durch Kondensat vorzubeugen. Da das Glaser-Verfahren dies nicht miteinbezieht und wie die meisten Berechnungen nur eine Annäherung an die Realität darstellt, ist ein mit dieser Methode ermittelter Tauwasseranfall nicht automatisch mit einem fehlerhaften Bauteil gleichzusetzen, sofern die Bauteilschicht, in der Kondensat anfällt, dieses aufnehmen und ableiten kann.

Neben dem Wärmedämmvermögen und möglichem Tauwasseranfall wird auch das Schallschutzpotential der Bauteile untersucht. Das Schalldämmvermögen der vorgestellten Lehmaufbauten kann allerdings nur teilweise rechnerisch ermittelt werden und beruht für einige Ausführungsvarianten auf Schätzungen.

Für Aufbauten, die inhomogene Bauteilschichten<sup>84</sup> aufweisen, existiert derzeit kein ausreichend genaues Berechnungsverfahren des bewerteten Schalldämmmaßes, weshalb derartige Bauteile aktuell durch Messungen im Labor oder auf der Baustelle beurteilt werden. Da dies im Zuge dieser Diplomarbeit nicht möglich ist, werden für die entsprechenden Bauteile in Absprache mit *Prok. DI Paul Track*<sup>85</sup> vereinfachte Berechnungsverfahren und Referenzbeispiele zur Beurteilung des Schalldämmvermögens herangezogen.

Als solche dienen hierfür vor allem Beispiele aus dem Holzbau, die in ihrem Aufbau häufig eine gewisse Ähnlichkeit zu den gezeigten Holz-Lehm-Bauteilen aufweisen und meist von der Datenbank *Dataholz*<sup>86</sup> stammen. Diese stellt eine Vielzahl von Holzbauteilen zur Verfügung, deren Wärme- und Schallschutz durch verschiedene Prüfstellen nachgewiesen oder zumindest theoretisch bewertet wurden. Die auf diese Weise ermittelten Werte stellen keine exakt berechneten Schallschutzkennwerte dar, sondern bilden lediglich eine Annäherung, mit der überprüft wird, ob der gesetzlich vorgeschriebene Schallschutz voraussichtlich eingehalten wird.

83 A-NULL Development GmbH: Archiphysik - Software für bauphysikalische Berechnungen

84 *Als inhomogene Bauteilschicht wird ein Aufbau bezeichnet, bei dem verschiedene Materialien innerhalb einer Ebene vorliegen (z.B. Holzstützen mit dazwischenliegender Dämmschicht)*

85 Prok. DI Paul Track, Abteilungsleitung Bauphysik, RWT Plus, Woschitz Group

86 DATAHOLZ: *Katalog bauphysikalischer und ökologisch geprüfter Holzbauteile*

### 3.4.1 Außenwandsysteme

Die Außenwände eines Gebäudes müssen eine Vielzahl von Funktionen erfüllen. Sie stellen in der Regel das tragende Gerüst des Bauwerks – entweder als vollflächiges Element oder als ausgefachte Skelettkonstruktion – dar, regulieren den Wärmestrom zwischen Innen- und Außenraum, schützen vor Straßenlärm und prägen zudem durch ihre Fassade das Stadtbild.

Wie bereits in [3.2.1 Lehm als Tragstruktur](#) angeführt, ist die Ausführung von tragenden Lehmbaustoffen aufgrund der geringen Festigkeit des Materials schwierig. Gebaute Beispiele beschränken sich im österreichischen Raum meist auf maximal zwei Geschosse. Bereits hier beträgt die Schichtstärke des tragenden Lehms durchschnittlich 45cm. Referenzen aus dem Jemen, in denen bis zu sechs Geschosse aus tragenden Lehmbaustoffen realisiert wurden, weisen eine Bauteildicke von 1m bis 1,50m in den unteren Geschossen auf. Diese Geschossanzahl entspricht auch der durchschnittlichen Gebäudehöhe im Wiener Wohnungsneubau, weshalb für die nachfolgenden Beispielaufbauten ebenfalls derartige Schichtstärken angenommen werden.

Trotz dieser, aus statischer Sicht notwendigen, hohen Bauteilstärken erreichen die im Folgenden gezeigten Aufbauten ohne zusätzlichen Wärmedämmstoff nicht den gesetzlich geforderten Wärmeschutz für Außenwände. Um einen ausreichend niedrigen U-Wert zu erhalten, werden die Bauteile daher mit Dämmstoffen versehen, die sich in [3.3.2 Wärmedämmstoffe](#) als geeignet herausgestellt haben. Da der Hauptfokus dieser Arbeit auf der Eignung von Lehm im Wohnungsbau liegt, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, jeden der vorab angeführten Dämmstoffe in die Bauteilaufbauten einzugliedern. Zur besseren Vergleichbarkeit der Aufbauten werden exemplarisch einige Dämmstoffe herangezogen und in allen Bauteilen angewendet. Für ausgewählte Beispiele werden zusätzlich zwei verschiedene Wärmedämmungen in den gleichen Aufbau integriert, um abzuschätzen, wie stark die Wahl des Dämmstoffes die bauphysikalische Gesamtleistung des Bauteils beeinflusst.

Neben statischen und bauphysikalischen Aspekten ist bei der Entwicklung der nachfolgend gezeigten Außenwandsysteme auch der äußere Oberflächenabschluss von Bedeutung. Der Einsatz von Lehm im Außenbereich ist aufgrund der geringen Witterungsbeständigkeit des Baustoffes mit gewissen Schwierigkeiten verbunden. Die Wiener Bauordnung legt in diesem Zusammenhang Folgendes fest:

*„Bauteile müssen aus entsprechend widerstandsfähigen Baustoffen hergestellt oder gegen schädigende Einwirkungen (zB Umweltschadstoffe, Witterungseinflüsse, Erschütterungen oder korrosive Einwirkungen) geschützt sein, wenn sie solchen Einwirkungen ausgesetzt sind.“<sup>87</sup>*

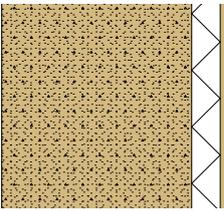
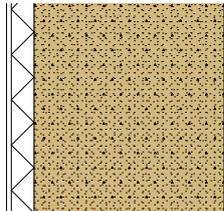
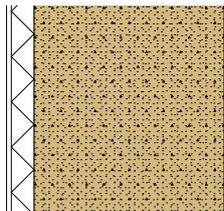
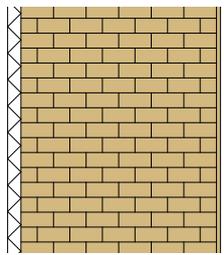
*„Dacheindeckungen, Außenwände, Außenfenster und -türen sowie sonstige Außenbauteile müssen Schutz gegen Niederschlagswässer bieten.“<sup>88</sup>*

87 §88 Abs 3 wr BauO LGBl 11/1930 idF LGBl 71/2018

88 §102 Abs 2 wr BauO LGBl 11/1930 idF LGBl 71/2018

Diese Festlegung impliziert, dass die in Außenbauteilen eingesetzten Baustoffe unter anderem eine ausreichende Witterungsbeständigkeit aufweisen müssen, um keine Schäden durch Schlagregen oder Frosteinwirkung zu erleiden. Wenngleich gebaute Beispiele zeigen, dass Lehmbauteile bei einer ausreichenden Erosionsberechnung auch im bewitterten Außenraum eine lange Lebensdauer aufweisen können, stellt sich dennoch die Frage, ob Fassaden aus Lehm in Wien bei geplanter Erosion als witterungsbeständig angesehen und somit genehmigt würden. Neben dieser technischen Unsicherheit ist weiters zu überlegen, inwieweit Lehmfassaden das Stadtbild verändern und aus diesem Grund abgelehnt würden.

Aufgrund fehlender Forschung und Beispiele auf diesem Gebiet, wird für die in dieser Arbeit gezeigten Aufbauten großteils auf eine sichtbare Lehmoberfläche im Außenraum verzichtet, da sich der Genehmigungsprozess vermutlich als weitaus schwieriger erweisen würde als bei herkömmlichen Putzfassaden. Es wird an dieser Stelle dennoch darauf hingewiesen, dass die Ausführung solcher Lehmfassaden bei richtiger Planung und Ausführung ohne große Schwierigkeiten möglich ist.

	<i>L_AW1: Stampflehmwand, Innendämmung</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Stampflehm	1,000	2300	1,500	10
	Schilfdämmplatte	0,150	190	0,056	1
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,180</b>				
	<i>L_AW2-1: Stampflehmwand, Schilfdämmung</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Schilfdämmplatte	0,120	190	0,056	1
	Stampflehm	1,000	2300	1,500	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				
	<i>L_AW2-2: Stampflehmwand, Holzfaserdämmung</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Holzfaserdämmplatte	0,120	230	0,050	5
	Stampflehm	1,000	2300	1,500	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				
	<i>L_AW3-1: Lehmsteinmauerwerk, Schilfdämmung</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Schilfdämmplatte	0,100	190	0,056	1
	Lehmstein schwer	1,500	1800	1,100	10
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>				

<i>L_AW3-2: Lehmsteinmauerwerk, Holzfaserdämmung</i>				
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
Holzfaserdämmplatte	0,100	230	0,050	5
Lehmstein schwer	1,500	1800	1,100	10
Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>			

*Bauteilliste 10: Außenwandsysteme aus Lehm*

Die gezeigten Aufbauten L\_AW1 bis L\_AW3 weisen jeweils eine Gesamt-Bauteildicke von 1,145m bis 1,655m auf und sind somit etwa zwei- bis dreimal so stark wie herkömmliche Systeme. Wenngleich die Schichtstärke der tragenden Lehmstruktur in den oberen Geschossen geringer ausgeführt werden kann, da sich der Lasteintrag auf die Konstruktion verringert, können diese Bauteilvarianten dennoch nicht wirtschaftlich umgesetzt werden. Einen weiteren Nachteil der gezeigten Lehmbauteile stellt im Vergleich zu Aufbauten aus Beton oder Ziegel der wesentlich höhere Materialverbrauch dar, der im Sinne einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Bauweise nicht erstrebenswert ist.

Des Weiteren muss insbesondere bei den Bauteilvarianten L\_AW1 und L\_AW2 der Herstellungsprozess der tragenden Lehmstruktur genau überlegt werden. Eine Herstellung vor Ort ist kosten- sowie zeitintensiv und aufgrund des Stampfvorgangs mit großen Erschütterungen und hoher Lärmbelastung verbunden. Zudem werden durch das Stampfen und die hierfür benötigten Geräte große zusätzliche Lasten auf die darunterliegenden Bauteile ausgeübt, was statisch entsprechend berücksichtigt werden muss. Eine Vorfertigung der Bauteile im Werk bedeutet bei den hier benötigten Bauteildicken wiederum ein Zusammensetzen des Bauteils aus mehreren Lehmwänden, da derzeit keine ausreichend starken Elemente am Markt verfügbar sind.

Es erscheint aus diesen Gründen sinnvoll, Lehm nicht tragend einzusetzen, sondern mit einem anderen Baustoff zu kombinieren, der diese Funktion besser erfüllen kann. Die folgenden Aufbauten zeigen Ausführungsvarianten, in denen Lehm vorrangig als ausfachende Masse eingesetzt wird, während die tragende Funktion von einem Holz- oder Stahlbetonskelett erfüllt wird. Von Aufbauten mit Tragwerken aus anderen Baustoffen wurde aus den in [3.3.1 Tragende Baustoffe](#) genannten Gründen verzichtet.

<i>L_AW4: Holzständerwand, Lehmsteinausfachung</i>				
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
Hanfdämmplatte AW	0,080	100	0,042	3,9
Leichtlehmstein zw.	0,240	800	0,250	10
TW Fichtenholz	0,240	425	0,110	50
Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,375</b>			

	<i>L_AW5-1: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Schilfdämmung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Schilfdämmplatte	0,035	190	0,056	1
	Schilfdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240	190	0,056	1
	Lehmstein schwer	0,240	425	0,110	50
	Lehmputz	0,115	1800	1,100	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>			
	<i>L_AW5-2: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Holzfaserdämmung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Holzfaserdämmplatte	0,035	230	0,050	5
	Holzfaserdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240	230	0,050	5
	Lehmstein schwer	0,240	425	0,110	50
	Lehmputz	0,115	1800	1,100	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>			
	<i>L_AW6: Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Hanfdämmplatte AW	0,020	100	0,042	3,9
	Hanfdämmplatte AW zwischen TW Fichtenholz	0,240	100	0,042	3,9
	Lehmplatte TP	0,240	425	0,110	50
	Lehmputz	0,016	700	0,130	18
	<b>Gesamt</b>	<b>0,321</b>			
	<i>L_AW7: Stahlbetonskelett, Stampflehm-Ausfachung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Holzfaserdämmplatte	0,200	230	0,050	5
	Stampflehm zwischen Stahlbetonstützen	0,200	2300	1,500	10
	Lehmplatte TP	0,200	2400	2,300	100
	Lehmputz	0,016	700	0,130	18
	<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>			
	<i>L_AW8: Stahlbetonskelett, Leichtlehmstein-Ausfachung</i>				
	Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kalkputz	0,025	1300	0,830	10
	Holzfaserdämmplatte	0,200	230	0,050	5
	Leichtlehmsteine zwischen Stahlbetonstützen	0,200	800	0,250	10
	Lehmplatte TP	0,200	2400	2,300	100
	Lehmputz	0,016	700	0,130	18
	<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>			

Bauteilliste 11: Außenwandsysteme aus Lehm

Die gezeigten Aufbauten L\_AW4 bis L\_AW6 bestehen jeweils aus einem tragenden Holzskelett, während die Bauteile L\_AW7 und L\_AW8 eine Tragstruktur aus Stahlbetonstützen aufweisen. Die Holz-Lehm-Aufbauten erreichen Bauteildicken von 0,321m bis 0,445m und sind somit zum Teil etwas schlanker als die 0,446m starken Stahlbeton-Lehm-Hybride.

Das Bauteil L\_AW4 zeigt eine Ausführungsvariante mit Leichtlehmsteinen in der Ebene des Tragskeletts. Diese weisen eine höhere Masse auf als Wärmedämmstoffe, die im klassischen Holzbau an dieser Stelle angeordnet werden, was sich positiv auf die Speichermasse des Bauteils auswirkt. Wenngleich Leichtlehmsteine nicht das Speicherpotential von massiven Lehmbaumaterialien erreichen, verbessern sie im Vergleich zu konventionellen Holzaufbauten dennoch das Wärmespeicher- und Schalldämmvermögen des Bauteils. Durch die Wahl von Leichtlehmsteinen, die im Vergleich zu anderen Massivbaumaterialien sehr gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen, kann zudem die Schichtstärke des Dämmstoffs um etwa die Hälfte der heute üblichen Ausführungsstärken reduziert werden.

Das System L\_AW5 wird ebenfalls mit Lehmsteinen ausgeführt, allerdings werden diese an der Rauminnenseite statt in der Ebene der Tragstruktur angeordnet. Aufgrund der schlechteren Wärmedämmeigenschaften schwerer Lehmsteine im Vergleich zu Leichtlehmsteinen benötigt dieser Aufbau einen höheren Anteil an Wärmedämmstoffen, was bei einer Anordnung der Lehmsteine im Bereich des Holzskeletts zu einer größeren Bauteildicke führen würde. Der Vorteil dieses Bauteilaufbaus liegt in der für Holzbauteile hohen flächenbezogenen Masse, die eine gute Wärmespeicherung und Schalldämmung ermöglicht.

Das Bauteil L\_AW6 zeigt einen nahezu klassischen Holzbau mit sehr geringem Lehmanteil, der sich auf ein raumseitiges Lehmputzsystem beschränkt. Dieses verbessert zwar im Vergleich zu konventionellen Putzsystemen das Raumklima etwas, erzielt jedoch anders als die vorangegangenen Beispiele keine wesentlichen Verbesserungen hinsichtlich der Wärmespeicherung und -dämmung oder im Bereich des Schallschutzes. Positiv zu bewerten ist hingegen, dass die Ausführung von 2cm Lehmputz zur Herstellung der winddichten Ebene genügt und so auf - in ihrer Ausführung oft fehleranfällige - windabdichtende Folien verzichtet werden kann.

Die Aufbauten L\_AW7 und L\_AW8 bestehen aus einem tragenden Stahlbetonskelett mit einer Ausfachung aus Lehmbaumaterialien. Der Raumabschluss wird in der Außenwand L\_AW7 durch vorgefertigte Stampflehmelemente hergestellt, die eine ähnliche Rohdichte aufweisen wie die Tragstruktur, jedoch bessere Wärmedämm- und Schallschutzeigenschaften haben als diese.

Für das Bauteil L\_AW8 werden Leichtlehmsteine als ausfachendes Material eingesetzt. Diese sind deutlich leichter als Stampflehm und verfügen daher über eine nochmals geringere Wärmeleitfähigkeit, wodurch der U-Wert dieser Außenwand im Vergleich zum Bauteil L\_AW7 bei gleich dicker Wärmedämmung deutlich reduziert wird.

In der nachstehenden Tabelle sind die Wärmedurchgangskoeffizienten der zuvor gezeigten Bauteilaufbauten ausgewiesen. Zusätzlich werden für die Massivlehmteile L\_AW1 bis L\_AW3 die U-Werte angegeben, die die Bauteile ohne zusätzliche Wärmedämmung erzielen würden.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m²K)]		
	vorhanden		max. zulässig
L_AW1, Schilfdämmung	0,282	<	0,350
L_AW1, ohne Dämmung	1,157	>	
L_AW2, Schilfdämmung	0,332	<	
L_AW2, Holzfaserdämmung	0,306	<	
L_AW2, ohne Dämmung	1,153	>	
L_AW3, Schilfdämmung	0,296	<	
L_AW3, Holzfaserdämmung	0,278	<	
L_AW3, ohne Dämmung	0,629	>	
L_AW4, Hanfdämmung / LL-LST	0,319	<	
L_AW5, Schilfdämmung	0,199	<	
L_AW5, Holzfaserdämmung	0,181	<	
L_AW6, Hanfdämmung	0,165	<	
L_AW7, Holzfaserdämmung	0,224	<	
L_AW8, Holzfaserdämmung	0,204	<	

Tabelle 40: U-Werte der Außenwandsysteme

Wie die Tabelle zeigt, genügen alle der vorgestellten Bauteilaufbauten bei einer Ausführung mit Wärmedämmung dem geforderten U-Wert für die Kategorie „Wände gegen Außenluft“ (vgl. [1.1.2 Wärmetechnische Grenzwerte](#)). Ohne Dämmstoffe können die Lehmteile jedoch keinen ausreichenden Wärmeschutz erzielen.

Anders als die Erfüllung des Wärmeschutzes kann der Nachweis des Schallschutzes nicht für alle Bauteile ausreichend exakt berechnet werden. Die nachstehende Tabelle gibt dennoch einen Überblick über das voraussichtlich erzielbare bewertete Schalldämm-Maß der gezeigten Aufbauten.

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
L_AW1, Schilfdämmung	66	>	43
L_AW2, Schilfdämmung	66	>	
L_AW2, Holzfaserdämmung	66	>	
L_AW3, Schilfdämmung	66	>	
L_AW3, Holzfaserdämmung	66	>	
L_AW4, Hanfdämmung / LL-LST	54 <sup>1</sup>	>	
L_AW5, Schilfdämmung	57 <sup>1</sup>	>	
L_AW5, Holzfaserdämmung	57 <sup>1</sup>	>	
L_AW6, Hanfdämmung	51 <sup>2</sup>	>	
L_AW7, Holzfaserdämmung	63 <sup>1</sup>	>	
L_AW8, Holzfaserdämmung	52 <sup>1</sup>	>	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

Tabelle 41: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Außenwandsysteme

Das angeführte Schalldämm-Maß der massiven Lehmteile L\_AW1 bis L\_AW3 resultiert aus den gängigen Berechnungsmethoden nach dem Masse-Gesetz. Da die flächenbezogene Masse der Aufbauten den normativ festgelegten Maximalwert übersteigt, wird das bewertete Schalldämm-Maß mit  $m'_{\max} = 700\text{kg/m}^2$  ermittelt.

Für die Bauteile L\_AW4 bis L\_AW6, die inhomogene Bauteilschichten aufweisen und somit nicht mit den bewährten Verfahren berechenbar sind, muss anders als bei den Außenwänden 1 bis 3 auf Abschätzungen verwiesen werden.

Da die Bauteile L\_AW4 und L\_AW5 einen hohen Lehmanteil mit großer Masse aufweisen, erfolgt eine vereinfachte Schallberechnung. Dabei wird die Lehmschicht als einschalig wirkendes Massivbauteil angesehen und die außen liegende Dämmschicht als Vorsatzschale betrachtet. Aufgrund des geringen Holzanteils in Kombination mit der hohen Masse des Bauteils wird die Holzkonstruktion nicht in die Berechnung miteinbezogen, sondern es wird von homogenen Bauteilschichten ausgegangen. Da die auf diese Weise ermittelten Werte für  $R_w$  11dB bzw. 14dB über dem gesetzlich festgelegten Minimum liegen, kann von einem ausreichenden Schalldämmvermögen dieser Bauteile ausgegangen werden.

Das Bauteil L\_AW6 weist nur einen sehr geringen Lehmanteil und zudem ein wesentlich geringeres Flächengewicht auf als die Aufbauten L\_AW1 bis L\_AW5. Für dieses Bauteil wird daher ein Referenzbeispiel aus dem Holzbau zur Beurteilung des Schalldämmvermögens herangezogen.

<i>Referenz zu AW6 („Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz“)</i>				
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
Putzsystem	0,007	2000	1,000	10-35
Holzfaserdämmplatte	0,060	200	0,055	5-7
Holzschalung Fichte	0,024	450	0,120	50
Zellulosefaser zwischen Konstruktionsholz	0,160	55	0,040	1-2
Holzschalung Fichte	0,160	450	0,120	50
Holzschalung Fichte	0,024	450	0,120	50
Dampfbremse				
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,288</b>			

Bauteilliste 12: Referenz zu Bauteil L\_AW6<sup>89</sup>

Dieses besteht aus einer gedämmten Holzständerkonstruktion mit zusätzlicher Außendämmschicht. Das bewertete Schalldämm-Maß der Konstruktion wird bei einer flächenbezogenen Masse von 78,9kg/m<sup>2</sup> mit 51dB beurteilt.

Da das Bauteil L\_AW6 mit 114,4kg/m<sup>2</sup> ein etwas höheres Flächengewicht erzielt und sich in seinem Aufbau nur geringfügig von der gezeigten Referenz unterscheidet, wird angenommen, dass der Schallschutz des Lehmbauteils L\_AW6 ausreichend ist.

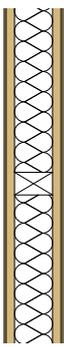
Für die Bauteile L\_AW7 und L\_AW8 kann aufgrund des hohen Masseanteils der Lehmbaustoffe erneut eine vereinfachte Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes unter Vernachlässigung der Stahlbetonstützen erfolgen. Gemäß der Annahme, die Stampflehm- bzw. Lehmsteinelemente als Massivbauteil zu betrachten und die außen liegende Dämmung als Vorsatzschale zu berücksichtigen, erzielen die Außenwände L\_AW7 und L\_AW8 voraussichtlich ein bewertetes Schalldämm-Maß von 63dB bzw. 52dB und liegen somit deutlich über der gesetzlichen Mindestanforderung für Außenwände von 43dB.

89 vgl. DATAHOLZ: Außenwand „awropo21a-06“

### 3.4.2 Innenwandsysteme

Wie bereits in 1.2.2 *Innenwandsysteme* beschrieben, muss für Innenwände zwischen Wohnungsinnenwänden und Wohnungstrennwänden unterschieden werden. Während an die Wände innerhalb einer Wohneinheit kaum Anforderungen gestellt werden und diese oft keine tragende Funktion übernehmen, müssen Wände, die Wohneinheiten voneinander oder von den allgemeinen Bereichen des Hauses trennen, sehr wohl Anforderungen an den Wärme-, Schall- und Brandschutz erfüllen.

#### Innenwandsysteme: Scheidewände

	<i>L_IW1: Stampflehmwand</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Stampflehm	0,240	2300	1,500	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,240</b>			
	<i>L_IW2: Holzständerwand, Leichtlehmschüttung</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
	Schilfrohrgewebe	0,003	200	0,059	2
	Leichtlehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,100	270	0,060	10
	Schilfrohrgewebe	0,003	200	0,059	2
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,166</b>			
	<i>L_IW3: Lehmsteinmauerwerk</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
	Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	10
	Lehmputz	0,030	2000	1,100	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,175</b>				
	<i>L_IW4: Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz</i>				
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Lehmputz	0,005	2000	1,100	10
	Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18
	Hanfdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,100	38	0,042	2
	Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18
	Lehmputz	0,005	2000	1,100	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,142</b>			

Bauteilliste 13: Scheidewände aus Lehm

Die gewählten Bauteilaufbauten der Wohnungsinnenwände weisen Bauteilstärken von 0,166m bis 0,240m auf, was üblichen Bauteildicken herkömmlicher Innenwände entspricht. Anders als konventionelle Systeme verfügen die gezeigten Aufbauten allerdings über eine wesentlich höhere Masse, was sich positiv auf das Schallverhalten der Bauteile auswirkt. Wengleich für die Kategorie „Wohnungsinnenwand“ diesbezüglich keine Grenzwerte einzuhalten sind, ist es auch innerhalb einer Wohneinheit erstrebenswert, die Hellhörigkeit der Bauteile zu minimieren.

Während die Bauteile L\_IW2 bis L\_IW4 in ihrem Aufbau mit konventionellen Systemen vergleichbar sind, stellt das Bauteil L\_IW1 im Geschossbau ein ähnliches Problem hinsichtlich der statischen Mehrbelastung durch das Stampfen dar wie dies bei den Bauteilen L\_AW1 und L\_AW2 der Fall ist. Aufgrund der geringeren Bauteildicke eignet sich das Bauteil L\_IW1 jedoch wesentlich besser zur Vorfertigung als die zuvor genannten, wesentlich massiveren Außenwandsysteme.

### Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände

<i>L_WTW1: Holzständerwand, Lehmstein</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
TW Fichtenholz	0,100	425	0,110	50	
Lehm-Ausbauplatte	0,016	1600	0,353	10	
Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	10	
Lehm-Ausbauplatte	0,016	1600	0,353	10	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
TW Fichtenholz	0,100	425	0,110	50	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,389</b>				

<i>L_WTW2: Holzständerwand, Lehmschüttung</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
TW Fichtenholz	0,100	425	0,110	50	
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	2	
Lehmschüttung schwer	0,100	1100	0,470	10	
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	2	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
TW Fichtenholz	0,100	425	0,110	50	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,348</b>				

<i>L_WTW3: Holzständerwand, Lehmbauplatten</i>					
Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
Lehm-Ausbauplatte	0,100	425	0,110	50	
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	10	
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	10	
Glaswolle Akustikplatte	0,020	45	0,035	1	
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	10	
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	10	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	3	
Lehmplatte TP	0,100	425	0,110	50	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				

<i>WTW4: Lehmsteinmauerwerk</i>					
Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
Lehmputz	0,020	2000	1,100	10	
Hanfdämmplatte	0,050	38	0,042	2	
Lehmstein schwer	0,240	1800	1,100	10	
Lehmputz	0,020	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,330</b>				

Bauteilliste 14: Wohnungstrennwände aus Lehm

Die gezeigten Bauteilaufbauten erreichen eine Bauteilstärke von 0,330m bis 0,389m und sind kaum dicker ausgeführt als übliche Wohnungstrennwände, die meist eine Stärke von 0,25m bis 0,35m aufweisen.

Die Bauteile L\_WTW1 und L\_WTW2 bestehen aus einer tragenden Holzstruktur mit ausfachender Dämmschicht und einem im Kern angeordneten Lehmbaustoff, der die Bauteilmasse erhöht. Zusätzlich kommt der Baustoff Lehm bei diesen Bauteilen als Innenputz zum Einsatz.

Das System L\_WTW3 besteht ebenfalls aus einer Holzständerwand, wobei der Kern bei dieser Ausführungsvariante aus einer Kombination schwerer Lehmplatten und einer zusätzlichen Akustikdämmplatte besteht.

In allen drei Fällen dient die Anordnung des Lehms im Kern insbesondere der Erhöhung der Bauteilmasse, wodurch der Schallschutz verbessert wird. Der außen liegende Lehmputz verbessert zudem die Feuchteregulierung im Raum.

Das Bauteil L\_WTW4 zeigt ein Mauerwerk aus Lehmziegeln mit einer zusätzlichen Vorsatzschale aus Hanf. Im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Holzbauteilen weist der massive Lehmziegelaufbau ein wesentlich höheres Flächengewicht auf.

Obwohl Wohnungstrennwände in der Regel keinen direkten Kontakt zur Außenluft haben, sondern maximal an ein unbeheiztes Stiegenhaus grenzen, müssen sie einen Wärmedurchgangskoeffizient erreichen, der gewährleistet, dass kein übermäßiger Wärmeverlust zu Nachbarwohnungen oder allgemeinen Hausteilen auftritt.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
L_WTW1	0,174	<	0,600 <sup>1</sup> 1,300 <sup>2</sup>
L_WTW2	0,170	<	
L_WTW3	0,156	<	
L_WTW4	0,587	<	

1: Wand gegen unbeheizte, frostfreie Gebäudeteile und Garagen  
2: Wand zwischen Wohneinheiten oder konditionierten Treppenhäusern

Tabelle 42: U-Werte der Wohnungstrennwände

Die vorgestellten Lehmbauteile liegen im Bereich Wärmeschutz alle unterhalb des gesetzlich festgelegten Grenzwertes des Wärmedurchgangs.

Im Bereich des Schallschutzes kann analog zu den Außenwandssystemen auch für die Wohnungstrennwände nicht in allen Fällen auf Berechnungen zurückgegriffen werden. Aufgrund vereinfachter Berechnungsverfahren sowie auf Grundlage von Referenzbeispielen werden die folgenden Kennwerte angenommen:

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
L_WTW1	60 <sup>1</sup>	>	58
L_WTW2	50 <sup>1</sup>	<	
L_WTW3	58 <sup>2</sup>	=	
L_WTW4	62	>	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

Tabelle 43: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Wohnungstrennwände

Während das bewertete Schalldämm-Maß für das Bauteil L\_WTW4 rechnerisch über das Massegesetz ermittelt werden kann, muss für die Bauteile L\_WTW1 bis L\_WTW3 auf Referenzen aus dem Holzbau und vereinfachte Berechnungen verwiesen werden.

Die Bauteile L\_WTW1 und L\_WTW2 werden unter der Vereinfachung berechnet, den Holzanteil in der Dämmebene zu vernachlässigen. Nach dem Massegesetz wird das bewertete Schalldämm-Maß des im Kern liegenden Lehms bestimmt, zusätzlich wird eine Verbesserung dieses Werts durch die beiden Dämmschichten, die als Vorsatzschalen wirken, angenommen.

Während das auf diese Weise ermittelte bewertete Schalldämm-Maß der Wohnungstrennwand L\_WTW1 ausreichend hoch ist, um den gesetzlichen Grenzwert einzuhalten, erzielt das Bauteil L\_WTW2 auf Grundlage dieser Berechnung keinen ausreichenden Schallschutz. Vergleicht man die beiden Bauteile hinsichtlich ihrer flächenbezogenen Masse, zeigt sich, dass sich die zwei Ausführungsvarianten trotz ihres ähnlichen Aufbaus deutlich in ihrem Gewicht unterscheiden und der Schallschutz aus diesem Grund von Bauteil L\_WTW2 nicht erreicht wird.

Für das Bauteil L\_WTW3 muss aufgrund der fehlenden Masse des Bauteils auf eine Referenz aus dem Holzbau verwiesen werden.

Referenz zu WTW3 („Holzständerwand, Lehmbauplatten“)				
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
Zellulosefaser zwischen Konstruktionsholz	0,100	55	0,040	1-2
Konstruktionsholz	0,100	450	0,120	50
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
Mineralwolle	0,020	16	0,040	1
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
Zellulosefaser zwischen Konstruktionsholz	0,100	55	0,040	1-2
Konstruktionsholz	0,100	450	0,120	50
Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
<b>Gesamt</b>	<b>0,295</b>			

Bauteilliste 15: Referenz zu Bauteil L\_WTW3<sup>90</sup>

Diese zeigt eine gedämmte Holzständerkonstruktion mit einem Kern aus je zwei Lagen Gipsplatten sowie einer zusätzlichen Dämmschicht. Das Referenzbauteil weist bei einer flächenbezogenen Masse von 83,5kg/m<sup>2</sup> ein bewertetes Schalldämm-Maß von 58dB auf.

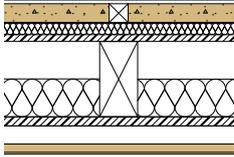
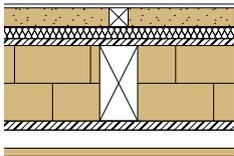
Das Bauteil L\_WTW3 entspricht in seinem Aufbau nahezu exakt jenem des Referenzbauteils, erreicht mit 196,1kg/m<sup>2</sup> jedoch ein wesentlich höheres Flächengewicht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Bauteil L\_WTW3 den geforderten Schallschutz von 58dB ebenfalls erzielt.

Während alle der gezeigten Bauteile einen ausreichenden Wärmeschutz aufweisen, um den Anforderungen an Wohnungstrennwände gerecht zu werden, können nur die Wände L\_WTW1, L\_WTW3 und L\_WTW4 auch den erforderlichen Schallschutz erzielen. Das Bauteil L\_WTW2 liegt mit 50dB deutlich unter den festgelegten Mindestanforderungen an das Schalldämm-Maß von Wohnungstrennwänden.

### 3.4.3 Geschossdecken

Geschossdecken übernehmen neben ihrer raumabschließenden Funktion insbesondere die Aufgabe, die Schallübertragung zwischen unterschiedlichen Wohneinheiten zu minimieren. Wie bereits in [3.2.1 Lehm als Tragstruktur](#) beschrieben, eignet sich Lehm kaum als tragendes Deckenelement. Im traditionellen Lehm- und Holzbau werden Decken meist in Form von Holzdecken ausgeführt, die mit Lehm ausgefacht sind. Der Lehm übernimmt in der Deckenkonstruktion vor allem den Schall- und Brandschutz und kann je nach Lehmstoff auch den Wärmeschutz verbessern. Angelehnt an historische Lehmdecken bestehen auch die hier entwickelten Bauteilaufbauten aus einer Kombination von tragendem Holzskelett und schalldämmender Lehmauflage.

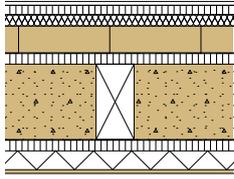
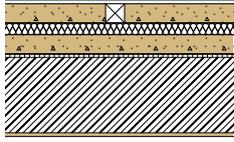
<sup>90</sup> vgl. DATAHOLZ: Trennwand „twrxo03a-03“

<i>L_GD1: Holzbalkendecke, Lehmestrich</i>						
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	425	0,110	50	
		0,050	1800	0,910	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	5	
	Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	50	
	Hanfdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,100	38	0,042	2	
		0,200	425	0,110	50	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Lattung Fichte	0,048	425	0,110	50	
	Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
	Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,401</b>			
	<i>L_GD2: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmsteinausfachung</i>					
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	425	0,110	50	
		0,050	1800	0,910	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	5	
	Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	50	
	Lehmstein schwer zwischen TW Fichtenholz	0,200	1800	1,100	10	
		0,200	425	0,110	50	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Lattung Fichte	0,048	425	0,110	50	
	Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
	Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,401</b>			

<i>L_GD3: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	425	0,110	50	
	0,050	1800	0,910	10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	5	
Lehmschüttung	0,040	1100	0,470	10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	50	
Hanfdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,100	38	0,042	2	
	0,200	425	0,110	50	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	50	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,441</b>				

<i>L_GD4: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	425	0,110	50	
	0,050	1800	0,910	10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	5	
Spanplatte	0,025	800	0,170	90	
Lehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,200	1100	0,470	10	
	0,200	425	0,110	50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
Spanplatte	0,025	800	0,170	90	
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	50	
Lehmplatte TP	0,016	700	0,130	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,409</b>				

<i>L_GD5: Holzbalkendecke, Leichtlehmschüttung, Lehmsteinauflage</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Spanplatte	0,025	800	0,170	90	
	TSD Holzfaserverplatte	0,030	160	0,042	5	
	Lehmstein schwer	0,071	1800	1,100	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Spanplatte	0,025	800	0,170	90	
	Leichtlehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,200	270	0,060	5	
		0,200	425	0,110	50	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Spanplatte	0,025	800	0,170	90	
	Schilfdämmplatte	0,050	190	0,056	1	
	Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,446</b>			
	<i>L_GD6: Brettstapeldecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>					
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Parkettboden	0,010	740	0,160	200	
	Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	425	0,110	50	
	Lehmestrich	0,050	1800	0,910	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	TSD Holzfaserverplatte	0,040	160	0,042	5	
	Lehmschüttung	0,050	1100	0,470	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Funderplanplatte	0,008	1000	0,180	185	
	Brettstapелеlement	0,200	500	0,130	50	
	Schilfrohwergewebe PT	0,003	200	0,059	2	
	Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,371</b>			

*Bauteilliste 16: Geschossdecken aus Lehm*

Die gezeigten Aufbauten weisen Bauteildicken von 0,371m bis 0,446m auf, was den üblichen Deckenstärken im klassischen Holzbau entspricht. Stahlbetondecken fallen je nach Ausführung mit 0,30m bis 0,35m nur wenig schlanker aus.

Die Bauteile L\_GD1 bis L\_GD5 zeigen Holzbalkendecken mit unterschiedlich hohem Lehmanteil. Als Estrich wird in den Decken 1 bis 4 eine 5cm starke Lehmschicht eingesetzt, der Bodenbelag wird direkt darauf an den eingebetteten Polsterhölzern befestigt. Das Bauteil L\_GD5 zeigt eine Ausführungsvariante gänzlich ohne Estrich.

Während sich der Lehmanteil bei Bauteil L\_GD1 lediglich auf den Estrich und Deckenputz beschränkt, werden in den Bauteilen L\_GD2 bis L\_GD4 weitere Lehmbaumstoffe eingesetzt. Durch Lehmschüttungen und Lehmsteine zwischen den Deckenbalken oder als darüber liegende Deckenauflage wird die flächenbezogene Masse der Bauteile erhöht, was sich positiv auf ihr Schalldämmvermögen auswirkt. Teilweise wird durch die Lehmbaumstoffe auch die Deckendämmung ersetzt.

Das Bauteil L\_GD5 weist eine Leichtlehmschüttung auf, die ein besseres Wärmedämmvermögen besitzt als die in den übrigen Bauteilen gewählten schweren Lehmbaumstoffe, dafür aber weniger zusätzliches Gewicht in die Konstruktion bringt.

Das Bauteil L\_GD6 besteht anders als die vorhergehenden Ausführungen aus einer Brettstapeldecke mit Lehmestrich, einer schweren Lehmschüttung sowie einem Lehmputz. Zur Aussteifung der Decke wird das Brettstapелеlement mit einer Funderplan-Holzfaserverplatte beplankt. Wie die Deckenausführungen L\_GD2 und L\_GD4 wird auch bei diesem Bauteil keine zusätzliche Wärmedämmung eingebracht.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m²K)]		
	vorhanden		max. zulässig
L_GD1	0,172	<	0,900
L_GD2	0,282	<	
L_GD3	0,170	<	
L_GD4	0,270	<	
L_GD5	0,181	<	
L_GD6	0,336	<	

Tabelle 44: U-Werte der Deckensysteme

Trotz der teilweise fehlenden Wärmedämmschicht liegen alle der gezeigten Aufbauten unter dem gesetzlich geforderten U-Wert von 0,900W/(m²K) für Decken zwischen Wohneinheiten. Zusätzlich erfüllen sie auch die Anforderungen für Decken, die an unbeheizte Gebäudeteile angrenzen. Für diese liegt der maximal zulässige U-Wert bei 0,400W/(m²K).

Im Bereich des Schallschutzes wird für Decken neben dem bewerteten Schalldämm-Maß  $R_w$  zur Beurteilung des Luftschallschutzes auch das Trittschalldämmvermögen der Bauteile bestimmt. Wie bei den vorhergehenden Bauteilgruppen kann dabei auch für die Geschossdecken keine exakte Berechnung des Schalldämmvermögens durchgeführt werden.

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
L_GD1	66 <sup>2</sup>	>	58
L_GD2	78 <sup>2</sup>	>	
L_GD3	70 <sup>2</sup>	>	
L_GD4	78 <sup>2</sup>	>	
L_GD5	66 <sup>2</sup> -78 <sup>2</sup>	>	
L_GD6	59 <sup>1</sup> -62 <sup>2</sup>	>	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

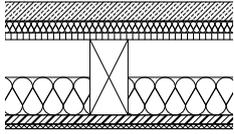
Tabelle 45: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Deckensysteme

Bauteilbezeichnung	bewerteter Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ [dB]		
	vorhanden		max. zulässig
L_GD1	53 <sup>2</sup>	=	53
L_GD2	37 <sup>2</sup>	<	
L_GD3	41 <sup>2</sup>	<	
L_GD4	37 <sup>2</sup>	<	
L_GD5	37 <sup>2</sup> -53 <sup>2</sup>	<	
L_GD6	52 <sup>2</sup> -57 <sup>1</sup>	< / >	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

Tabelle 46: voraussichtlicher Trittschallschutz der Deckensysteme

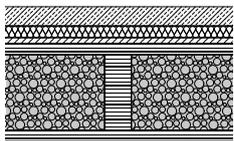
Für das Bauteil L\_GD1 wird eine Holzbalkendecke als Referenzbeispiel gewählt, die in ihrem Aufbau sehr ähnlich zur gewählten Konstruktion ist, allerdings keine Installationsebene aufweist.

<i>Referenz zu L_GD1 („Holzbalkendecke, Lehmestrich“)</i>					
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Anhydrit-/Zementestrich	0,050	2200	0,700	10
	Trennlage Kunststoff		1400	0,200	100.000
	Mineralwolle TSD	0,040	68	0,035	1
	Spanplatte	0,019	700	0,130	50-100
	Mineralwolle zwischen	0,100	16	0,040	1
	Konstruktionsholz	0,200	450	0,120	50
	Federschiene zwischen	0,027			
	Fichte Sparschalung	0,024	450	0,120	50
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
	<b>Gesamt</b>		<b>0,349</b>		

Bauteilliste 17: Referenz zu Bauteil L\_GD1<sup>91</sup>

Die flächenbezogene Masse der Referenz beträgt 142,7kg/m<sup>2</sup> und liegt somit nahe am Gewicht der Lehmkonstruktion, die einen Wert von 135,5kg/m<sup>2</sup> aufweist. Die Referenzdecke erzielt bei diesem Flächengewicht ein bewertetes Schalldämm-Maß von 66dB sowie einen bewerteten Norm-Trittschallpegel von 53dB und entspricht somit den geforderten Schallschutzanforderungen. Wenngleich die gezeigte Lehmdecke etwas leichter als das Referenzbeispiel ist, wird angenommen, dass die geforderten Schallschutzkennwerte eingehalten werden, da die in der Referenz fehlende Installationsebene der Lehmkonstruktion eine zusätzliche Schallschutzverbesserung erzielt und das geringere Gewicht voraussichtlich ausgleicht.

Für die Geschosdecken L\_GD2, L\_GD4 und L\_GD5 wird ein Referenzbeispiel herangezogen, das wie diese Bauteile eine zusätzliche Flächenlast im Bereich der Tragkonstruktion aufweist.

<i>Referenz zu L_GD2, L_GD4 und L_GD5</i>					
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
	Zementestrich	0,051	<i>keine Angabe durch die Datenbank</i>		
	TSD Akustik EP1	0,035			
	WD Gutex Standard-n	0,015			
	Kalksplittschüttung zwischen	0,223			
	TW Lignotrend Q3	0,196			
	Gurtplatte zu Ligno Q3	0,039			
	<b>Gesamt</b>				

Bauteilliste 18: Referenz zu den Bauteilen L\_GD2, L\_GD4, L\_GD5<sup>92</sup>

Das Beispiel zeigt eine Rippendecke mit Splittschüttung sowie Zementestrich und erzielt eine flächenbezogene Masse von 376kg/m<sup>2</sup>. Die Konstruktion erreicht

91 vgl. DATAHOLZ: *Geschosdecke „gdrnxa04a-01“*

92 vgl. LIGNUMDATA: *Katalog Decke*

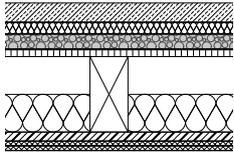
ein bewertetes Schalldämm-Maß von 78dB und einen Norm-Trittschallpegel von 37dB. Die Geschossdecke L\_GD2 weist mit 473,7kg/m<sup>2</sup> ein deutlich höheres Flächengewicht als diese Konstruktion auf, das Bauteil L\_GD4 liegt mit 362,9kg/m<sup>2</sup> leicht unter dem Gewicht des Referenzbeispiels. Für die Bauteile L\_GD2 und L\_GD4 kann aufgrund der Ähnlichkeit im Aufbau in Kombination mit einem ausreichend hohen Flächengewicht angenommen werden, dass ihr Schalldämmvermögen den zuvor gezeigten Anforderungen entspricht.

Die Bewertung des Schallschutzpotentials von Bauteil L\_GD5 stellt sich im Gegensatz dazu etwas schwieriger dar. Aufgrund des Einsatzes einer Leichtlehmschüttung anstelle schwerer Lehmbaustoffe erzielt diese Decke ein deutlich geringeres Flächengewicht von 277,6kg/m<sup>2</sup>. Zusätzlich muss davon ausgegangen werden, dass das Bauteil aufgrund der Ausführung ohne Estrich sowie der fehlenden Installationsebene grundsätzlich ungünstigere Schalldämmeigenschaften aufweist als die Beispiele L\_GD2 und L\_GD4.

Vergleicht man den Aufbau L\_GD5 jedoch beispielsweise mit dem Referenzbeispiel zu L\_GD1, zeigt sich, dass auch diese Decke trotz einer wesentlich geringeren Masse einen ausreichenden Schallschutz erreicht.

Da der Bauteilaufbau der Decke L\_GD5 im Wesentlichen jenen der Decken L\_GD2 und L\_GD4 entspricht, welche ein deutlich besseres Schalldämmvermögen erreichen als die Konstruktion L\_GD1, wird angenommen, dass das Bauteil GD5 trotz des geringeren Flächengewichts eine ausreichende Luft- und Trittschalldämmung gewährleistet.

Für die Ausführungsvariante L\_GD3 wird erneut eine Holzbalkendecke als Referenzbeispiel gewählt, die in ihrem Aufbau möglichst jenem des Lehmbauteils entspricht.

<i>Referenz zu L_GD3 („Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmsteinauflage“)</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Anhydrit-/ Zementestrich	0,050	2200	1,330	50-100	
	Trennlage Kunststoff		1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1	
	Schüttung lose	0,040	1800	0,700	1	
	Spanplatte	0,019	700	0,130	50-100	
	Mineralwolle zwischen	0,100	16	0,040	1	
	Konstruktionsholz	0,200	450	0,120	50	
	Federschiene zwischen	0,027				
	Fichte Sparschalung	0,024	450	0,120	50	
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10	
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,391</b>			

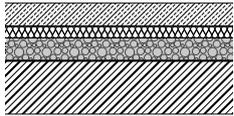
*Bauteilliste 19: Referenz zu Bauteil L\_GD3<sup>93</sup>*

Das Referenzobjekt erreicht bei einer flächenbezogenen Masse von 224,7kg/m<sup>2</sup> ein bewertetes Schalldämm-Maß von 70dB sowie einen Norm-Trittschallpegel von 41dB. Das zugehörige Lehmbauteil ist mit 179,4kg/m<sup>2</sup> zwar um fast 45kg/m<sup>2</sup> leichter, erzielt aber dennoch eine höhere Masse als das Bauteil L\_GD1 und dessen Referenzobjekt. Da sich der Aufbau der Decke L\_GD1 nur durch die fehlende Schüttung vom Aufbau

93 vgl. DATAHOLZ: *Geschossdecke „gdrnxa08b-01“*

L\_GD3 und seinem Referenzbeispiel unterscheidet und einen ausreichenden Schallschutz erzielt, wird auch das Schalldämmvermögen des Aufbaus L\_GD3 als ausreichend bewertet.

Auch für die Geschossdecke L\_GD6 muss auf ein Referenzbeispiel verwiesen werden.

<i>Referenz zu L_GD6 („Brettstapeldecke, Lehmestrich, Lehmschüttung“)</i>						
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
	Zementestrich	0,060	2000	1,330	50-100	
	Trennlage Kunststoff		1400	0,200	100.000	
	Mineralwolle TSD	0,030	70	0,033	1	
	Schüttung lose	0,060	1700	0,700	1	
	Rieselschutz					
	Brettsperrholz	0,140	500	0,133	50	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,290</b>			

*Bauteilliste 20: Referenz zu Bauteil L\_GD6<sup>94</sup>*

Das Referenzobjekt erreicht bei einer flächenbezogenen Masse von 295,8kg/m<sup>2</sup> ein bewertetes Schalldämm-Maß von 62dB sowie einen Norm-Trittschallpegel von 52dB. Mit 273,1kg/m<sup>2</sup> weist die gezeigte Lehm-Brettstapeldecke nur ein in geringem Maße abweichendes Flächengewicht auf. Bei vereinfachter Berechnung ohne Berücksichtigung der Polsterhölzer im Bereich des Estrichs erzielt diese Lehmdecke ein  $R_w$  von 59dB und ein  $L_{n,w}$  von 57dB. Während der Luftschallschutz sowohl bei Betrachtung des Referenzobjekts als auch bei vereinfachter Berechnung ausreichend ist, kann im Bereich des Trittschallschutzes keine definitive Aussage hinsichtlich des Schallverhaltens getroffen werden, da sich eine Abschätzung der Ungenauigkeit der vereinfachten Rechenart als schwierig erweist.

### 3.4.4 Dachaufbauten

Wie bereits in [1.2.4 Dachaufbauten](#) beschrieben, werden in Wien sowohl Flach- als auch Steildächer ausgeführt, weshalb auch an dieser Stelle beide Varianten behandelt werden.

Bei allen der gezeigten Dachausführungen wird ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, möglichst diffusionsoffene Aufbauten zu entwickeln, deren Anteil an energieintensiven und in ihrer Entsorgung problematischen Baustoffen gering gehalten wird. Durch eine genaue Überlegung der Schichtreihenfolge sowie der eingesetzten Materialien werden die Bauteile möglichst ohne – in konventionellen Dächern stets vorhandene – Dampfsperren bzw. -bremsen ausgeführt, da diese im Widerspruch zur Diffusionsoffenheit der Lehmbaustoffe stehen (vgl. [3.3.4 Trennlagen und Abdichtungen](#)). Im Fall einer baulichen Umsetzung der gezeigten Dachaufbauten wird dennoch dringend empfohlen, eine Überprüfung des Aufbaus hinsichtlich auftretenden Tauwassers an entsprechenden Probekörpern durchzuführen.

Im Bereich der Dachabdichtung gegen eindringendes Niederschlagswasser muss aufgrund fehlender Alternativen auf den Einsatz gewöhnlicher Bitumenbahnen zurückgegriffen werden.

<sup>94</sup> vgl. DATAHOLZ: *Geschossdecke „gdmnxn02-03“*

## Dachaufbauten: Steildächer

<i>L_SD1: Holzsparrendach, schwere Lehmschüttung</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Betondachstein	0,020	2150	1,700	100	
Lattung Fichte	0,050	425	0,110	50	
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	50	
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,050	26	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Holzfaserdämmplatte zwischen Dachbalken Fichte	0,240	230	0,050	5	
Dachbalken Fichte	0,240	425	0,110	50	
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>1000</i>	<i>0,170</i>	<i>20.000</i>	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Lehmschüttung zwischen Lattung	0,120	1100	0,470	10	
Lattung	0,120	425	0,110	50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Schilfrohrgewebe PT	0,003	200	0,059	2	
Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,565</b>				

<i>L_SD2: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung</i>					
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
Betondachstein	0,020	2150	1,700	100	
Lattung Fichte	0,050	425	0,110	50	
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	50	
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,050	26	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Leichtlehmschüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	270	0,060	5	
Dachbalken Fichte	0,240	425	0,110	50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Holzfaserdämmplatte zwischen Lattung	0,080	230	0,050	5	
Lattung	0,080	425	0,110	50	
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>1000</i>	<i>0,170</i>	<i>20.000</i>	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
Schilfrohrgewebe PT	0,003	200	0,059	2	
Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,525</b>				

Bauteilliste 21: Steildächer aus Lehm

Die beiden gezeigten Steildächer bestehen aus klassischen Holzdachstühlen, die mit zusätzlichen Lehmbaumaterialien kombiniert werden und Bauteilstärken von 0,525m bzw. 0,565m erreichen.

Bauteil L\_SD1 besteht aus einem Holztragwerk mit ausfachender Wärmedämmung. Raumseitig wird zusätzlich eine schwere Lehmschüttung in eine verlorene Schalung eingebracht, um das Speicherpotential der Konstruktion zu verbessern. Dies ist im Bereich der Dachaufbauten von besonderem Vorteil, um vor sommerlicher Überhitzung der Dachgeschosswohnung zu schützen.

Die Ausführungsvariante L\_SD2 zeigt einen Aufbau mit Leichtlehmschüttung zwischen den Dachbalken, der Wärmedämmstoff wird an die Raumseite verlegt.

Mit  $0,177\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  bzw.  $0,161\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  liegen beide der gezeigten Steildachausführungen unterhalb des maximal zulässigen U-Werts von  $0,200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Bauteilbezeichnung	U-Wert [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]		
	vorhanden		max. zulässig
L_SD1	0,177	<	0,200
L_SD2	0,161	<	

Tabelle 47: U-Werte der Steildächer

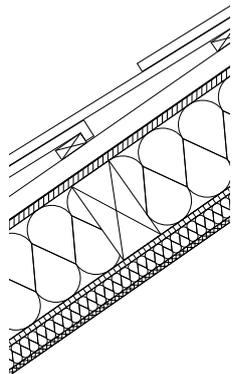
Im Bereich des Schallschutzes wird für die Bauteile L\_SD1 und L\_SD2 wie bereits in den vorangegangenen Analysen erneut auf Referenzbeispiele und vereinfachte Berechnungen verwiesen.

Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
L_SD1	51 <sup>1</sup> -53 <sup>2</sup>	>	33
L_SD2	43 <sup>1</sup> -53 <sup>2</sup>	>	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

Tabelle 48: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Steildächer

Das Referenzbeispiel zur Steildachvariante L\_SD1 besteht aus einem Dachstuhl in Holzrahmenbauweise mit Gefachdämmung sowie zusätzlicher Innendämmung.

	Referenz zu L_SD1 („Holzsparrendach, schwere Lehmschüttung“)				
	Material	d [m]	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]	$\mu$ [-]
	Betondachstein od. Ziegeldachstein		2100		
	Lattung Fichte	0,030	450	0,120	50
	Konterlattung Fichte	0,050	450	0,120	50
	Unterdeckbahn		1000		
	Fichte Vollschalung		450	0,120	50
	Mineralwolle zwischen Dachbalken	0,240	16	0,040	1
	Fichte Dachbalken	0,240	450	0,120	50
	OSB-Platte	0,015	600	0,130	200
	Lattung Fichte	0,050	450	0,120	50
	Mineralwolle	0,050	16	0,040	1
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10
	<b>Gesamt</b>	<b>0,448</b>			

Bauteilliste 22: Referenz zu Bauteil L\_SD1<sup>95</sup>

Das Bauteil erzielt bei einer flächenbezogenen Masse von  $53,10\text{kg}/\text{m}^2$  ein bewertetes Schalldämm-Maß von 53dB. Die Konstruktion unterscheidet sich vom Lehmbauteil L\_SD1 im Wesentlichen nur durch die innen liegende Wärmedämmschicht, die im Aufbau L\_SD1 durch eine schwere Lehmschüttung ersetzt wird. Diese erhöht das Flächengewicht auf  $283,7\text{kg}/\text{m}^2$ , wodurch das Bauteil etwa fünfmal schwerer ist als

95 vgl. DATAHOLZ: geneigtes Dach „sdrhzi06a-03“

das Referenzbeispiel.

Als Vergleich wird zusätzlich eine vereinfachte Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes vorgenommen, bei dem der Holzanteil der inhomogenen Bauteilschichten vernachlässigt wird. Mit 51dB erzielt die Konstruktion einen ähnlichen Schalldämmwert wie das zuvor gezeigte Referenzbeispiel.

Aufgrund des ähnlichen Bauteilaufbaus bei deutlich höherer Masse sowie dem Ergebnis der vereinfachten Berechnung kann angenommen werden, dass die Konstruktion L\_SD1 ein ausreichendes Schalldämmvermögen aufweist.

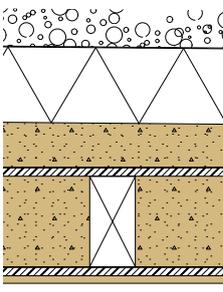
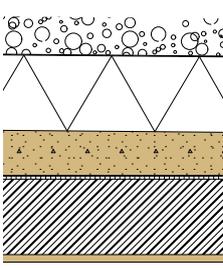
Für den Dachaufbau L\_SD2 muss auf das Referenzbeispiel zur Konstruktion L\_SD1 verwiesen werden, da die für dieses Bauteil gezeigte Ausführung im konventionellen Holzbau nicht üblich ist und somit kein geeignetes Vergleichsobjekt gefunden werden kann.

Da sich der Aufbau L\_SD2 nur in der Position der Dämm- und Lehmschicht von der Ausführungsvariante L\_SD1 unterscheidet, kann trotz des geringeren Gewichts der leichten Lehmschüttung im Vergleich zum schweren Lehmbaustoff von einem ausreichenden Schallschutz ausgegangen werden. Die flächenbezogene Masse des Bauteils L\_SD2 liegt mit 183,9kg/m<sup>2</sup> zwar nur bei der Hälfte des Flächengewichts des Aufbaus L\_SD1, jedoch immer noch deutlich höher als bei dem für dieses Dach gewählten Referenzwert von 53,1kg/m<sup>2</sup>.

Auch für diesen Aufbau wird als Vergleichswert eine vereinfachte Schallberechnung durchgeführt, bei der erneut der Holzanteil der inhomogenen Bauteilschichten vernachlässigt wird. Diese erzielt ein bewertetes Schalldämm-Maß von 43dB, was zwar deutlich unterhalb der Werte von L\_SD1 und seinem Referenzobjekt, jedoch immer noch 10dB über dem geforderten Mindestwert liegt. Es wird somit auch für das Bauteil L\_SD2 ein ausreichender Schallschutz angenommen.

### Dachaufbauten: Flachdächer

<i>L_FD1: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Blecheindeckung</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Blecheindeckung	0,001	7170	105,000		
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	50	
	Unterdeckbahn	0,0001	300	0,050	26	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Leichtlehmschüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	270	0,060	5	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Holzfaserdämmplatte hart	0,100	230	0,050	5	
	Schilfrohrgewebe PT	0,003	200	0,059	2	
	Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,476</b>			

<i>L_FD2: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Kieseindeckung</i>						
	Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]	
	Kies	0,100	1600	0,470	50	
	Vlies PP	0,0001	300	0,220	1	
	XPS-Dämmung	0,200	30	0,035	200	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	1570	0,230	dampfdicht	
	Lehmgefälle	0,120	1100	0,470	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Leichtlehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,240	270	0,060	5	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>1000</i>	<i>0,170</i>	<i>20.000</i>	
	Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	50	
	Schilfrohwewebe PT	0,003	200	0,059	2	
	Lehmputz	0,010	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,723</b>			
	<i>L_FD3: Massivholzdach</i>					
		Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]
	Kies	0,100	1600	0,470	50	
	Vlies PP	0,0001	300	0,220	1	
	XPS-Dämmung	0,200	30	0,035	200	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	1570	0,230	dampfdicht	
	Lehmgefälle	0,120	1100	0,470	10	
	Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	423	
	Funderplanplatte	0,008	1000	0,180	185	
	Brettstapelelement	0,200	500	0,130	50	
	Schilfrohwewebe PT	0,003	200	0,059	2	
	Lehmputz	0,002	2000	1,100	10	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,653</b>			

*Bauteilliste 23: Flachdächer aus Lehm*

Die gezeigten Flachdach-Aufbauten weisen Bauteilstärken von 0,476m bis 0,723m auf. Beispiele aus dem Holzbau zeigen ähnliche Bauteildicken und auch die in [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) angeführten Beispiele entsprechen ähnlichen Werten.

Das Flachdach L\_FD1 besteht aus einer Holzbalken-Konstruktion mit ausfachender Leichtlehmschüttung und einer Holzfaserdämmplatte als zusätzlicher Innendämmung. Den außen liegenden Oberflächenabschluss bildet eine Blecheindeckung auf einer Lattung als Hinterlüftung. Wie bei den Steildachausführungen dient der Einsatz von Lehm auch hier einerseits als zusätzliche Dämmschicht und verbessert andererseits im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen den sommerlichen Wärmeschutz.

Bauteil L\_FD2 besteht wie Variante L\_FD1 aus einer Holzbalkenkonstruktion mit ausfachender Leichtlehmschüttung. Anstelle einer Innendämmung wird der zusätzliche Dämmstoff bei der Ausführung L\_FD2 jedoch außen angeordnet, wodurch auf den Einsatz einer XPS-Dämmplatte zurückgegriffen werden muss. Diese behält anders als die meisten Dämmstoffe auch bei Durchfeuchtung ihre wärmedämmenden Eigenschaften, weist jedoch einen wesentlich schlechteren ökologischen Fußabdruck

auf als die in den übrigen Bauteilaufbauten angewendeten Dämmstoffe. Das Gefälle wird durch eine Lehmschüttung anstelle des konventionellen Gefällebetons ausgeführt.

Im Gegensatz zu den Bauteilaufbauten L\_FD1 und L\_FD2 besteht die Ausführungsvariante L\_FD3 aus einer Brettstapelkonstruktion anstelle der Holzbalkendecke. Die wärmedämmende Ebene wird wie im Aufbau L\_FD2 an der Außenseite der Tragkonstruktion angeordnet und besteht ebenfalls aus einer XPS-Platte. Wie im vorhergehenden Dachaufbau wird das Gefälle auch hier durch eine Lehmschüttung hergestellt.

Alle der gezeigten Flachdach-Aufbauten erzielen einen ausreichenden Wärmeschutz, wie die nachstehende Tabelle zeigt.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]		
	vorhanden		max. zulässig
L_FD1	0,155	<	0,200
L_FD2	0,096	<	
L_FD3	0,129	<	

Tabelle 49: U-Werte der Flachdächer

Während das bewertete Schalldämm-Maß des Aufbaus FD3 rechnerisch ermittelt werden kann, müssen für die Bauteile FD1 und FD2 erneut vereinfachte Berechnungsverfahren und Referenzbeispiele hinzugezogen werden.

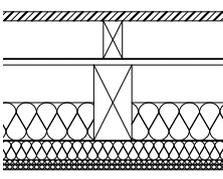
Bauteilbezeichnung	bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB]		
	vorhanden		mind. erforderlich
L_FD1	43 <sup>1</sup> -51 <sup>2</sup>	>	33
L_FD2	50 <sup>2</sup> -58 <sup>1</sup>	>	
L_FD3	60	>	

1: vereinfachte Berechnung  
2: Wert laut Referenzbeispiel

Tabelle 50: voraussichtliches Schalldämmvermögen der Flachdächer

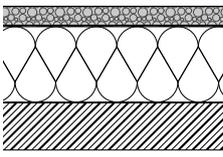
Das Referenzbeispiel zu Bauteil L\_FD1 zeigt ein tragendes Gerüst aus Holzbalken mit Gefachdämmung sowie einer zusätzlichen Dämmschicht an der Innenseite des Bauteils. Den obersten Dachabschluss bildet wie beim Lehmbauteil eine Blecheindeckung. Das Referenzbauteil erzielt bei einer flächenbezogenen Masse von 50,2kg/m<sup>2</sup> ein bewertetes Schalldämm-Maß von 51dB. Das zu vergleichende Bauteil L\_FD1 unterscheidet sich in seinem Aufbau insbesondere durch die zwischen den Balken liegende Leichtlehmschüttung, die anstelle der Gefachdämmung angeordnet wird. Mit 150,1kg/m<sup>2</sup> erzielt das Bauteil ein dreimal so hohes Flächengewicht wie das Referenzbeispiel.

Eine zusätzliche Berechnung des Bauteils unter Vernachlässigung des Holzanteils zwischen der Lehmschüttung ergibt ein bewertetes Schalldämm-Maß von 43dB. Da sowohl das Schalldämmvermögen des Referenzbauteils als auch der Wert der vereinfachten Berechnungsmethode über dem geforderten Mindestwert liegt, wird angenommen, dass das Bauteil L\_FD1 den Schallschutz ausreichend erfüllt.

<i>Referenz zu L_FD1 („Holzsparrendach, Blecheindeckung“)</i>						
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
	Blecheindeckung		7800			
	Lattung Fichte	0,024	450	0,120	50	
	Konterlattung Fichte	0,080	450	0,120	50	
	Unterdeckbahn		1000			
	MDF-Platte	0,015	600	0,140	11	
	Mineralwolle zwischen Dachbalken Fichte	0,240	16	0,040	1	
	Dampfbremse		1000			
	Lattung Fichte	0,050	450	0,120	50	
	Mineralwolle	0,050	16	0,040	1	
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10	
	Gipsplatte GKF	0,0125	800	0,250	10	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,484</b>				

Bauteilliste 24: Referenz zu Bauteil L\_FD1<sup>96</sup>

Für Bauteil L\_FD2 kann kein geeignetes Referenzobjekt gezeigt werden, da sich sein Aufbau deutlich von einem klassischen Holzbau unterscheidet. Aufgrund des hohen Masseanteils im Bereich der Tragkonstruktion wird daher auf den Vergleich mit einer Brettstapeldecke zurückgegriffen, da diese ein höheres Flächengewicht aufweist als ein Holzbalken-Dachstuhl mit Gefachdämmung.

<i>Referenz zu L_FD2 („Holzsparrendach, Kieseindeckung“)</i>						
	Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]	
	Schüttung	0,050	1800	0,700	1	
	Trennvlies					
	Dachabdichtung					
	Holzfaserdämmplatte	0,200	160	0,045	5-7	
	Abdichtungsbahn					
	Brettsperrholz	0,125	500	0,130	50	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,375</b>				

Bauteilliste 25: Referenz zu Bauteil L\_FD2<sup>97</sup>

Das Referenzbauteil zeigt eine Brettstapeldecke mit außen liegender Wärmedämmung und zusätzlicher Beschüttung. Es erzielt bei einer flächenbezogenen Masse von 184,5kg/m<sup>2</sup> ein bewertetes Schalldämm-Maß von 50dB.

Da sich der Aufbau des Flachdachs L\_FD2 etwas stärker von seinem Vergleichsobjekt unterscheidet als dies bei den übrigen Beispielen und ihren Referenzen der Fall ist, wird zum Vergleich der flächenbezogenen Massen erneut eine vereinfachte Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes durchgeführt. Diese ergibt bei einem Flächengewicht von 408,2kg/m<sup>2</sup> für  $R_w$  einen Wert von 58dB. Da sowohl die flächenbezogene Masse des Lehmbauteils als auch sein vereinfachtes bewertetes Schalldämm-Maß deutlich über den Werten des Referenzbauteils liegen, wird davon ausgegangen, dass der Schallschutz dieses Bauteils ebenfalls ausreichend ist.

96 vgl. DATAHOLZ: Flachdach / flachgeneigtes Dach „fdrhbi08b-03“

97 vgl. DATAHOLZ: Flachdach / flachgeneigtes Dach „fdmko01-01“

### 3.4.5 Erdberührte Bauteile

Als erdberührte Bauteile gelten all jene Bestandteile eines Gebäudes, die in direktem Kontakt zum Boden stehen. Dies umfasst meist das Fundament, die Bodenplatte, die Kellerwände sowie die Decke zwischen Keller und Erdgeschoss.

Die Anwendung von Lehm in diesem Bereich stellt sich als ausgesprochen schwierig heraus, da Lehm bei direktem Kontakt mit Wasser seine Festigkeit verliert. Durch die kapillare Leitfähigkeit des Lehms fördert ein Einsatz des Materials zudem das Aufsteigen von Feuchtigkeit in höher gelegene Bauteile, was durch entsprechende Sperrschichten unterbunden werden muss.

Schroeder schreibt in diesem Zusammenhang:

*„Erdberührte Bauteile wie Fundamente und Kellerwände sollen grundsätzlich nicht aus Lehmbaustoffen, sondern aus Wasser unempfindlichen Materialien (Beton, gebrannte Ziegel, Naturstein) ausgeführt werden.“<sup>98</sup>*

Während Schroeder nur von der Anwendung von Lehmbaustoffen bei erdberührten Bauteilen abrät, verbieten die *Lehmbauregeln* des Dachverband Lehm eine derartige Ausführung vollständig:

*„Lehmbaustoffe dürfen für Fundamente, Keller- und Sockelmauerwerk nicht verwendet werden. Die evtl. nicht erdberührten Teile eines Kellergeschosses dürfen nicht aus tragenden Lehmbaustoffen hergestellt werden.“<sup>99</sup>*

Das Verbot des Einsatzes von Lehm in erdberührten Bauteilen durch die *Lehmbauregeln* sowie das beschriebene Problem der Festigkeitsminderung führen dazu, dass kaum aktuell gebaute Beispiele erdberührter Lehmbauteile in Westeuropa existieren.

Dennoch soll an dieser Stelle ein beispielhafter Aufbau einer Kelleraußenwand aus tragendem Stampflehm vorgestellt werden. Das Bauteil ist an die Ausführung von *Martin Rauch* in seinem Projekt „Haus Rauch“<sup>100</sup> in Schlins angelehnt. Die Wandstärke des Lehmbauteils wurde dabei von 45cm auf 1m erhöht, um den statischen Anforderungen im mehrgeschossigen Wohnbau gerecht zu werden.

L_KAW1: Stampflehmwand				
Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	μ [-]
Kies	0,100	1600	0,470	50
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	1
Schaumglas-WD	0,100	130	0,056	dampfdicht
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	dampfdicht
Stampflehm	1,000	2300	1,500	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,100</b>			

Bauteilliste 26: Kelleraußenwände aus Lehm

98 SCHROEDER 2010, S.190

99 DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.89

100 vgl. o.A.: *Lehmhaus Rauch*

Der Aufbau L\_KAW1 zeigt eine tragende Stampflehmwand mit außenliegender Wärmedämmung. Um das Lehmbauteil vor direktem Wasserkontakt zu schützen, wird eine Sperrschicht aus Bitumen zwischen Wärmedämmung und Lehm angeordnet. Zusätzlich besteht der Dämmstoff aus wasserdampfdichtem Schaumglas.

Das Bauteil erzielt einen U-Wert von  $0,387\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  und genügt somit den gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz. Es weist zudem keine Schwierigkeiten hinsichtlich der Dampfdiffusion auf.

Wenngleich der Aufbau gemäß Glaser-Verfahren hinsichtlich anfallenden Tauwassers problemlos funktioniert, muss an dieser Stelle hinterfragt werden, ob eine Kombination der Lehmschicht mit dampfsperrenden Materialien sinnvoll ist. Die große Stärke des Lehms, Wasserdampf abzuleiten, wird durch die außen liegende Sperrschicht behindert. Zudem steht der Einsatz von erdölbasiertem Bitumen und energieintensiv hergestelltem Schaumglas im Gegensatz zu dem mit Lehm einhergehenden Gedanken einer nachhaltigen Bauweise.

Da der gezeigte Aufbau auf einem gebauten Objekt basiert und lediglich die Schichtstärken an die Anforderungen im Wohnbau angeglichen wurden, kann aber zumindest davon ausgegangen werden, dass das Bauteil technisch umsetzbar ist.

Eine alternative Ausführungsvariante dieses Bauteils zeigt der folgende Aufbau:<sup>101</sup>

<i>L_KAW2: Stampflehmwand</i>				
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\mu$ [-]
Kies / verdichteter Lehm				
Filtervlies	0,0001	300	0,220	1
XPS-Dämmplatte	0,100	30	0,035	200
Lehmschlämme	0,001			
Stampflehm	1,000	2300	1,500	10
<b>Gesamt</b>	<b>1,101</b>			

*Bauteilliste 27: Kelleraußenwände aus Lehm*

Bei diesem Aufbau wird die sperrende Bitumenschicht entfernt und durch eine Lehmschlämme als abdichtender Anstrich ersetzt. Im Bereich der Sickerschicht wird zudem stark verdichteter Lehm verbaut, der durch die darüber liegende Kieslage feucht gehalten wird. Dies ist notwendig, da der Lehm nur im feuchten Zustand abdichtend wirken kann. Der Aufbau erfüllt mit einem U-Wert von  $0,274\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  rechnerisch alle Anforderungen, die an Kellerbauteile gestellt werden. Ob die Standfestigkeit und Gebrauchstauglichkeit in der gebauten Realität gewährleistet ist, muss allerdings noch durch entsprechende Versuche getestet werden. Das Bauteil L\_KAW2 ist daher als Experimentalaufbau zu betrachten, dessen Umsetzbarkeit es durch weitere Forschungen zu prüfen gilt.

<sup>101</sup> Entwicklung anhand von Überlegungen gemeinsam mit dem Lehmbauer Andreas Breuss

### 3.4.6 Wiener Lehmbauteile

Die vorangegangenen Beispiele für Lehmbauteile geben einen Überblick über die mögliche Bauweise mit diesem Baustoff. Nicht alle der Bauteile erreichen jedoch die notwendigen bauphysikalischen Kennwerte, die für den Einsatz im Wiener Wohnungsbau erforderlich sind.

Die nachstehende Tabelle zeigt daher abschließend, welche Bauteile sich aufgrund ihres Wärme- und Schalldämmvermögens für den urbanen Wohnungsbau eignen und weiter behandelt werden.

Bauteil Nr.	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	U [W/(m <sup>2</sup> K)]	R <sub>w</sub> [dB]	L <sub>n,w</sub> [dB]	geeignet
L_AW1	2388,5	0,282	66	-	ja
L_AW2-1	2355,3	0,332	66	-	ja
L_AW2-2	2360,1	0,306	66	-	ja
L_AW3-1	2811,5	0,296	66	-	ja
L_AW3-2	2815,5	0,278	66	-	ja
L_AW4	287,1	0,319	54	-	ja
L_AW5-1	355,1	0,199	57	-	ja
L_AW5-2	365,6	0,181	57	-	ja
L_AW6	114,4	0,165	51	-	ja
L_AW7	565,2	0,224	63	-	ja
L_AW8	295,2	0,204	52	-	ja
L_WTW1	312,6	0,174	60	-	ja
L_WTW2	165,6	0,170	50	-	nein
L_WTW3	196,1	0,156	58	-	ja
L_WTW4	513,9	0,587	62	-	ja
L_GD1	135,5	0,172	66	53	ja
L_GD2	473,7	0,282	78	37	ja
L_GD3	179,4	0,170	70	41	ja
L_GD4	362,9	0,270	78	37	ja
L_GD5	277,6	0,181	66-78	37-53	ja
L_GD6	273,1	0,336	59-62	52-57	nein
L_SD1	283,7	0,177	51-53	-	ja
L_SD2	183,9	0,161	43-53	-	ja
L_FD1	150,1	0,155	43-51	-	ja
L_FD2	408,2	0,096	50-58	-	ja
L_FD3	448,8	0,129	60	-	ja
L_KAW1	2473,0	0,358	-	-	ja
L_KAW2	2303,0	0,274	-	-	ja

Tabelle 51: bauphysikalische Kennwerte der vorgestellten Bauteilaufbauten

Die in diesem Kapitel gezeigten Lehmbauteile erzielen alle den in der jeweiligen Bauteilkategorie geforderten Wärmeschutz. Im Bereich des Schallschutzes wird davon ausgegangen, dass die Wohnungstrennwand L\_WTW2 sowie die Geschosdecke L\_GD6 kein ausreichendes Schalldämmvermögen aufweisen, um im Wiener Wohnbau zugelassen zu werden. Diese beiden Bauteile werden daher im folgenden Kapitel nicht weiter behandelt.

## 4 Lehm macht Konkurrenz

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, ob Bauteile aus Lehm das Potential haben, mit den aktuell in Wien gängigen Bauweisen in Konkurrenz zu treten und sich im Wiener Bausektor als effiziente Alternative zu etablieren.

Um festzustellen, in welchen Bereichen Lehmteile gegenüber konventionellen Systemen Vorteile bieten, werden die in Kapitel 1 und 3 vorgestellten Bauteilaufbauten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen, ökologischen und ökonomischen Eigenschaften miteinander verglichen.

Durch die Untersuchung dieser drei Komponenten wird aufgezeigt, welche Stärken und Schwächen die jeweiligen Bauteile aufweisen und festgestellt, in welchen Bauteilkategorien eine Anwendung von Lehmbaustoffen besonders nachhaltig und wirtschaftlich ist.

### 4.1 Ein bauphysikalischer Vergleich

Bauteile, die in Wien umgesetzt werden, müssen unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich des Wärme-, Schall- und Brandschutzes genügen.

Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst die Wärmedurchgangskoeffizienten der in dieser Arbeit gezeigten Bauteile miteinander verglichen und gezeigt, inwieweit das Wärmedämmvermögen der Gebäudehülle von der gewählten Bauweise beeinflusst wird. Zur besseren Vergleichbarkeit wird neben den U-Werten der gewählten Aufbauten auch deren theoretischer Wärmedurchgang ohne Berücksichtigung der Wärmedämmung berechnet.

Zusätzlich wird das Wärmespeichervermögen der Außenbauteile analysiert und die Wärmeträgheit dieser Aufbauten ermittelt. Dadurch wird gezeigt, in welchem Ausmaß Lehmbaustoffe zum Schutz gegen sommerliche Überhitzung beitragen können.

Anschließend wird untersucht, ob die vorgestellten Außenbauteile das Potential haben, auch für Niedrig-, Niedrigst- und Passivhäuser eingesetzt zu werden und welches Maß an Wärmedämmung hierfür notwendig ist.

Im Bereich des Schallschutzes wird gezeigt, wie gut das Schalldämmvermögen der Trenn- und Außenbauteile gegenüber Luft- und Trittschall ist und welchen Einfluss der Einsatz von Lehmbaustoffen auf diese Performance nimmt. Die für diesen Vergleich herangezogenen Werte stammen aufgrund der in [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) beschriebenen Probleme bei der Berechenbarkeit zum Teil von Referenzbeispielen oder vereinfachten Berechnungen und sind im genannten Kapitel im Detail beschrieben. Die gezeigten Werte für  $R_w$  und  $L_{n,w}$  stellen daher nur ungefähre Abschätzungen des Verhaltens gegenüber Luft- und Trittschall dar und sind bei einer baulichen Umsetzung der Aufbauten durch geeignete Prüfstellen nachzuweisen.

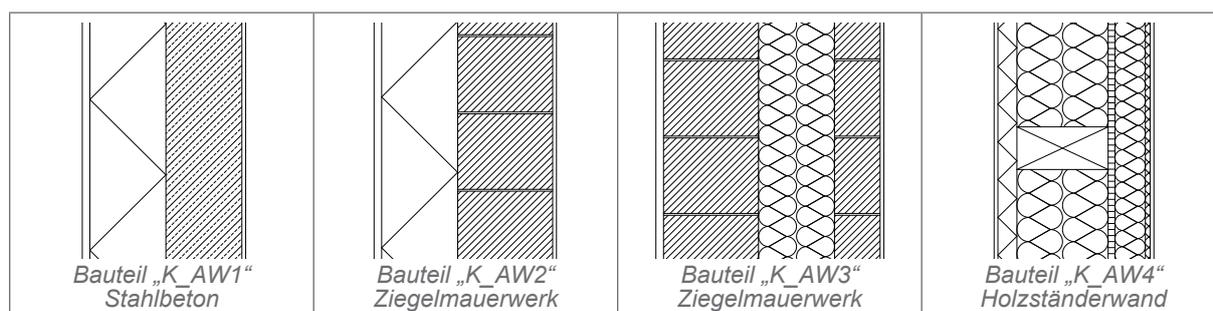
Im Bereich des Brandschutzes kann im Zuge dieser Arbeit kein konkreter Vergleich der hier gezeigten Bauteilaufbauten erfolgen, da die Feuerwiderstandsklassen von Lehmteilen derzeit nicht normativ festgelegt sind und nur durch entsprechende Brandversuche ermittelt werden können. Anstelle eines direkten Vergleichs der Brandeigenschaften der Lehmteile und konventioneller Aufbauten wird daher eine detaillierte Analyse des bereits erforschten Brandverhaltens von Lehmbaustoffen vorgenommen.

### 4.1.1 Wärmedurchgangskoeffizient der Außenbauteile

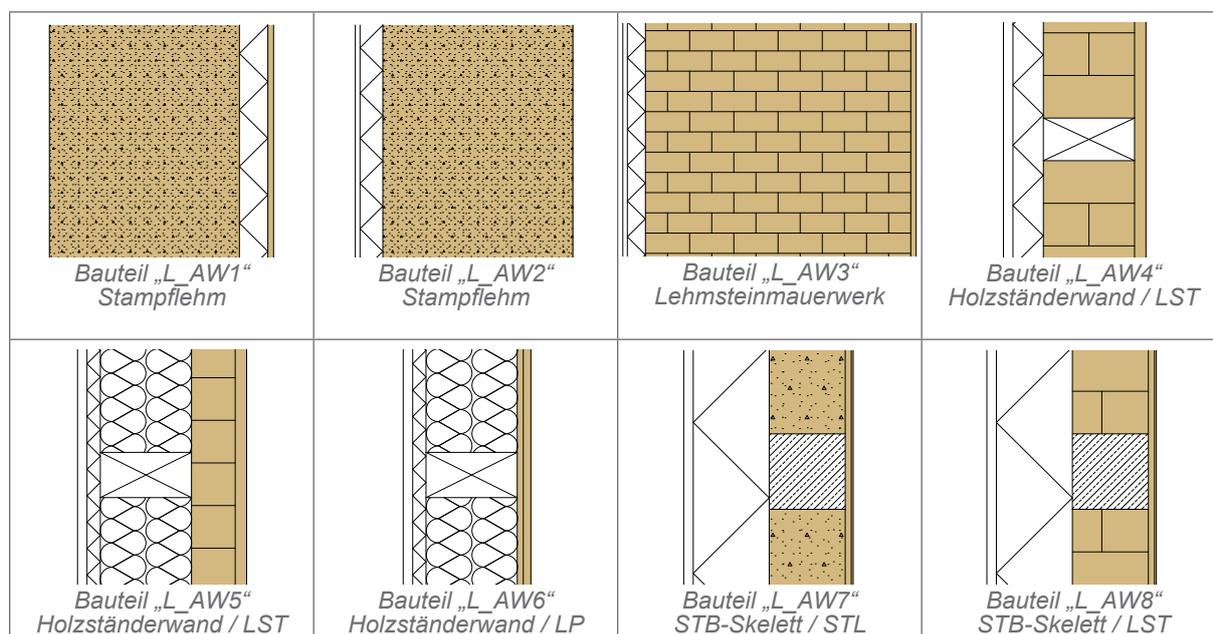
Vor allem im Sinne einer nachhaltigen Architektur nimmt die bauphysikalische Performance von Bauteilaufbauten eine wichtige Position ein, da sie den Wärmeverlust durch die Gebäudehülle und dadurch beispielsweise den Heizwärmebedarf steuert. Wenngleich auch für Innenbauteile wie Wohnungstrennwände oder Geschosdecken Anforderungen an den Wärmedurchgangskoeffizienten gestellt werden, ist die Bewertung des U-Wertes vor allem im Bereich der Gebäudehülle von Bedeutung. Außenwände müssen dabei einen U-Wert von  $0,350\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  unterschreiten, während für Dächer mit höchstens  $0,200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  strengere Anforderungen gelten.

### Außenwandsysteme

Im Bereich der Außenwandsysteme werden in Wien aktuell vor allem Bauteile mit einer Tragstruktur aus Stahlbeton oder Ziegel realisiert, während die Fassade meist durch ein Wärmedämmverbundsystem hergestellt wird. Kapitel 1.2.1 Außenwandsysteme zeigt einige gängige Ausführungsvarianten dieser Bausysteme und stellt zudem ein Beispiel aus dem Holzbau vor, der in den letzten Jahren ebenfalls wieder an Bedeutung im Bausektor gewonnen hat.



Diesen gängigen Bauteilausführungen stehen im Lehmbau massive Wandaufbauten aus Stampflehm oder Lehmsteinen sowie Skelettkonstruktionen aus tragendem Holz oder Stahlbeton und ausfachendem Lehm gegenüber, die in 3.4.1 Außenwandsysteme im Detail beschrieben sind.



Für die genannten Aufbauten wurden in den zuvor angeführten Kapiteln die jeweiligen U-Werte ermittelt. Die Berechnung erfolgt dabei für massive Bauteile über die Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Materialien und Wärmeübergangswiderstände der Oberflächen. Der so gebildete Wärmedurchgangswiderstand  $R_T$  bildet den Kehrwert des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$ .

$$R_i = d_i / \lambda_i \quad R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se} \quad U = 1 / R_T$$

Für die gezeigten Skelettbauteile wird aufgrund der inhomogenen Bauteilschichten eine Ermittlung des U-Wertes über den oberen und unteren Grenzwert durchgeführt, der die anteiligen Wärmedurchlasswiderstände unterschiedlicher Materialien innerhalb einer Bauteilschicht berücksichtigt.

Die nachstehende Grafik zeigt die auf diese Weise ermittelten U-Werte der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Außenwandsysteme.

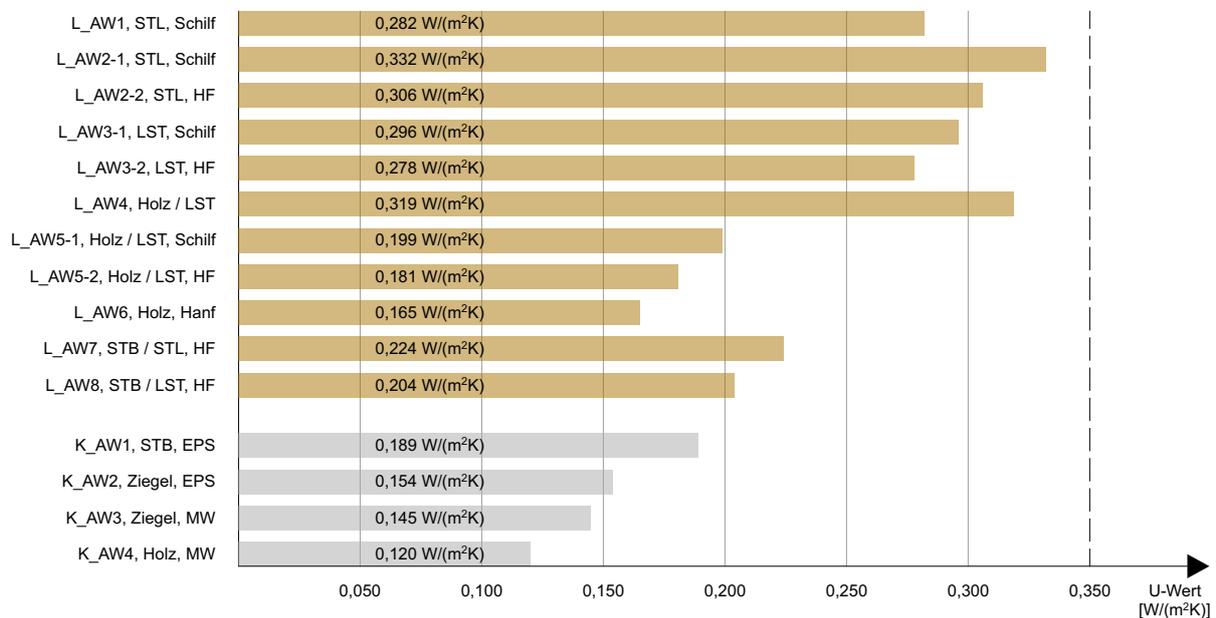


Abbildung 1: U-Werte der Außenwandsysteme

Die Wandaufbauten in Holzbauweise zeigen mit weniger als 0,200W/(m²K) alle relativ ähnliche U-Werte, wobei die Holz-Lehm-Wand mit Schilfdämmung aufgrund der besseren Wärmeleitfähigkeit von Schilf den höchsten Wert aufweist. Den besten U-Wert erreicht die konventionelle Holzständerwand mit Mineralwolledämmung und Holzwollegeleichtbauplatte, da diese zusätzlich zur Gefachdämmung über zwei Dämmschichten mit 5cm bzw. 8cm Stärke verfügt. Im Bereich der Lehmbauteile wird hingegen aufgrund des ohnehin sehr guten U-Wertes nur außerhalb der Tragstruktur eine dünne Wärmedämmung angeordnet, um ein Entstehen von Wärmebrücken zu vermeiden.

Die beiden Außenwände mit tragendem Stahlbetonskelett und Lehmausfachung liegen mit 0,204W/(m²K) bzw. 0,224W/(m²K) leicht über den U-Werten der Holzständerwände, erzielen jedoch aufgrund der dickeren Dämmschicht einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten als die massiven Lehmaufbauten.

Vergleicht man die U-Werte der hier vorgestellten, konventionellen Stahlbeton- und Ziegelwandsysteme mit den in [3.4.1 Außenwandsysteme](#) entwickelten Massivlehmwänden, werden auf den ersten Blick hingegen große Differenzen im jeweiligen Wärmedämmvermögen der Wände sichtbar. Wenngleich alle Bauteile den zulässigen Grenzwert ausreichend unterschreiten, weisen die Wandsysteme aus Stampflehm und Lehmsteinen dennoch wesentlich höhere U-Werte auf. Der Grund für diesen großen Unterschied liegt jedoch nicht in der schlechteren Performance von Lehm im Vergleich zu Ziegel oder Stahlbeton, sondern vielmehr in den gewählten Schichtstärken der jeweiligen Wärmedämmung.

Während sich die Dämmstärken im Bereich der konventionellen Bauteile aus den aktuell üblichen Bemessungen im Wiener Wohnbau ableiten, werden die Lehmteile mit wesentlich dünneren Wärmedämmungen ausgeführt und nur auf die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte bemessen. Dies liegt insbesondere an dem Bestreben, nicht mehr Ressourcen zu verbrauchen als nötig.

Zur besseren Vergleichbarkeit zeigt das folgende Diagramm daher den U-Wert der Außenwände bei einer einheitlichen Schichtstärke der Wärmedämmung von 20cm. Im Bereich der Holzbauteile wird zu diesem Zweck eine Reduktion der Tragstruktur von 24cm auf 20cm angenommen, die zusätzlich außerhalb dieser Schicht liegenden Wärmedämmungen werden nicht mehr berücksichtigt. Es wird an dieser Stelle allerdings darauf hingewiesen, dass eine geringere Dimensionierung der Tragstruktur statisch zu überprüfen ist und das Fehlen der zusätzlichen Dämmschicht unter Umständen zu Wärmebrücken führen kann.

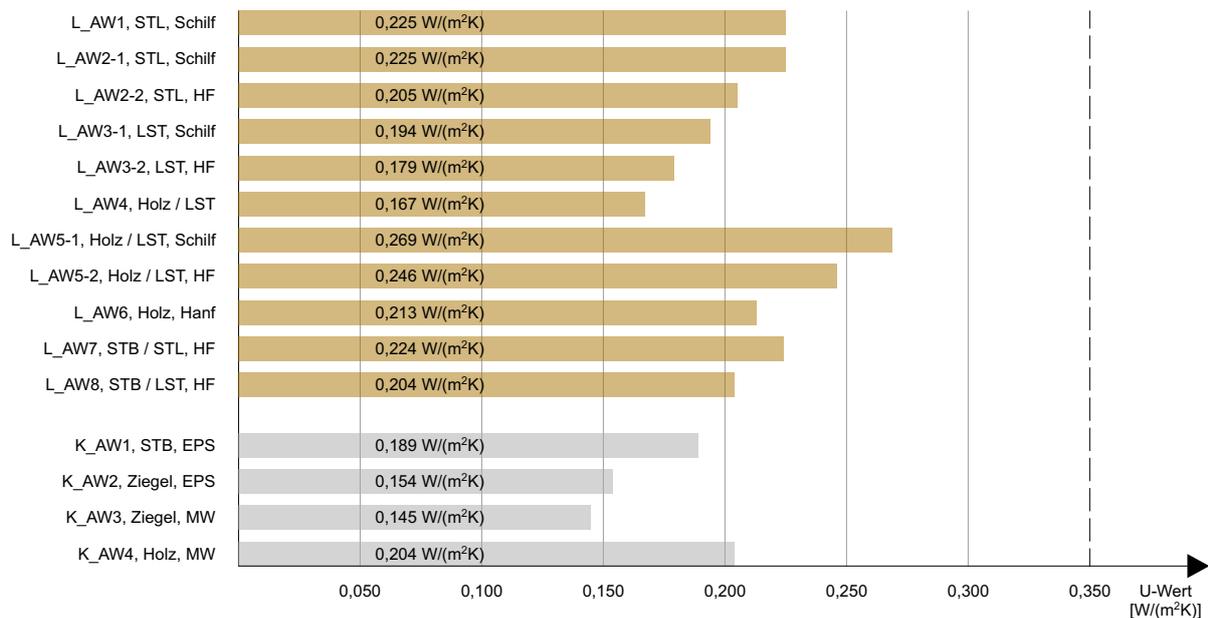


Abbildung 2: U-Werte der Außenwandsysteme bei einheitlicher Dämmstärke

Ein erneuter Vergleich der U-Werte bei gleicher Schichtstärke der Wärmedämmung zeigt bereits wesentlich geringere Differenzen im Wärmedämmvermögen der Bauteile. Diese sind insbesondere auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe zurückzuführen.

Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(mK)]
Schilfdämmung	0,056
Holzfaserdämmung	0,050
Hanfämmung	0,042
EPS-Dämmung	0,040
Mineralwolledämmung	0,040
Holzwohle-Leichtbauplatte	0,090

Tabelle 52: Wärmeleitfähigkeit einiger Wärmedämmstoffe<sup>102</sup>

Um den Einfluss der Wärmedämmung auf die Bauteilperformance neuerlich zu verdeutlichen, werden zusätzlich jene U-Werte ermittelt, die die Bauteile ohne Berücksichtigung der Wärmedämmung erzielen.

Für diese Berechnung wird eine einheitliche Schichtstärke der Tragstruktur von 20cm gewählt, der übrige Bauteilaufbau wird nicht verändert.

Die Holz- und Holz-Lehm-Bauteile mit Gefachdämmung werden in diesem Vergleich nicht berücksichtigt, da die Wärmedämmung den größten Baustoffanteil in diesen Aufbauten aufweist und ein Ersetzen der Dämmschicht durch eine Luftschicht keinen repräsentativen Vergleichswert zulässt.

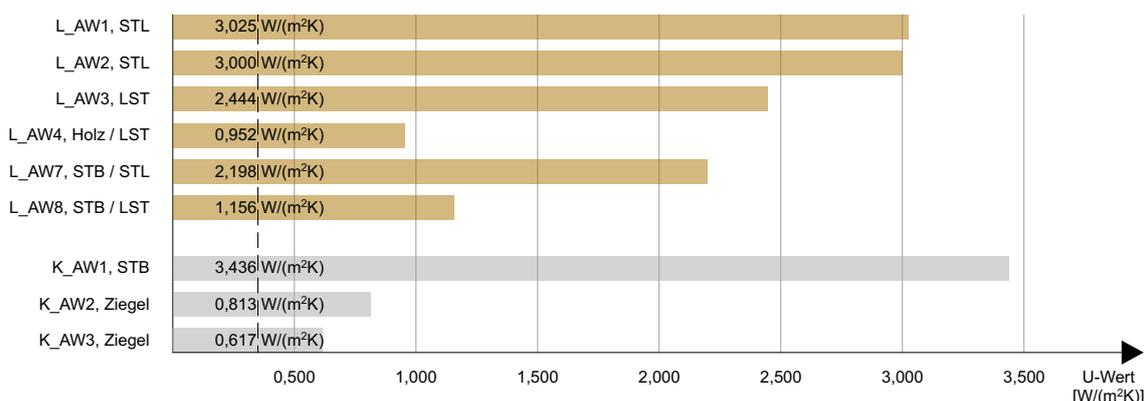


Abbildung 3: U-Werte einiger Außenwandsysteme ohne Wärmedämmung

Der Vergleich der U-Werte der Aufbauten ohne Wärmedämmung und mit 20cm starker Tragstruktur zeigt, dass die massiven Lehmbauteile L\_AW1 bis L\_AW3 ein besseres Wärmedämmvermögen aufweisen als die konventionelle Stahlbetonwand K\_AW1. Auch die Wandaufbauten aus tragendem Stahlbetonskelett und ausfachenden Lehmabauweisen erzielen einen niedrigeren U-Wert als das massive Stahlbetonbauteil. Der Aufbau L\_AW4 erreicht den niedrigsten Wärmedurchgangskoeffizienten der Lehmabauweisen und liegt nur geringfügig über den U-Werten der Ziegelwände.

Ein direkter Vergleich der U-Werte der Bauteile L\_AW4 und L\_AW8, die sich in ihrem Aufbau hauptsächlich durch das Material des Traggerüsts unterscheiden, verdeutlicht den Vorteil von Holz gegenüber Stahlbeton hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit. Trotz des nahezu gleichen Bauteilaufbaus erzielt die Kombination Holz-Lehm gegenüber der Ausführung Stahlbeton-Lehm einen um 0,21W/(m²K) niedrigeren U-Wert, da die Wärmeleitfähigkeit von Holz wesentlich geringer ist.

102 Baustoffkennwerte gemäß Herstellerangabe (vgl. Tabelle 9 / Tabelle 38)

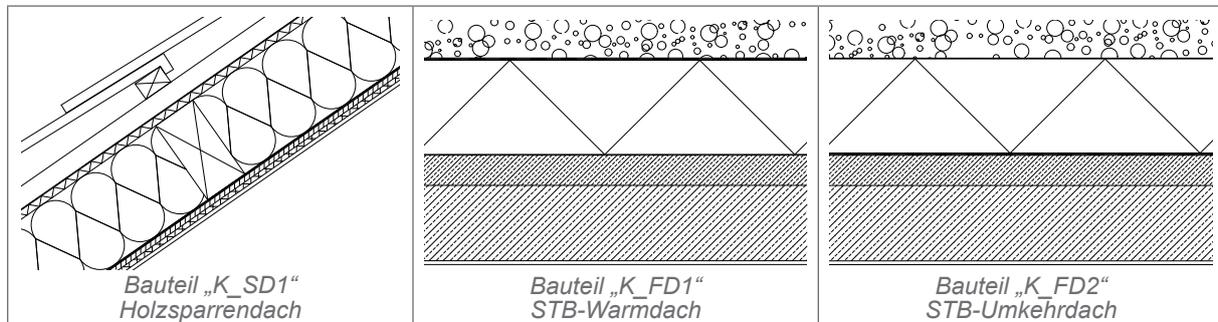
Baustoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(mK)]
Stahlbeton	2,300
Ziegelmauerwerk	0,195
Stampflehm	1,500
Lehmstein schwer	1,100
Leichtlehmstein	0,250
Holz, Fichte	0,110

Tabelle 53: Wärmeleitfähigkeit einiger Baustoffe<sup>103</sup>

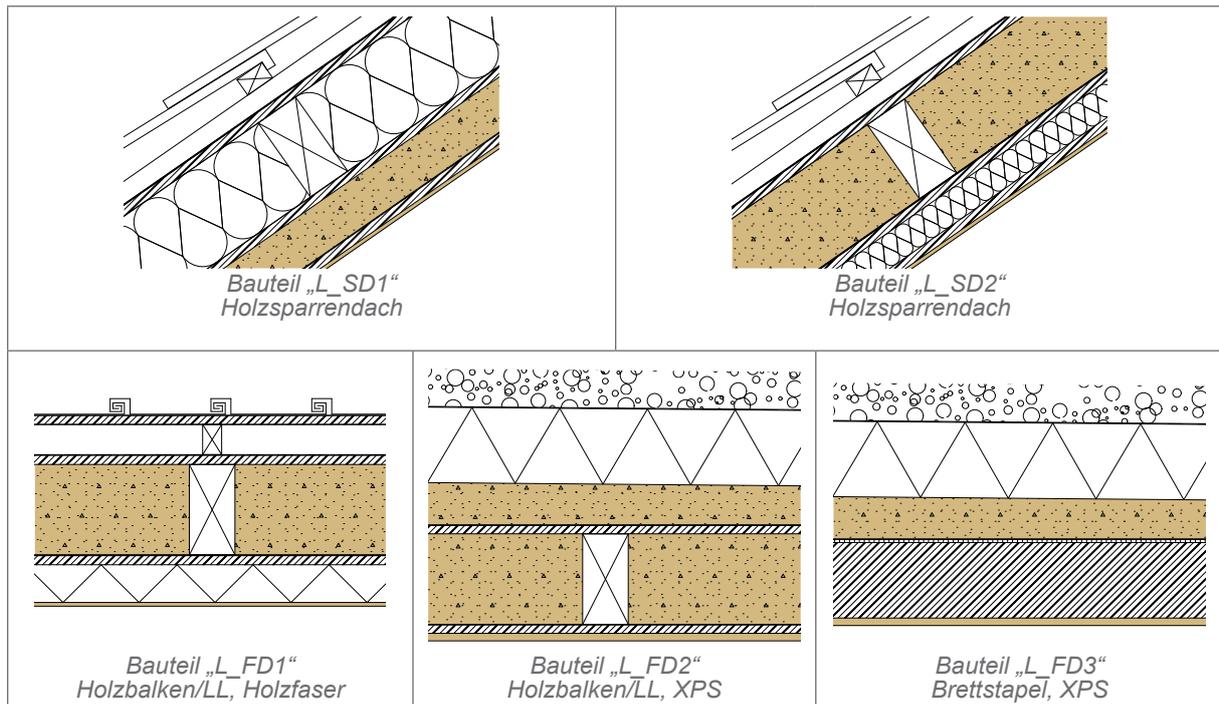
Die Analyse des Wärmedämmvermögens der beurteilten Bauteilaufbauten zeigt, dass die Performance der Lehmteile in diesem Bereich durchaus mit jener von Stahlbeton- oder Ziegelwänden vergleichbar ist. Ausschlaggebend für die wärmedämmenden Eigenschaften aller Bauteile ist insbesondere die Wahl des Wärmedämmstoffs. Wie der Vergleich der U-Werte bei gleicher Dämmstärke zeigt, erzielen die ökologischen Dämmstoffe der Lehmteile dabei nur geringfügig höhere Werte als die im Wiener Wohnbau vorrangig vertretene EPS-Dämmplatte.

### Dachaufbauten

Als Dachaufbauten haben sich in Wien im Bereich der Flachdächer aktuell vor allem Warm- und Umkehrdächer etabliert. Diese bestehen meist aus einer tragenden Stahlbetondecke und einer Wärmedämmung aus XPS-Platten. Steildächer werden hingegen insbesondere als Holzsparrendach mit Gefachdämmung ausgeführt und mit Dachziegeln oder Blecheindeckungen gedeckt. Kapitel [1.2.4 Dachaufbauten](#) zeigt einige dieser Dachausführungen im Detail.



Die im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelten Lehmteile orientieren sich in ihrer Ausführung insbesondere am Holzbau, der die tragende Funktion der Dächer übernimmt. Im Bereich der Steildächer werden in [3.4.4 Dachaufbauten](#) zwei Ausführungsvarianten eines Holzsparrendachs mit ausfachender Lehmschüttung vorgestellt. Die Flachdächer bestehen ebenfalls aus tragenden Holzbalken oder massiven Holzbauteilen. Der Lehm wird hier einerseits als ausfachendes Dämmmaterial eingesetzt, andererseits zur Herstellung des Dachgefälles genutzt.



Die Ermittlung der U-Werte der gezeigten Dachaufbauten erfolgt analog zu den Außenwänden nach den zuvor beschriebenen Berechnungsmethoden.

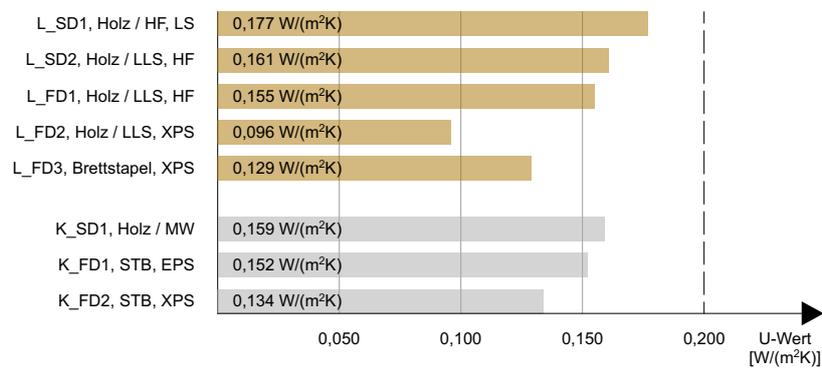


Abbildung 4: U-Werte der Dachaufbauten

Ein Vergleich der U-Werte der vorgestellten Steildächer zeigt, dass in diesem Bereich kaum Unterschiede zwischen dem konventionellen Dachaufbau und jenen aus Lehm vorliegen. Während das konventionelle Steildach über eine 24cm starke Mineralwollgedämmung und eine 2cm dicke Holzfaserdämmplatte verfügt, erreicht der Lehm-Dachaufbau L\_SD2 mit nur 8cm Holzfaserdämmung aufgrund des ausfachenden Leichtlehms nahezu dasselbe Wärmedämmvermögen. Gleichzeitig erhöht diese Leichtlehmschüttung die Speichermasse des Bauteils etwas.

Ähnlich wie bei den Steildächern erreichen auch im Bereich der Flachdächer alle gezeigten Aufbauten ähnliche U-Werte, obwohl die vorgestellten Lehmbauteile geringfügig dünnere Wärmedämmschichten aufweisen.

Ein erneuter Vergleich des Wärmedämmvermögens der Bauteile ohne zusätzliche Wärmedämmung zeigt, dass die Bauteilaufbauten aus Lehm eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als konventionelle Dachaufbauten.

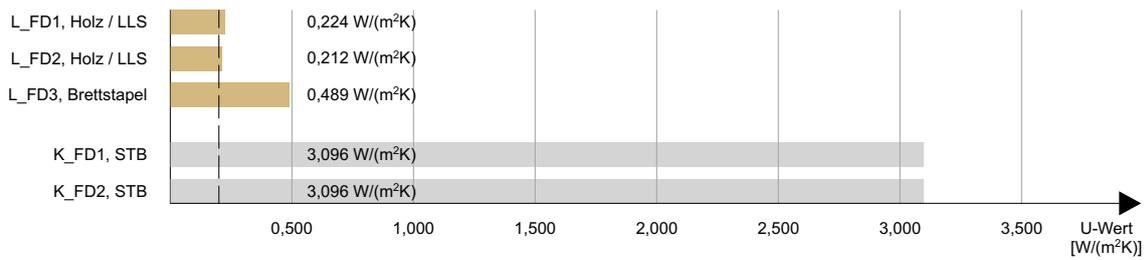
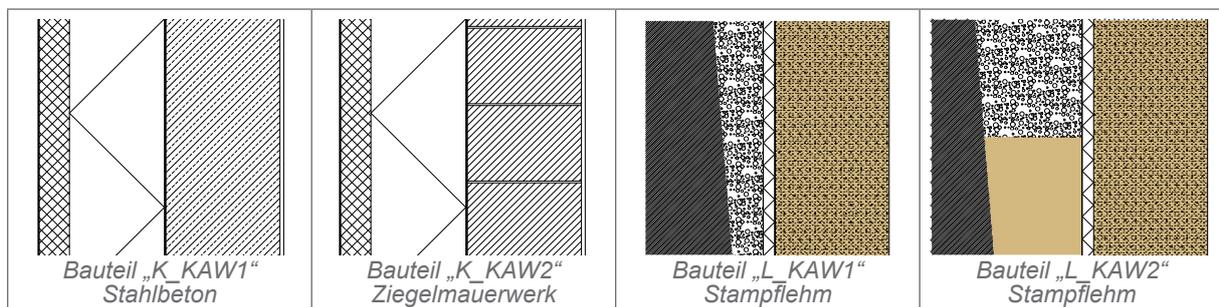


Abbildung 5: U-Werte der Flachdachaufbauten ohne Wärmedämmung

Analog zu den Außenwänden gilt dabei aber auch für Dachaufbauten, dass die wärmetechnische Performance der Bauteile in wesentlich höherem Maße vom Material und der Schichtstärke des Wärmedämmstoffs abhängt als von anderen Baustoffen des Aufbaus. Dennoch zeigt die Verfüllung der Holzzwischenräume mit Leichtlehm, dass der Baustoff in diesem Einsatzgebiet auch ohne Dämmstoff nahezu zur Einhaltung des maximal zulässigen U-Wertes genügt.

### Erdberührte Bauteile

Wie bereits in [3.4.5 Erdberührte Bauteile](#) angeführt, stellt sich die Ausführung von Lehmbauteilen im Kellerbereich als schwierig dar. Während Fundamente aus Lehm aufgrund ihrer statischen Eigenschaften kaum realisierbar scheinen, können in dem zuvor erwähnten Abschnitt jedoch zumindest zwei Beispiele von Kelleraußenwänden aus Stampflehm gezeigt werden.



Im konventionellen Wohnbau Wiens werden diese Wände vor allem aus Stahlbeton oder in Ziegelbauweise realisiert. Entsprechende Bauteilaufbauten werden in [1.2.5 Erdberührte Bauteile](#) im Detail vorgestellt.

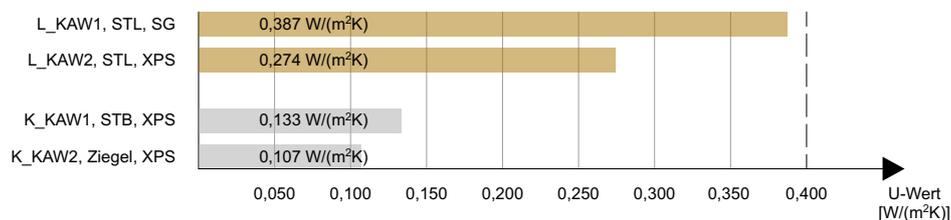


Abbildung 6: U-Werte der Kelleraußenwände

Ein erster Vergleich der U-Werte der vorgestellten Aufbauten legt die Vermutung nahe, dass das Wärmedämmvermögen der Lehmwände wesentlich schlechter ist als jenes der Stahlbeton- und Ziegelbauteile. Dies liegt jedoch wie bei den vorhergehenden Vergleichen an der Bemessung der Wärmedämmung, die im Vergleich zu den konventionellen Bauteilaufbauten wesentlich dünner ausfällt.

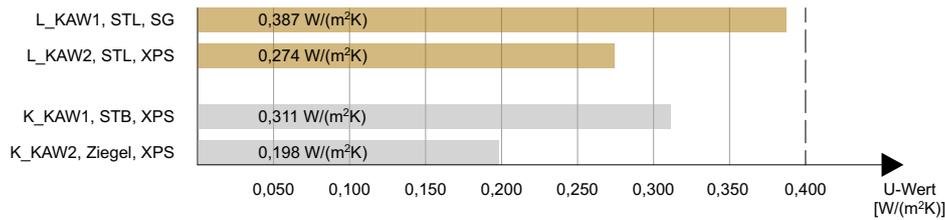


Abbildung 7: U-Werte der Kelleraußenwände bei einheitlicher Dämmstärke

Ein Vergleich der Bauteile bei einer einheitlichen Dämmstärke von 10cm zeigt, dass sich die U-Werte der Aufbauten nur in geringem Maße voneinander unterscheiden. Der etwas höhere Wärmedurchgangskoeffizient der Stampflehmwand mit Schaumglasdämmung ist auf die höhere Wärmeleitfähigkeit dieses Dämmstoffs zurückzuführen.

Wie die Analyse der Wärmedurchgangskoeffizienten der verschiedenen Außenbauteile zeigt, erreichen Lehmteile in Abhängigkeit vom gewählten Dämmstoff leicht dasselbe Wärmedämmvermögen wie aktuell in Wien vorherrschende Bausysteme. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit von Lehm im Vergleich zu Stahlbeton ermöglicht die Lehmbauweise zudem die Ausführung dünnerer Dämmstärken, was sich positiv auf den Ressourcenverbrauch und ökologischen Fußabdruck der Bauteile auswirkt.

Im Bereich der Holzbauweise zeigen sich nur geringfügige Unterschiede der U-Werte zwischen konventionellen Aufbauten und Bauteilen mit Lehmanteil. Der Vorteil der Ausführung mit Lehm liegt bei diesen Bauteilen vor allem in der Erhöhung der Speichermasse der Aufbauten, was im nachfolgenden Kapitel im Detail gezeigt wird.

#### 4.1.2 Wärmespeichervermögen

Das Wärmespeichervermögen von Bauteilen ist ein Indikator dafür, ob sich kurzfristige Schwankungen der Außentemperatur auf die Raumtemperatur auswirken. Wärmespeichernde Stoffe pendeln sich bei Temperaturschwankungen auf ein mittleres Temperaturniveau ein. Erwärmt sich ein solcher Baustoff durch eine hohe Außentemperatur, gibt er diese Wärme zeitversetzt an den Raum ab, sobald die Raumtemperatur auf ein niedrigeres Niveau abfällt. Analog wird die Speichermasse durch niedrige Temperaturen gekühlt, wodurch der Raum bei steigender Temperatur vor übermäßiger Hitze geschützt wird.<sup>104</sup> Diese Eigenschaft der zeitversetzten Temperaturregelung durch die Baumasse ist speziell im städtischen Wohnbau aufgrund der zunehmenden Hitzespitzen in den Sommermonaten wünschenswert. In Gebäuden, in denen eine rasche Erwärmung oder Abkühlung der Räume notwendig ist, sollte eine Wärmeträgheit der Baumasse hingegen vermieden werden.

Das Wärmespeichervermögen  $Q_s$  gibt die gespeicherte Wärmemenge in einem  $1\text{m}^2$  großen, plattenförmigen Bauteil der Dicke  $d$  bei einer Übertemperatur von  $1\text{K}$  an und ist abhängig von der Rohdichte und spezifischen Wärmekapazität des Baustoffes sowie der Bauteildicke.<sup>105</sup>

Die Fähigkeit eines Bauteils, Schwankungen der Außentemperaturen abzufedern, wird neben dem Wärmespeichervermögen auch von der Wärmedurchlasszahl  $\Lambda$

104 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.208

105 vgl. SCHROEDER 2010, S.265

beeinflusst. Diese gibt das Verhältnis von der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes und seiner Schichtdicke an und beschreibt den Wärmestrom, der durch  $1\text{m}^2$  der Bauteilschicht bei einer Temperaturdifferenz von  $1\text{K}$  hindurchgelassen wird.<sup>106</sup>

Die nachstehende Tabelle zeigt Werte für  $Q_s$  und  $\Lambda$  einiger Massivbaustoffe bei einer einheitlichen Schichtstärke von  $20\text{cm}$ . Die Kennwerte der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität entsprechen dabei den jeweiligen Herstellerangaben der Bauprodukte, die in den hier gezeigten Bauteilen eingesetzt werden.

Baustoff	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]	$c$ [ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]	$Q_s^*$ [ $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ ]	$\Lambda^*$ [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
Stampflehm	2300	1,500	1,00	460	7,500
Lehmstein	1800	1,100	1,00	360	5,500
Stahlbeton	2400	2,300	1,11	533	11,500
Ziegel	740	0,195	1,00	148	0,975
Fichtenholz	425	0,110	1,60	136	0,550
Brettstapelholz	500	0,130	1,60	160	0,650

\* bei einer Schichtstärke von  $0,2\text{m}$

Tabelle 54: Baustoffkennwerte

Aufgrund der größeren Rohdichte weisen die gezeigten Lehmbaustoffe sowie Stahlbeton ein wesentlich höheres Wärmespeichervermögen auf als Ziegel und Holz. Gleichzeitig ist die Wärmedurchlasszahl von Ziegel und Holz deutlich geringer als jene der schweren Lehmbaustoffe und des Stahlbetons.

Die Wärmespeicherung von Baustoffen ist umso wirksamer, je größer ihr Wärmespeichervermögen und je kleiner ihre Wärmedurchlasszahl ist. Der Quotient dieser beiden Indikatoren wird als Wärmeträgheit oder Auskühlverhalten bezeichnet. Eine hohe Wärmeträgheit bedeutet dabei, dass ein Bauteil nur langsam Wärme an seine Umgebung abgibt.<sup>107</sup>

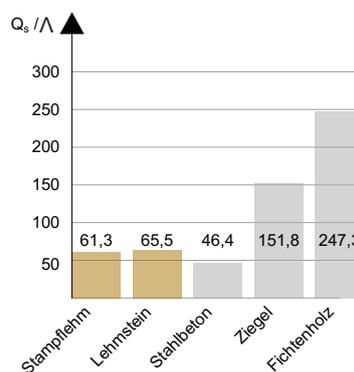


Abbildung 8: Wärmeträgheit einiger Baustoffe ( $d=20\text{cm}$ )

Die gezeigten Quotienten aus Wärmespeichervermögen und Wärmedurchlasszahl ergeben sich aus den zuvor berechneten Werten für eine  $20\text{cm}$  starke Bauteilschicht. Die so berechnete Wärmeträgheit zeigt die Auskühlzeit der jeweiligen Baustoffe.

Stampflehm und Lehmstein erzielen in diesem Vergleich bessere Werte als Stahlbeton und liegen etwas unter der Auskühlzeit von Ziegel. Wenngleich die

106 vgl. SCHROEDER 2010, S.265

107 vgl. ebenda, S.267f.

gezeigten Holzbaustoffe die mit Abstand längsten Auskühlzeiten erzielen, erreicht eine Holzständerwand in der Praxis aufgrund der Leichtbauweise keine derart gute Speicherwirkung. Der Massenanteil des Holztragwerks ist für ein entsprechendes Wärmespeichervermögen im Vergleich zum Anteil an Wärmedämmstoffen unzureichend. Wird anstelle des Dämmstoffs jedoch eine Ausfachung aus Lehm in das Holztraggerüst eingefügt, kann die Wärmeträgheit eines solchen Bauteils deutlich erhöht werden.

Um die Auswirkung der Speicherwirksamkeit der analysierten Baustoffe auf die in dieser Arbeit behandelten Bauteile zu zeigen, wird im Folgenden die speicherwirksame Masse der Außenbauteile mithilfe der Software *Archiphysik* berechnet. Sie stellt jene Masse dar, die die wirksame Wärmespeicherkapazität eines Bauteiles für eine Zeitperiode von 24 Stunden kennzeichnet<sup>108</sup> und beschreibt in diesem Zusammenhang das zeitabhängige, instationäre, thermische Verhalten eines Bauteils infolge von Temperaturschwankungen. Für mehrschalige Außenwände gelten dabei jene Schichten als wirksam, die zwischen dem Innenraum und der ersten Wärmedämmschicht zum Raum liegen.<sup>109</sup> Die speicherwirksame Masse wird insbesondere vom Raumgewicht der Baustoffe sowie der Position der Dämmschicht beeinflusst. Eine außen liegende Wärmedämmung verbessert dabei die Wärmespeicherkapazität, während Innendämmungen die speicherwirksame Masse verringern. Ab einer Schichtstärke von ca. 0,2m stagniert die Speicherfähigkeit eines Bauteils,<sup>110</sup> eine 1m starke Lehmwand weist somit keine höhere Speichermasse auf als eine Wand gleicher Ausführung mit 0,2m Bauteildicke.

### Außenwandsysteme

Bauteil	Speicherwirksame Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	
	innen	außen
K_AW1 (STB)	260,10	45,85
K_AW2 (Ziegel)	50,36	44,78
K_AW3 (Ziegel)	70,24	75,63
K_AW4 (Holz)	15,28	47,97
L_AW1 (STL)	67,29	208,09
L_AW2-1 (STL)	208,09	41,26
L_AW2-2 (STL)	208,09	44,08
L_AW3-1 (LST)	161,49	40,52
L_AW3-2 (LST)	161,49	43,74
L_AW4 (Holz / LST)	92,86	36,56
L_AW5-1 (Holz / LST)	180,00	41,53
L_AW5-2 (Holz / LST)	179,35	43,86
L_AW6 (Holz / LP)	54,63	38,08
L_AW7 (STB / STL)	81,29	16,85
L_AW8 (STB / LL-LST)	48,12	16,85

Tabelle 55: Speicherwirksame Masse der Außenwandsysteme

Die höchste speicherwirksame Masse der gezeigten Außenwandsysteme wird von

108 vgl. ÖNORM B8110-3 2012, S.5

109 vgl. o.A.: *Wirksame Wärmespeicherfähigkeit*

110 vgl. AUSTROTHERM 2010, S.7

der konventionellen Stahlbetonwand erreicht. Gleichzeitig weist Stahlbeton jedoch die geringste Wärmeträgheit auf, gibt die gespeicherte Wärme also deutlich schneller wieder ab als Lehmbaustoffe oder Ziegel.

Die Bauteilaufbauten aus Stampflehm erzielen eine ähnlich große speicherwirksame Masse wie die Stahlbetonwand, können die aufgenommene Wärme aufgrund der längeren Auskühlzeit jedoch wesentlich länger speichern als diese.

Die speicherwirksame Masse der Lehmsteinwände ist etwas geringer als jene der Stampflehmwände, liegt aber immer noch deutlich über dem Wert der Ziegelwände. In Kombination mit der größeren Wärmeträgheit erzielen auch diese Wände ein besseres Verhalten hinsichtlich der Wärmespeicherung als Stahlbeton.

Besonders interessant ist der Vergleich der speicherwirksamen Masse der klassischen Holzständerwand K\_AW4 und der Holz-Lehm-Wände L\_AW4 bis L\_AW6. Während die konventionelle Holzkonstruktion mit 15,28kg/m<sup>2</sup> kaum über wirksame Speichermasse verfügt, erreichen die Kombinationen von Holz und Lehm bis zu 10-fach höhere Werte. Bereits das Aufbringen eines 2cm starken Lehmputzes verdoppelt die wirksame Wärmespeicherkapazität des Wandaufbaus. Während die Erhöhung der speicherwirksamen Masse bei den Bauteilen L\_AW4 und L\_AW5 mit einer deutlichen Erhöhung des Flächengewichts der Bauteile einhergeht, erzielt der Aufbau L\_AW6 trotz besserer Wärmespeicherung ein nur geringfügig höheres Gewicht als die konventionelle Holzständerwand.

### Dachaufbauten

Bauteil	Speicherwirksame Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	
	innen	außen
K_SD1 (Holzsparrendach)	29,54	10,86
K_FD1 (STB Warmdach)	245,31	99,19
K_FD2 (STB Umkehrdach)	245,01	98,96
L_SD1 (Holzsparrendach)	48,74	25,03
L_SD2 (Holzsparrendach)	41,47	23,75
L_FD1 (Holzbalkendach)	32,88	23,76
L_FD2 (Holzbalkendach)	40,03	98,94
L_FD3 (Brettstapeldach)	62,99	98,92

*Tabelle 56: Speicherwirksame Masse der Dächer*

Im Bereich der Flachdächer erreichen analog zu den Außenwandsystemen auch hier die Stahlbetonbauteile die höchste speicherwirksame Masse. Dies liegt mitunter daran, dass die Flachdachaufbauten aus Holz und Lehm vorrangig mit Leichtlehmbaustoffen ausgefacht werden, die eher auf die Wärmedämmung als Wärmespeicherung abzielen. Gleichzeitig gilt aber auch hier, dass Stahlbeton zwar eine höhere Speichermasse erzielt, gleichzeitig aber eine geringere Wärmeträgheit aufweist als die Lehmbaustoffe.

Im Vergleich mit konventionellen Holzdachstühlen, die insbesondere bei den Steildächern Anwendung finden, zeigt sich, dass der Einsatz von Lehm die Wärmespeicherkapazität dieser Bauteile deutlich erhöht. Während das konventionelle Holzsparrendach K\_SD1 eine innenliegende speicherwirksame Masse von 29,54kg/m<sup>2</sup> aufweist, erreichen die beiden Lehm-Steildächer einen nahezu doppelt so hohen Wert. Dies zeigt, dass Lehm insbesondere im Leichtbau eine deutliche Verbesserung des Schutzes vor sommerlicher Überhitzung erzielen kann.

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Wärmespeicherung von Lehmbaustoffen als sehr gut bewertet werden kann. Wenngleich Stahlbetonbauteile auf den ersten Blick eine höhere Speichermasse erzielen, ist ihre Gesamtperformance hinsichtlich der Wärmedämmung aufgrund der geringeren Wärmeträgheit keinesfalls besser als jene der Lehmbauteile. Insbesondere im Bereich des Holzbaus haben Lehmbaustoffe das Potential, bereits in geringen Ausführungsstärken sommerlicher Überhitzung entgegenzuwirken. Wenngleich schwere Lehmbaustoffe hier bessere Werte erzielen als Leichtlehmprodukte, verbessern auch diese die Wärmespeicherung im Vergleich zu konventionellen Holzaufbauten deutlich.

### 4.1.3 Erfüllung des Niedrigenergie-, Niedrigstenergie- und Passivhausstandards

Im Zuge eines wachsenden Bewusstseins für eine klimaschonende und nachhaltige Lebensweise werden auch an Gebäude immer höhere Anforderungen gestellt, um den Energieverbrauch zu reduzieren und so Kosten und Ressourcen zu sparen. Im Bereich energieeffizienter Gebäude haben sich dabei eine Vielzahl von Standards entwickelt, die sich vor allem durch ihre Energiekennzahl voneinander unterscheiden. Diese gibt den jährlichen Heizwärmebedarf je Quadratmeter Nutzfläche an<sup>111</sup> und wird im Zuge des Energieausweises ermittelt. In Österreich sind in diesem Zusammenhang vor allem der Niedrig-, Niedrigst- und Passivhausstandard von Bedeutung, die im Energieausweis den Klassen A++ bis B entsprechen.

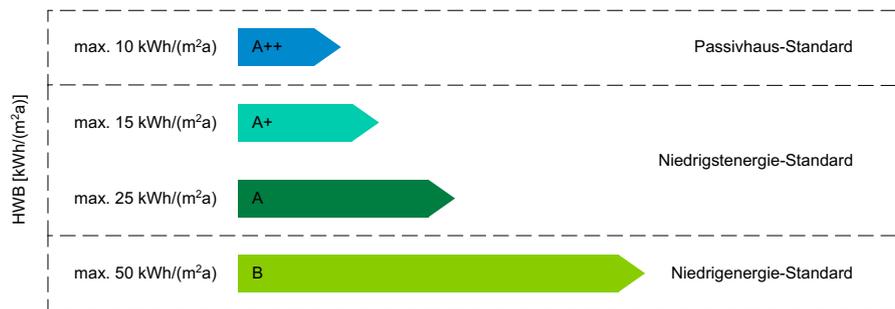


Abbildung 9: Energieeffizienzklassen nach Heizwärmebedarf

Als **Niedrigenergiehaus** wird ein Gebäude bezeichnet, dessen Heizwärmebedarf unter  $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  liegt.<sup>112</sup> Dies entspricht beispielsweise einem Heizölverbrauch von weniger als  $4\text{L}$  pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr.<sup>113</sup>

Das **Niedrigstenergiehaus** stellt eine Verbesserung zum Niedrigenergiehaus dar und muss einen Heizwärmebedarf von weniger als  $25\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  aufweisen. Gemäß der EU-Richtlinie 2010/31/EU<sup>114</sup> müssen alle nach dem 31.12.2020 in der europäischen Union errichteten Gebäude in Niedrigstenergiebauweise ausgeführt werden.<sup>115</sup>

Eine Steigerung zu diesem Energiestandard stellt das **Passivhaus** dar, dessen Heizwärmebedarf weniger als  $10\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  beträgt<sup>116</sup> und einen Heizölverbrauch von nicht einmal  $1,5\text{L}/(\text{m}^2\text{a})$  aufweist.<sup>117</sup>

111 vgl. o.A.: *Energiekennzahl*

112 vgl. OIB-Richtlinie 6 2019, S.10

113 vgl. o.A.: *Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Niedrigstenergiehaus?*

114 Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)

115 vgl. OIB-Richtlinie 6 2019, S.4

116 vgl. ebenda, S.10

117 vgl. o.A.: *Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Niedrigstenergiehaus?*

Die Herstellung dieser effizienten Gebäudetypen erfolgt einerseits über ein hohes Maß an Wärmedämmung an den Außenbauteilen und eine Verglasung mit geringem Wärmedurchlass, andererseits über die Kubatur und Ausrichtung des Gebäudes. Zusätzlich muss eine Luftdichtheit der Gebäudehülle sowie Wärmebrückenfreiheit gegeben sein.

An die Haustechnik werden dabei mindestens ebenso hohe Anforderungen gestellt wie an die bauliche Substanz derart energieeffizienter Gebäude. Um den Energiebedarf möglichst gering zu halten, werden Niedrig-, Niedrigst- und Passivhäuser mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung ausgestattet, wodurch die Lüftungswärmeverluste minimiert werden. Die Wärmeerzeugung erfolgt in diesen Häusern vor allem über Systeme, die erneuerbare Energien nutzen, wobei die Leistung des gewählten Heizsystems möglichst der tatsächlichen Heizlast des Gebäudes entsprechen soll.

Das Erreichen einer bestimmten Energiekennzahl und somit das Erfüllen des Niedrig-, Niedrigst- oder Passivhausstandards hängt von dem Zusammenspiel der beschriebenen Faktoren ab und kann wirtschaftlich nicht allein über eine ausreichend wärmedämmte Gebäudehülle erreicht werden.

Da im Zuge dieser Diplomarbeit jedoch keine konkreten Bauwerke analysiert, sondern nur einzelne Bauteile betrachtet werden, ist eine aussagekräftige Beurteilung hinsichtlich der Erreichung der beschriebenen Energiestandards nicht möglich. Dennoch wird an dieser Stelle untersucht, ob die in dieser Arbeit gezeigten Bauteile zumindest die notwendigen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen, um in Gebäuden, die Niedrig-, Niedrigst- oder Passivhausstandard erreichen sollen, eingesetzt werden zu können. Ob die Bauteile die entsprechenden Standards auch in der Realität erreichen, hängt wie beschrieben auch von vielen anderen Faktoren ab und muss im Zuge der Gebäudeplanung im Detail untersucht werden.

Bezüglich der notwendigen U-Werte zur Erreichung der beschriebenen Gebäudestandards liegen aktuell keine allgemein gültigen Grenzwerte vor. Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass abhängig von der gewünschten Energiekennzahl zumindest folgende U-Werte einzuhalten sind:

Energiestandard	$U_{\text{Außenwand}}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$U_{\text{Dach}}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Niedrigenergiehaus	0,25	0,15
Niedrigstenergiehaus	0,18	0,12
Passivhaus	0,15	0,10

Tabelle 57: empfohlene U-Werte für Außenwände und Dächer<sup>118, 119, 120</sup>

### Erfüllung des Niedrigenergie-Standards

Um ein Gebäude als Niedrigenergiehaus auszuführen, sollten Außenwände einen U-Wert von 0,25W/(m<sup>2</sup>K), Dächer einen U-Wert von 0,15W/(m<sup>2</sup>K) nicht überschreiten. Die in [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) und [3.4 Lehm im Detail – Bauteilaufbauten](#) gezeigten Wand- und Dachaufbauten liegen nur teilweise unterhalb dieser Grenzwerte.

Im Bereich der Außenwandssysteme erzielen sämtliche der gezeigten konventionellen Wandaufbauten einen ausreichend niedrigen U-Wert, da ihnen vorrangig Bauteile

118 o.A.: *Das Niedrigenergiehaus*

119 LAND OBERÖSTERREICH, S.3

120 o.A.: *Wände, Fenster und Decken im Passivhaus*

aus dem Niedrigenergiehaus-Sektor zugrunde liegen. Die Lehm-Außenwände sind hingegen vorrangig auf die Einhaltung der derzeit gesetzlich festgelegten U-Werte ( $U_{AW} < 0,35W/(m^2K)$ ,  $U_D < 0,2W/(m^2K)$ ) bemessen, um nicht mehr Material einzusetzen als notwendig. Aus diesem Grund kann der Niedrigenergie-Standard mit der gewählten Dämmstärke nicht von allen Aufbauten eingehalten werden.

Die Lehmbauteile L\_AW5-1 bis L\_AW8 erzielen aufgrund der 20-28cm starken Dämmschicht ausreichend geringe U-Werte zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards, während die Wärmedämmung der übrigen Bauteile mit einer Stärke von 8-15cm hierfür zu dünn bemessen ist.

Hinsichtlich der gewählten Dachaufbauten zeigt sich, dass nur das Umkehrdach K\_FD2 sowie die Lehmdächer L\_FD2 und L\_FD3 einen ausreichenden Wärmeschutz aufweisen, um die Anforderungen des Niedrigenergie-Standards zu erfüllen. Dies ist vor allem auf die Wahl des Dämmstoffes XPS zurückzuführen, der im Vergleich zu den in den übrigen Bauteilen eingesetzten Wärmedämmungen eine besonders niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Wenngleich nicht alle Bauteile in ihrer hier gezeigten Ausführung den notwendigen U-Wert zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards unterschreiten, kann dies durch eine Erhöhung der Dämmstärke für alle Aufbauten erreicht werden.

Zur Berechnung der hierfür notwendigen Wärmedämmung wird im Bereich der Holz- und Holz-Lehmteile nur die neben der Gefachdämmung zusätzliche Dämmschicht neu berechnet. Die Angabe der Dämmstärke in der nachstehenden Tabelle zeigt daher die notwendige Schichtstärke dieser zusätzlichen Dämmung bei einer vorhandenen Gefachdämmung von 24cm bzw. 29cm.

<i>notwendige Wärmedämmstärke der Außenwände zur Erreichung von <math>U &lt; 0,25W/(m^2K)</math></i>					
Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_AW1	0,150	0,176	1,180	1,206	0,026
L_AW2-1	0,120	0,175	1,145	1,200	0,055
L_AW2-2	0,120	0,157	1,145	1,182	0,037
L_AW3-1	0,100	0,135	1,655	1,690	0,035
L_AW3-2	0,100	0,120	1,655	1,675	0,020
L_AW4	0,080	0,117	0,375	0,412	0,037
L_AW5-1 <sup>1</sup>	0,035	0,000	0,445	0,410	- 0,035
L_AW5-2 <sup>1</sup>	0,035	0,000	0,445	0,410	- 0,035
L_AW6 <sup>1</sup>	0,020	0,000	0,321	0,301	- 0,020
L_AW7	0,200	0,177	0,446	0,423	- 0,023
L_AW8	0,200	0,154	0,446	0,400	- 0,046
K_AW1	0,200	0,148	0,430	0,378	- 0,052
K_AW2	0,200	0,101	0,480	0,381	- 0,099
K_AW3	0,200	0,085	0,600	0,485	- 0,115
K_AW4 <sup>1</sup>	0,080	0,000	0,421	0,341	- 0,080

1: ein ausreichender Wärmeschutz wird auch ohne die zweite Dämmebene erreicht

Tabelle 58: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,25W/(m^2K)$

*notwendige Wärmedämmstärke der Dächer zur Erreichung von  $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$*

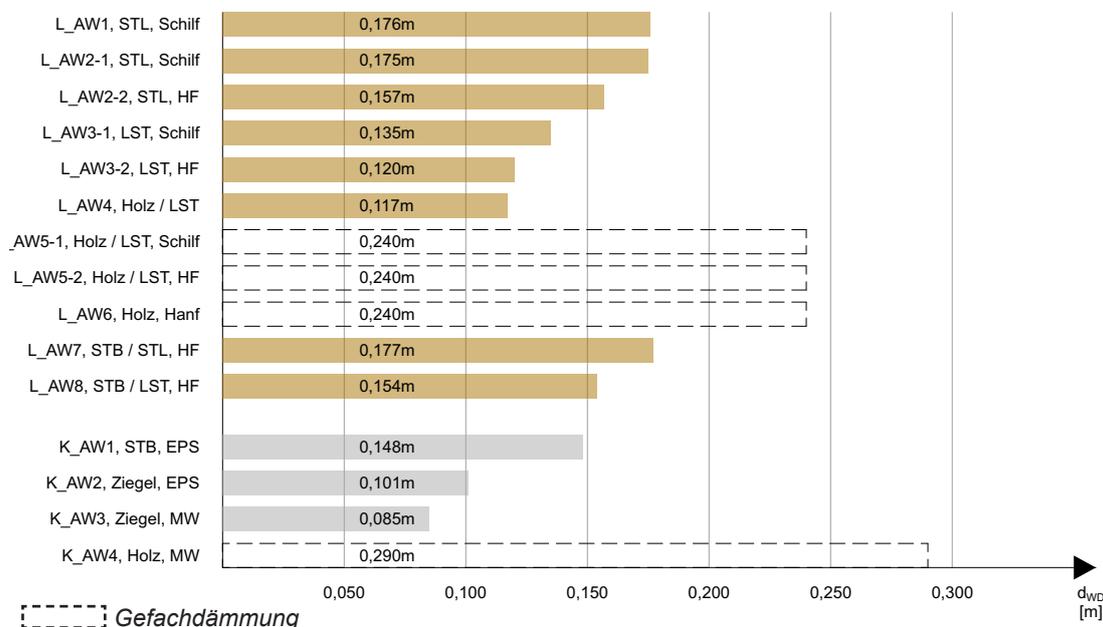
Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_SD1 <sup>1</sup>	0,000	0,050	0,565	0,615	0,050
L_SD2	0,080	0,105	0,525	0,550	0,025
L_FD1	0,100	0,110	0,476	0,486	0,010
L_FD2	0,200	0,068	0,723	0,591	- 0,132
L_FD3	0,200	0,162	0,653	0,615	- 0,038
K_SD1	0,020	0,038	0,427	0,445	0,018
K_FD1	0,250	0,254	0,642	0,646	0,004
K_FD2	0,250	0,222	0,642	0,614	- 0,028

1: Anordnung einer zusätzlichen Holzfaserdämmung an der Bauteilaußenseite

Tabelle 59: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Eine Berechnung der Schichtstärke der jeweiligen Wärmedämmung zur Einhaltung der für den Niedrigenergie-Standard notwendigen U-Werte zeigt, dass bereits eine Erhöhung der Dämmschicht um 4-6cm im Bereich der Außenwände und um 0,4-5cm im Bereich der Dächer ausreichend ist, um die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile auf die voraussichtlich notwendigen Grenzwerte zu reduzieren. Einige Bauteile unterschreiten diese Werte auch ohne eine Änderung der Wärmedämmstärke und können selbst mit geringerer Wärmedämmung einen ausreichend guten U-Wert erzielen.

*Notwendige Dämmstärken der Außenwände*



[---] Gefachdämmung

Abbildung 10: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards (AW)

Im Bereich der Außenwände zeigt sich, dass die benötigte Schichtdicke der Wärmedämmung für massive Bauteile bei 10-18cm liegt. Die etwas höheren Werte der Lehmbauteile sind hier – wie bereits in 4.1.1 *Wärmedurchgangskoeffizient der Außenbauteile* beschrieben – auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe zurückzuführen.

Ein Vergleich der Holz- und Holz-Lehmwände verdeutlicht, dass das Verfüllen der Tragstruktur mit 24cm Dämmstoff bereits ausreicht, um den für den Niedrigenergie-Standard notwendigen U-Wert von  $0,25\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu unterschreiten. Die in diesen Bauteilen angeordnete, außenliegende Wärmedämmung dient vorrangig der Vermeidung von Wärmebrücken.

### Notwendige Dämmstärken der Dachaufbauten

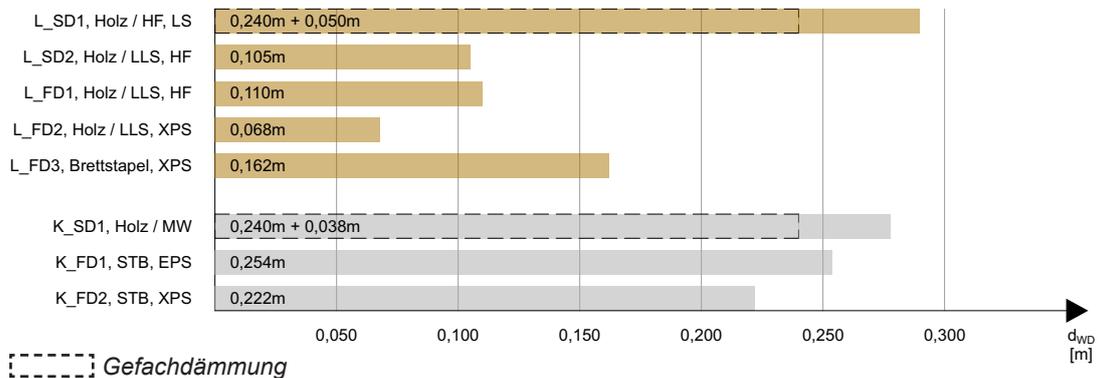


Abbildung 11: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards (Dach)

Hinsichtlich der Dachaufbauten kann die Schichtstärke der Wärmedämmung für die Bauteile K\_FD2 sowie L\_FD2 und L\_FD3 um einige Zentimeter verringert werden, ohne den zulässigen U-Wert von  $0,15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu überschreiten. Das Flachdach L\_FD1 erzielt diesen U-Wert bereits bei einer Erhöhung der Wärmedämmung um 1cm, während die Dämmschicht des konventionellen Warmdachs K\_FD1 um 4cm erhöht werden muss. Aufgrund des hohen Anteils an Leichtlehmbaumaterialien kann die Schichtstärke der Wärmedämmung in den Lehm-Flachdächern allgemein geringer dimensioniert werden als im Bereich der konventionellen Stahlbetonaufbauten.

Für die Steildächer zeigt sich hingegen, dass die Wärmedämmung der Holz-Lehm-Dachstühle etwas größer zu bemessen ist als für das konventionelle Holzsparrdach. Dies liegt insbesondere an der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle-Gefachdämmung im Vergleich zu Holzfasern und Leichtlehm.

### Erfüllung des Niedrigstenergie-Standards

Zur Erzielung des Niedrigstenergie-Standards wird empfohlen, einen U-Wert von  $0,18\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Außenwände und  $0,12\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Dächer zu unterschreiten.

Die Lehm-Außenwände L\_AW5-2 und L\_AW6 sowie die konventionellen Wandaufbauten K\_AW2, K\_AW3 und K\_AW4 erreichen diesen Wert in der hier gezeigten Ausführung bereits, während die übrigen Außenwandssysteme nur unter einer Erhöhung der Wärmedämmung ausreichend geringe U-Werte erzielen.

Im Bereich der Dachaufbauten zeigt sich, dass nur das Lehm-Flachdach L\_FD2 einen U-Wert von  $0,12\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  unterschreitet, ohne die Schichtstärke der Wärmedämmung zu erhöhen.

*notwendige Wärmedämmstärke der Außenwände zur Erreichung von  $U < 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$*

Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_AW1	0,150	0,263	1,180	1,293	0,113
L_AW2-1	0,120	0,263	1,145	1,288	0,143
L_AW2-2	0,120	0,234	1,145	1,259	0,114
L_AW3-1	0,100	0,222	1,655	1,777	0,122
L_AW3-2	0,100	0,198	1,655	1,753	0,098
L_AW4	0,080	0,181	0,375	0,476	0,101
L_AW5-1	0,035	0,063	0,445	0,473	0,028
L_AW5-2	0,035	0,035	0,445	0,445	0,000
L_AW6 <sup>1</sup>	0,020	0,000	0,321	0,301	- 0,020
L_AW7	0,200	0,255	0,446	0,521	0,055
L_AW8	0,200	0,232	0,446	0,498	0,032
K_AW1	0,200	0,211	0,430	0,441	0,011
K_AW2	0,200	0,163	0,480	0,443	- 0,037
K_AW3	0,200	0,147	0,600	0,547	- 0,053
K_AW4 <sup>1</sup>	0,080	0,000	0,421	0,341	- 0,080

1: ein ausreichender Wärmeschutz wird auch ohne die zweite Dämmebene erreicht

*Tabelle 60: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$*

*notwendige Wärmedämmstärke der Dächer zur Erreichung von  $U < 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$*

Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_SD1 <sup>1</sup>	0,000	0,134	0,565	0,699	0,134
L_SD2	0,080	0,193	0,525	0,638	0,113
L_FD1	0,100	0,194	0,476	0,570	0,094
L_FD2	0,200	0,125	0,723	0,648	- 0,075
L_FD3	0,200	0,220	0,653	0,673	0,020
K_SD1	0,020	0,120	0,427	0,527	0,100
K_FD1	0,250	0,320	0,642	0,712	0,070
K_FD2	0,250	0,280	0,642	0,672	0,030

1: Anordnung einer zusätzlichen Holzfaserdämmung an der Bauteilaußenseite

*Tabelle 61: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$*

Um Niedrigenergie-Standard zu erreichen, muss die Wärmedämmung etwas stärker erhöht werden als zur Einhaltung der Niedrigenergiebauweise.

In Abhängigkeit vom gewählten Wärmedämmstoff werden im Bereich der massiven Außenwandsysteme Wärmedämmstärken von 15-26cm benötigt, für die Holz- und Holz-Lehmbauteile ist zusätzlich zur Gefachdämmung eine Dämmschicht von bis zu 6,3cm notwendig.

Im Bereich der Flachdachaufbauten muss die Wärmedämmung eine Stärke von 12,5-32cm aufweisen, für Steildächer wird neben der 24cm dicken Gefachdämmung eine zusätzliche Dämmlage von 12-19cm benötigt.

## Notwendige Dämmstärken der Außenwände

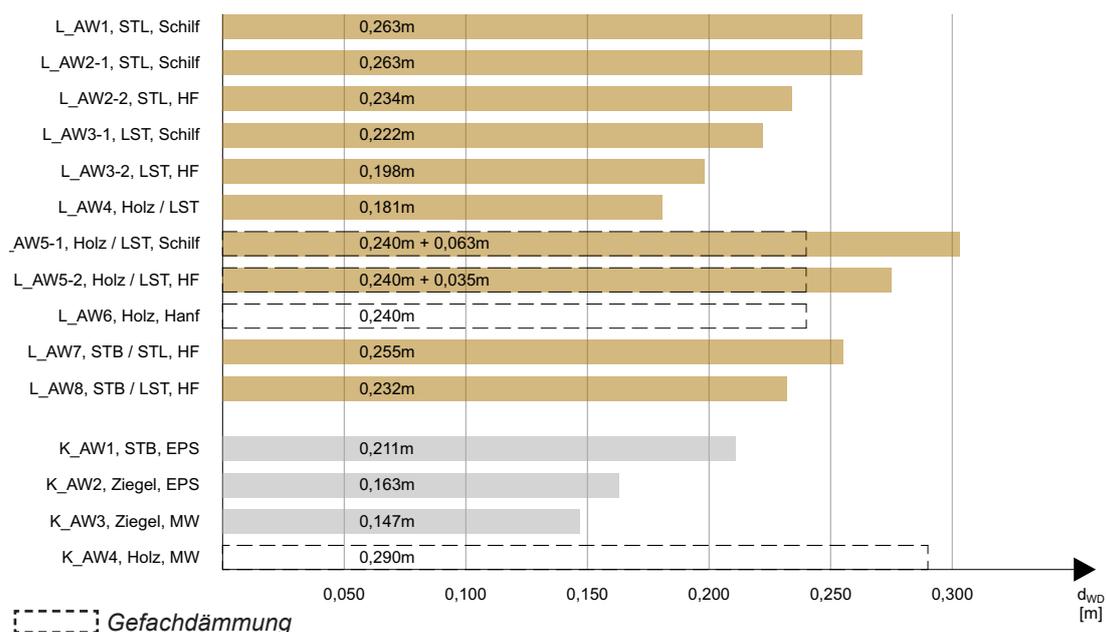


Abbildung 12: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigstenergie-Standards (AW)

Im Bereich des Niedrigstenergie-Standards zeigen sich etwas größere Abweichungen zwischen den notwendigen Dämmstärken der verschiedenen Aufbauten als für Niedrigenergiehäuser. Diese liegen jedoch mit beispielsweise 2-4cm zusätzlicher Wärmedämmung im Bereich der Stahlbeton-Lehm-Bauteile gegenüber klassischen Stahlbetonwänden in einem durchwegs vertretbaren Ausmaß.

Die gezeigten Holz- und Holz-Lehm-Wandsysteme weisen ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede im benötigten Maß an Wärmedämmung auf. Stellenweise erzielen die Bauteile aus Lehm hier sogar bessere Werte als die konventionelle Holzwand.

## Notwendige Dämmstärken der Dachaufbauten

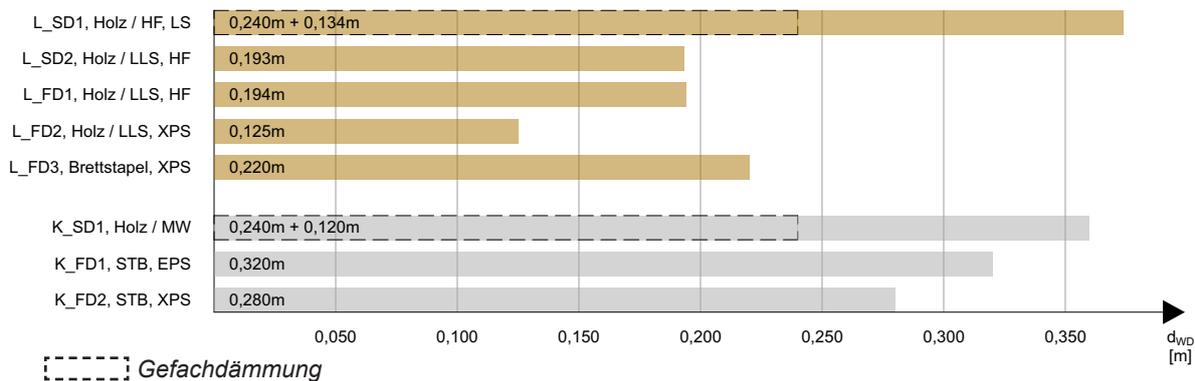


Abbildung 13: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigstenergie-Standards (Dach)

Hinsichtlich der Dachaufbauten zeigt sich erneut, dass durch die Anordnung von Leichtlehmbaustoffen ein geringeres Maß an Wärmedämmstoffen notwendig ist, um einen ausreichend geringen U-Wert zu erzielen. Während die Flachdachaufbauten aus Lehm bereits bei 12,5-22cm Wärmedämmung einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,12W/(m²K) erzielen, benötigen die beiden Stahlbeton-Flachdächer hierfür eine Dämmschicht von 28-32cm.

Im Bereich der Steildächer unterscheiden sich konventionelle Systeme und Lehmaufbauten etwas weniger voneinander, da die 24cm starke Gefachdämmung mit hohem Dämmvermögen den Einsatz der Leichtlehmschüttung in Kombination mit einer stärker wärmeleitenden Dämmschicht kompensiert.

### Erfüllung des Passivhaus-Standards

Um ein Gebäude als Passivhaus zu konzipieren, sollte ein U-Wert von  $0,15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Wände und  $0,10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Dächer nicht überschritten werden.

Von den in dieser Arbeit gezeigten Bauteilaufbauten können diese Werte nur von den konventionellen Außenwänden K\_AW3 und K\_AW4 sowie von dem Lehm-Flachdach L\_FD2 eingehalten werden. Für alle anderen Bauteile muss die wärmedämmende Schicht erhöht werden, um den Passivhaus-Standard zu erreichen.

notwendige Wärmedämmstärke der Außenwände zur Erreichung von $U < 0,15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_AW1	0,150	0,325	1,180	1,355	0,175
L_AW2-1	0,120	0,325	1,145	1,350	0,205
L_AW2-2	0,120	0,290	1,145	1,315	0,170
L_AW3-1	0,100	0,284	1,655	1,839	0,184
L_AW3-2	0,100	0,254	1,655	1,809	0,154
L_AW4	0,080	0,228	0,375	0,523	0,148
L_AW5-1	0,035	0,125	0,445	0,535	0,090
L_AW5-2	0,035	0,090	0,445	0,500	0,055
L_AW6	0,020	0,044	0,321	0,345	0,024
L_AW7	0,200	0,310	0,446	0,556	0,110
L_AW8	0,200	0,287	0,446	0,533	0,087
K_AW1	0,200	0,255	0,430	0,485	0,055
K_AW2	0,200	0,207	0,480	0,487	0,007
K_AW3	0,200	0,192	0,600	0,592	- 0,008
K_AW4	0,080	0,012	0,421	0,353	- 0,068

Tabelle 62: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

notwendige Wärmedämmstärke der Dächer zur Erreichung von $U < 0,10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Bauteil	Dämmstärke [m]		Bauteildicke [m]		Differenz [m]
	vorher	nachher	vorher	nachher	
L_SD1 <sup>1</sup>	0,000	0,215	0,565	0,780	0,215
L_SD2	0,080	0,280	0,525	0,725	0,200
L_FD1	0,100	0,275	0,476	0,651	0,175
L_FD2	0,200	0,185	0,723	0,708	- 0,015
L_FD3	0,200	0,280	0,653	0,733	0,080
K_SD1	0,020	0,200	0,427	0,607	0,180
K_FD1	0,250	0,387	0,642	0,779	0,137
K_FD2	0,250	0,340	0,642	0,732	0,090

1: Anordnung einer zusätzlichen Holzfaserdämmung an der Bauteilaußenseite

Tabelle 63: notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von  $U < 0,10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

Eine Dimensionierung der Wärmedämmung zur Erfüllung des Passivhaus-Standards zeigt, dass die Dämmstärken der Bauteile um bis zu 21cm erhöht werden müssen. Die größten Schichtdicken entstehen hier im Bereich der Stampflehmwände L\_AW1 und L\_AW2-1, da die hier eingesetzte Schilfdämmung von allen gewählten Dämmstoffen die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweist.

### Notwendige Dämmstärken der Außenwände

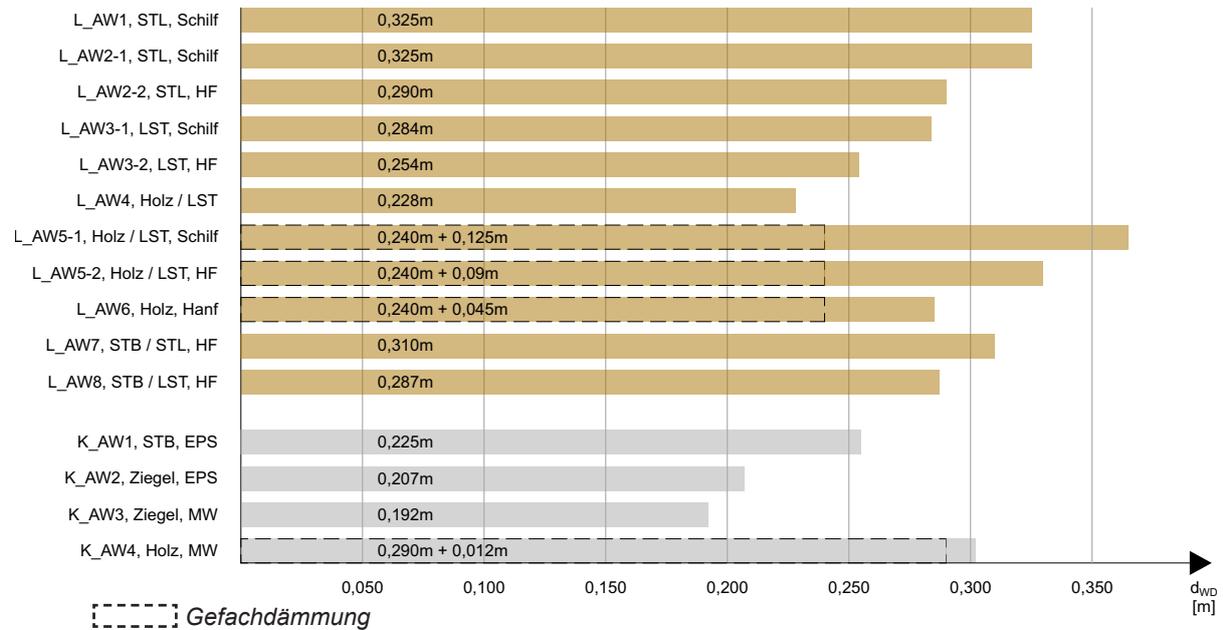


Abbildung 14: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Passivhaus-Standards (AW)

Ein direkter Vergleich der benötigten Wärmedämmstärken zeigt, dass mit zunehmender Anforderung an den Wärmeschutz die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes von immer größerer Bedeutung wird. Während sich für das notwendige Maß an Wärmedämmung bei Niedrigenergie-Standard nur geringe Schwankungen in Abhängigkeit vom gewählten Dämmstoff ergeben, steigt die Differenz der Schichtstärken im Bereich des Passivhaus-Standards stark an. Eine außen liegende Dämmung aus Schilf benötigt in diesem Vergleich eine 10cm stärkere Ausführung als eine konventionelle EPS-Dämmplatte, obwohl die Wärmeleitfähigkeit des in Kombination mit Schilf eingesetzten Stampflehms deutlich unterhalb jener der Stahlbetonwand liegt.

### Notwendige Dämmstärken der Dachaufbauten

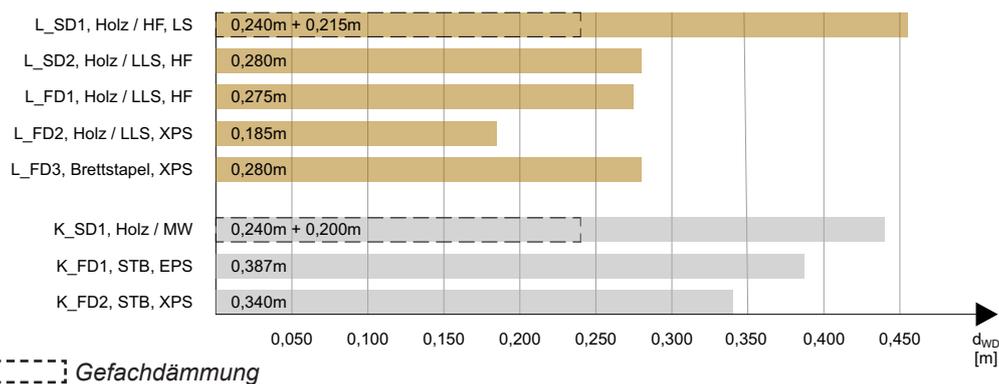


Abbildung 15: benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Passivhaus-Standards (Dach)

Anders als im Bereich der Außenwände, wo die Lehmbauteile aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe größere Wärmedämmschichten benötigen, erzielen die Lehm-Dachaufbauten wie bereits im Niedrig- und Niedrigstenergiesegment deutlich bessere Werte als konventionelle Steil- und Flachdächer, da hier vor allem schlecht wärmeleitende Leichtlehmbaustoffe in Kombination mit konventionellen Polystyrolämmstoffen eingesetzt werden. Auf letztere muss in Ermangelung entsprechender Alternativen zurückgegriffen werden, um die Funktionsfähigkeit der Wärmedämmung auch bei Durchfeuchtung gewährleisten zu können.

Die Analyse der Bauteile hinsichtlich ihrer Eignung im Niedrig-, Niedrigst- und Passivhaus zeigt, dass Lehmbauteile die notwendigen Anforderungen ebenso gut erfüllen wie konventionelle Bauteilaufbauten. Insbesondere der Einsatz von Leichtlehmbaustoffen kann dabei die notwendige Schichtstärke der Wärmedämmung reduzieren, wie die Ergebnisse der Dachaufbauten zeigen.

Allgemein ist die Erfüllung der notwendigen Wärmeschutzmaßnahmen nicht an eine bestimmte Bauweise gebunden, sondern kann von Massiv- und Leichtbauteilen gleichermaßen erreicht werden. Je höher die Anforderungen an den U-Wert werden, umso mehr empfiehlt es sich jedoch, bei der Materialwahl auf den Einsatz möglichst schlecht wärmeleitender Stoffe zu achten. Lehmbaustoffe weisen dabei in der Regel deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten auf als Stahlbeton, im Bereich ökologischer Dämmstoffe erzielen Hanf und Zellulose besonders günstige Werte und liegen nur geringfügig über der Wärmeleitfähigkeit von EPS.

#### 4.1.4 Schalldämmvermögen

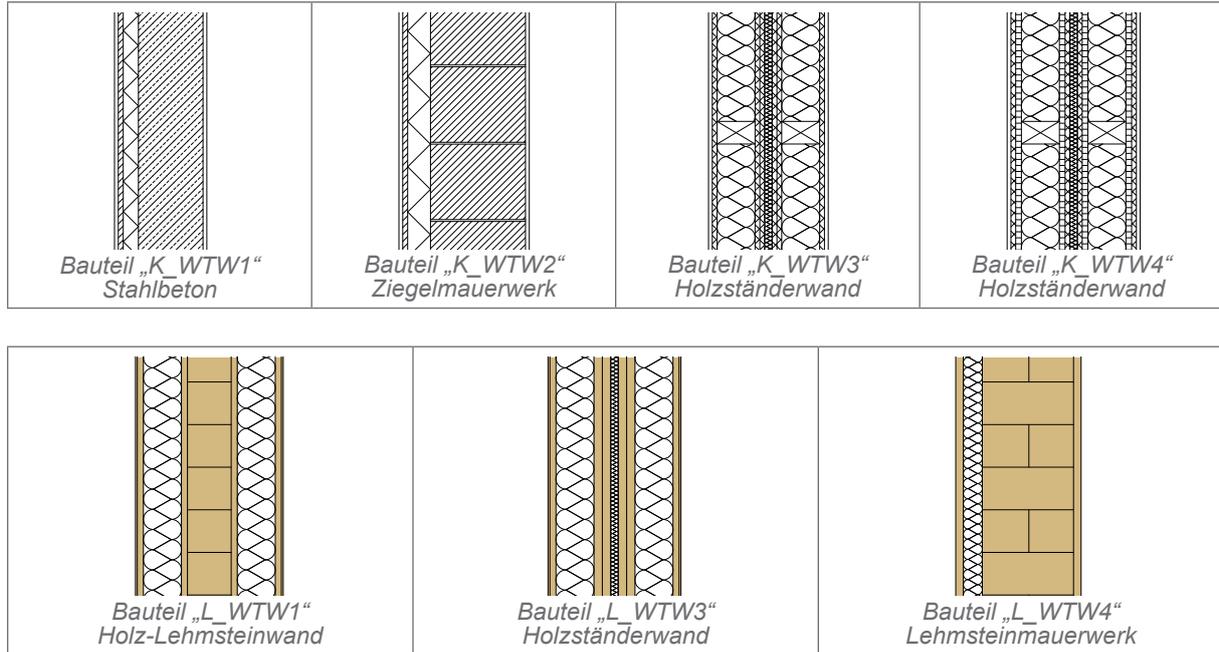
Schallschutz ist im urbanen Raum aufgrund der dichten Bebauung und dem hohen Verkehrsaufkommen ein wesentlicher Faktor für behagliches Wohnen. Neben Lärm von außen erzeugen besonders auch die durch Nachbarn verursachten Geräusche oft unangenehme Situationen, wenn keine ausreichende Schalldämmung der Trennbauteile gegeben ist.

Wie bereits in [2.2.9 Schalldämmvermögen](#) beschrieben, weisen Lehmbaustoffe allgemein ein sehr gutes Schallverhalten auf. Der verhältnismäßig kleine E-Modul und die geringe Steifigkeit erlauben eine hohe Flexibilität gegenüber Schallwellen. Insbesondere im Holz-Skelettbau kann die Schalllängsleitung im Holz durch eine Einbettung des Materials in (Leicht-)Lehm gedämpft werden.<sup>121</sup>

Im Folgenden werden die in [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) und [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) abgeschätzten Luft- und Trittschalldämm-Maße der Außen- und Trennbauteile gegenübergestellt. Wie in diesen Kapiteln bereits ausführlich beschrieben, können dabei nicht für alle Bauteile rechnerische Werte ermittelt werden. Aufgrund fehlender Berechnungsverfahren muss vor allem im Bereich des Holzbaus auf Referenzbeispiele zurückgegriffen werden, deren Schalldämmvermögen von Prüfstellen begutachtet wurde.

121 vgl. BRUCKNER / SCHNEIDER / SCHWIMANN 1996, S.126

## Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände



Trennwände zwischen unterschiedlichen Wohneinheiten oder Wohneinheit und allgemeinem Hausbereich müssen ein bewertetes Schalldämm-Maß von mindestens 58dB aufweisen. Mit Ausnahme der in [3.4 Lehm im Detail: Bauteilaufbauten](#) gezeigten Ausführungsvariante L\_WTW2 wird dieser Mindestwert von allen in dieser Arbeit vorgestellten Aufbauten ausreichend erfüllt.

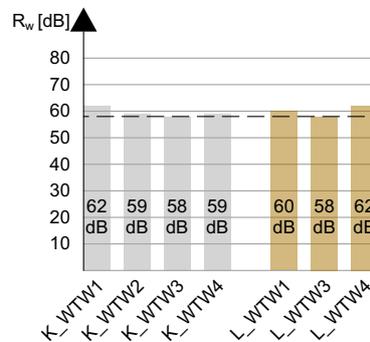


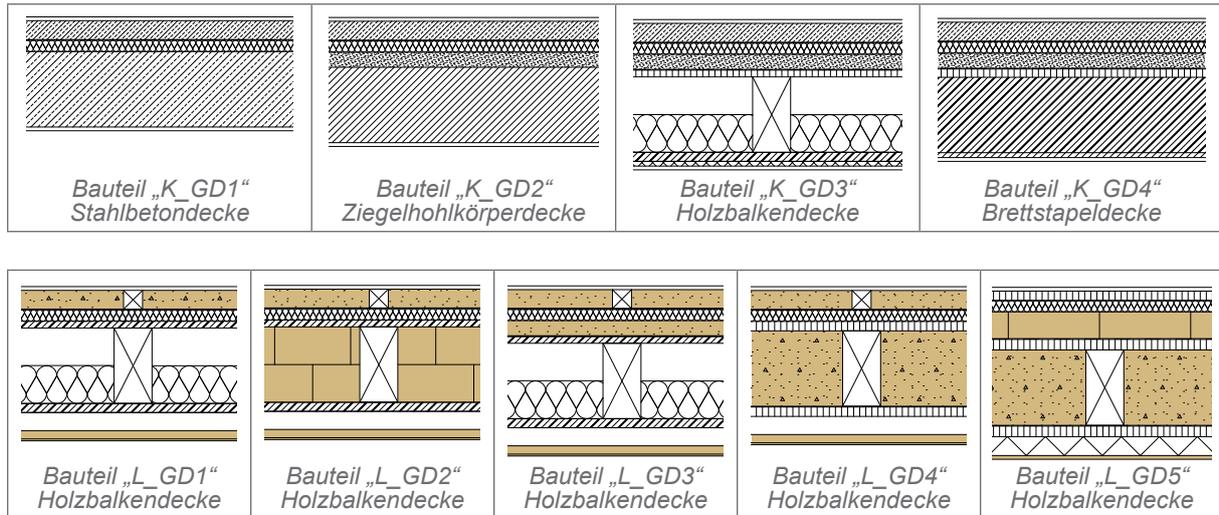
Abbildung 16: bewertetes Schalldämm-Maß der Wohnungstrennwände

Ein Vergleich der unterschiedlichen Wandaufbauten zeigt, dass alle Ausführungsvarianten ein sehr ähnliches bewertetes Schalldämm-Maß erreichen. Die Schwankungsbreite liegt hier bei nur 4dB.

Die massive Lehmsteinwand weist in diesem Vergleich den besten Wert unter den Lehmbauteilen auf, was auf die hohe Masse dieses Wandaufbaus zurückzuführen ist. Mit 62dB erreicht sie dasselbe Schalldämm-Maß wie eine Stahlbetonwand mit Vorsatzschale und erzielt einen besseren Wert als die Trennwand aus Ziegelmauerwerk.

Im Bereich der Holzbauteile zeigt sich, dass die Anwendung von schweren Lehmplatten anstelle von Gipskarton- oder OSB-Platten keine wesentliche Verbesserung der Schalldämmung bewirkt. Eine Ausführung der Holzständerwand mit schwerer Lehmsteinfüllung verbessert das bewertete Schalldämm-Maß hingegen um 2dB.

## Geschossdecken



An Geschossdecken zwischen Wohneinheiten werden sowohl Anforderungen an die Luftschalldämmung als auch an den maximal zulässigen Trittschallpegel gestellt. Die Decken müssen ein bewertetes Schalldämm-Maß von mindestens 58dB erzielen sowie einen Norm-Trittschallpegel von 53dB unterschreiten.

Mit Ausnahme der Brettstapeldecke L\_GD6 erreichen alle in dieser Arbeit angeführten Deckenaufbauten ausreichende Schallschutzwerte.

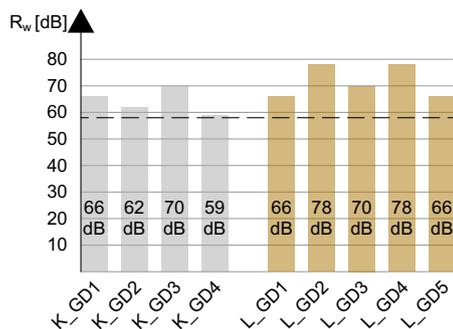


Abbildung 17: bewertetes Schalldämm-Maß der Geschossdecken

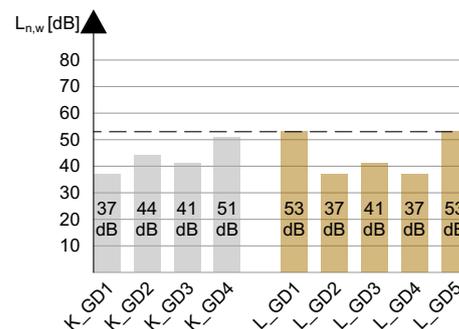


Abbildung 18: Norm-Trittschallpegel der Geschossdecken

Im Bereich des Schalldämmvermögens gegenüber Luftschall zeigt ein Vergleich der Bauteile, dass die vorgestellten Lehmaufbauten voraussichtlich einen etwas höheren Schallschutz erzielen als konventionelle Systeme. Insbesondere die Geschossdecken L\_GD2 und L\_GD4 erreichen hier aufgrund der schweren Lehmausfachung zwischen den Deckenbalken sehr gute Werte. Mit einem abgeschätzten bewerteten Schalldämm-Maß von 78dB ist ihre Luftschalldämmung um fast 10dB besser als jene der konventionellen Holzbalkendecke. Auch die Holz-Lehmdecke L\_GD5 mit einer Ausfachung aus Leichtlehmabbaustoffen erzielt einen guten Luftschallschutz. Aufgrund des geringeren Gewichts führt diese jedoch keine nennenswerte Verbesserung im Vergleich zu einer herkömmlichen Holzbalkendecke herbei.

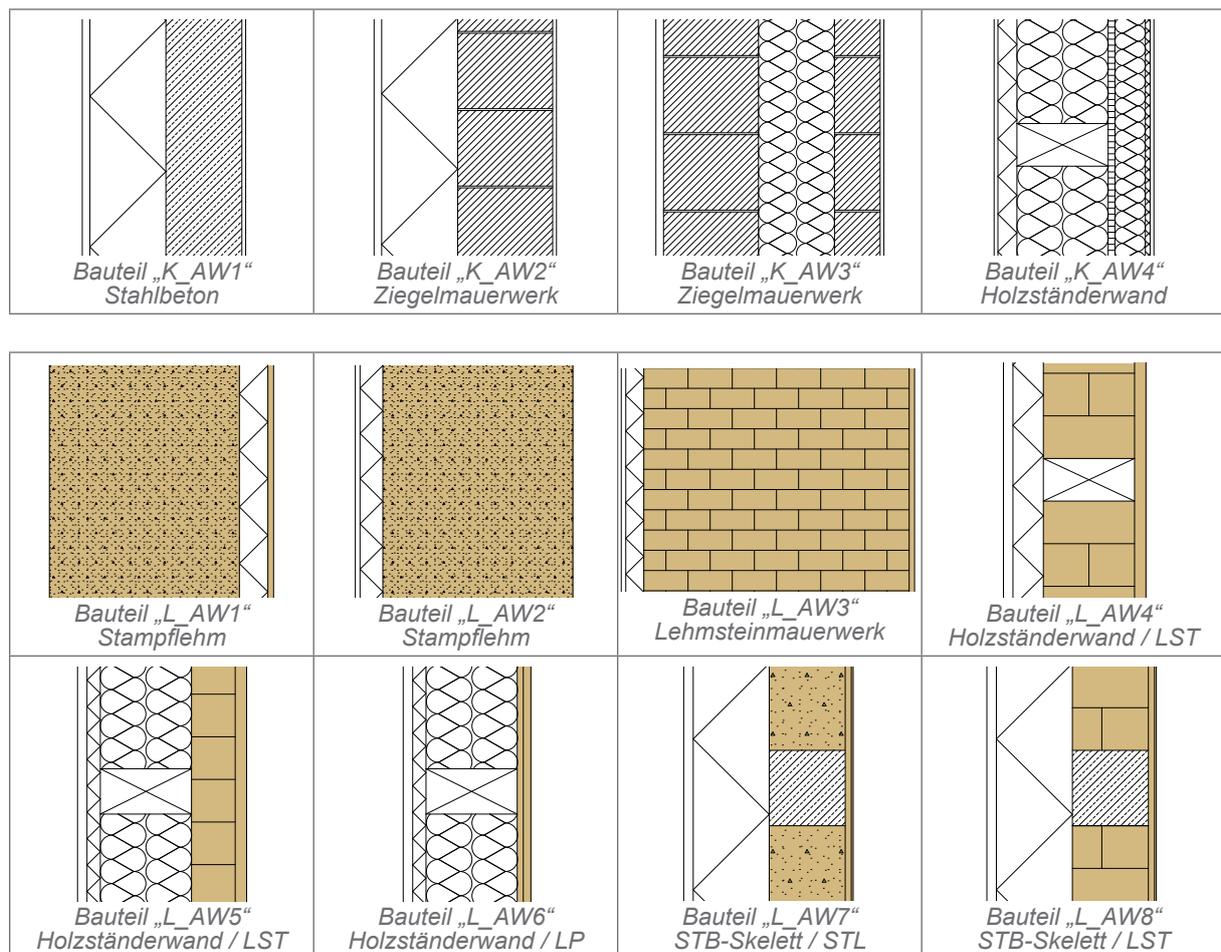
Im Hinblick auf das Trittschalldämmvermögen gibt es größere Schwankungen in den erzielten Werten als im Bereich des Luftschallschutzes. Auch hier erreichen die Holz-Lehm-Decken L\_GD2 und L\_GD4 voraussichtlich das beste Ergebnis und liegen mit einem geschätzten Norm-Trittschallpegel von 37dB leicht unter dem L<sub>n,w</sub>-Wert der Holzbalkendecke von 41dB. Durch die Ausfachung der Holzbalkendecke

mit schweren Lehmsteinen bzw. einer schweren Lehmschüttung wird ein gleich guter Trittschallschutz ermöglicht wie bei der massiven Stahlbetondecke K\_GD1. Gleichzeitig weisen die beiden Decken mit 473,7kg/m<sup>2</sup> bzw. 362,9kg/m<sup>2</sup> eine deutlich geringere flächenbezogene Masse (STB: 595kg/m<sup>2</sup>) und nur eine geringfügig größere Bauteildicke auf.

Auch ein Vergleich zwischen den Bauteilen L\_GD3 und K\_GD3 zeigt die positive Auswirkung von Lehmbaustoffen auf das Schalldämmvermögen von Bauteilen. Beide Decken erzielen dieselben Schallschutzkennwerte und unterscheiden sich nur durch das gewählte Material für Estrich und Schüttung. Während diese im Bauteil L\_GD3 durch Lehmbaustoffe hergestellt werden, kommen in der Decke K\_GD3 ein Zementestrich sowie eine herkömmliche Schüttung zum Einsatz, wodurch das Bauteil eine um fast 50kg/m<sup>2</sup> höhere flächenbezogene Masse aufweist. Durch das günstige Verhalten von Lehm gegenüber Schall kann das Gewicht der Deckenkonstruktion somit bei gleichbleibendem Schalldämmvermögen deutlich reduziert werden.

### Außenwandsysteme

Die Anforderungen an den Luftschallschutz von Außenwänden sind etwas geringer als im Bereich der Trennbauteile, das mindesterforderliche bewertete Schalldämm-Maß beträgt für diese Bauteilkategorie 43dB im urbanen Raum (vgl. 1.1.1 *Bauakustische Anforderungen*).



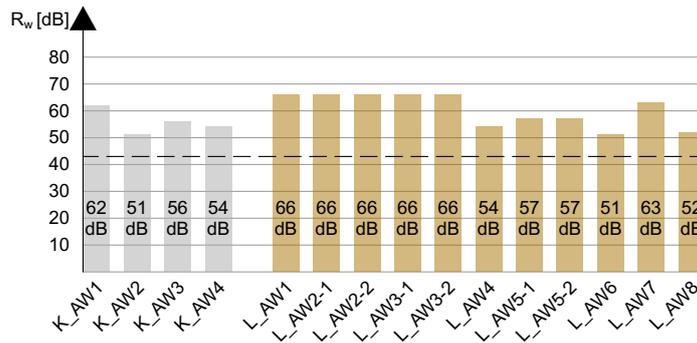


Abbildung 19: bewertetes Schalldämm-Maß der Außenwandsysteme

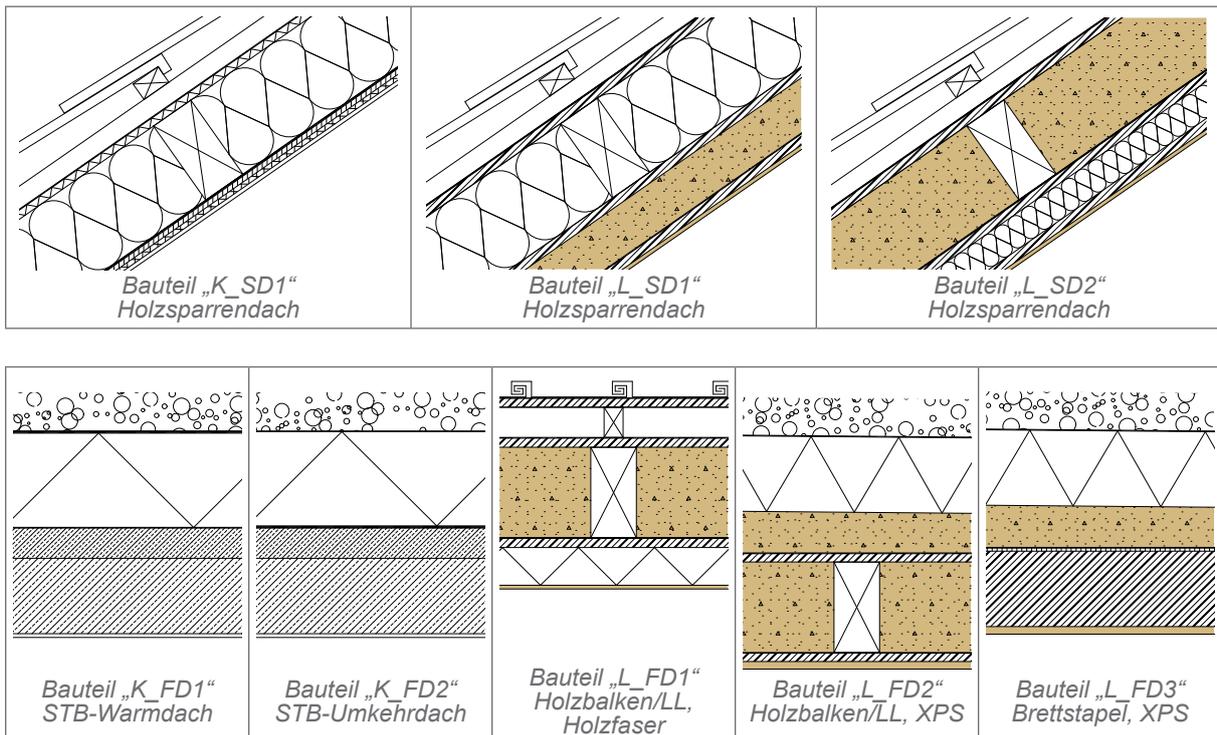
Wie die obenstehende Grafik zeigt, erreichen die hier behandelten Außenwandsysteme ein bewertetes Schalldämm-Maß von ca. 51dB bis 66dB, wobei die Massivbaustoffe deutlich bessere Werte erzielen.

Aufgrund der sehr hohen flächenbezogenen Masse weisen die Stampflehm- und Lehmsteinwände L\_AW1 bis L\_AW3 den höchsten Luftschallschutz auf und übertreffen sowohl die Stahlbeton- als auch die Ziegelaußenwand um 3dB bzw. 15dB. Die Ausführung L\_AW7 erreicht durch die schweren Stampflehm-Fertigteile mit etwa 63dB einen gleich guten Schallschutz wie das reine Stahlbetonbauteil.

Im Bereich der Holz- und Holz-Lehm-Wände zeigt sich, dass die Lehmbaustoffe eine leichte Erhöhung des bewerteten Schalldämm-Maßes erzielen. Der innenseitige Lehmputz der Außenwand L\_AW6 ist hierbei jedoch nicht ausreichend, um den Luftschallschutz signifikant zu verbessern.

### Dachaufbauten

Für Dachaufbauten werden nur sehr geringe Anforderungen an den Luftschallschutz gestellt. Das mindesterforderliche bewertete Schalldämm-Maß beträgt in diesem Bereich 33dB für Bauwerke im städtischen Kerngebiet (vgl. [1.1.1 Bauakustische Anforderungen](#)).



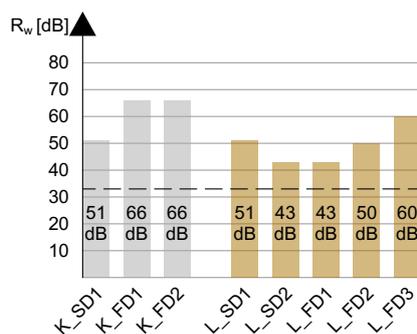


Abbildung 20: bewertetes Schalldämm-Maß der Dachaufbauten

Die gezeigten Dachaufbauten erreichen alle ein um mindestens 10dB höheres bewertetes Schalldämm-Maß als für diese Bauteilkategorie vorgeschrieben ist. Der Flachdachaufbau L\_FD3 erzielt dabei mit voraussichtlich 60dB den höchsten Luftschallschutz unter den Lehmanteilen und liegt nur leicht unter den Werten der Stahlbeton-Flachdächer.

Im Bereich der Steildächer erreicht das Holzsparrendach L\_SD1 mit schwerer Lehmschüttung ein ähnliches bewertetes Schalldämmvermögen wie das konventionelle Holzsparrendach K\_SD1. Das Steildach L\_SD2 übertrifft den geforderten Schallschutz zwar ebenfalls deutlich, weist jedoch aufgrund der leichten Lehmschüttung ein wesentlich geringeres Schalldämm-Maß auf als das Bauteil L\_SD1. Gleichzeitig ist die Konstruktion L\_SD2 jedoch um fast 100kg/m<sup>2</sup> leichter als die Ausführung mit schweren Lehmbaustoffen, was sich gerade im Bereich des Daches positiv auf die notwendige Dimensionierung der darunterliegenden Tragstruktur auswirkt.

Die Analyse der bewerteten Schalldämm-Maße und Norm-Trittschallpegel zeigt, dass Lehm im Bereich der Luft- und Körperschalldämmung sehr gute Werte erzielt. Besonders im Bereich des Holzskelettbaus kann Lehm durch seine hohe Masse Verbesserungen im Schallschutz bewirken. Lehm hat dabei gegenüber anderen Ausfachungen mit Massivbaustoffen wie Ziegel oder Betonstein den Vorteil, wesentlich weicher und elastischer zu sein, wodurch Schallwellen deutlich besser absorbiert und gedämpft werden.<sup>122</sup> Wenngleich sich der Schallschutz von Stahlbetonbauteilen kaum von Bauteilen aus Lehm unterscheidet, bieten Lehmanteile den Vorteil, bei gleicher Schalldämmung ein meist deutlich geringeres Flächengewicht aufzuweisen.

#### 4.1.5 Brandschutz

Hinsichtlich des Brandschutzes wird zwischen dem Brandverhalten von Baustoffen, das insbesondere in der Phase der Brandentstehung von Bedeutung ist, und dem Feuerwiderstand von Bauteilen, der das Verhalten eines Bauteils bei voll entwickeltem Brand beschreibt, unterschieden.<sup>123</sup> Der Feuerwiderstand gibt dabei jene Zeit an, in der ein Bauteil je nach Klassifizierung Anforderungen an beispielsweise die Tragsicherheit, Wärmedämmung oder den Raumabschluss erfüllen muss. Das Brandverhalten wird hingegen als das Verhalten eines Bauproduktes, mit dem es den Brand beeinflusst, definiert.<sup>124</sup>

Baustoffe werden entsprechend ihres Brandverhaltens in Baustoffklassen eingeteilt.

<sup>122</sup> vgl. VOLHARD 1983/2013, S.229f.

<sup>123</sup> vgl. SCHROEDER 2010/2019, S.453

<sup>124</sup> ÖNORM EN 13501-1 2020, S.12

Wie bereits in [2.2.8 Brandverhalten](#) beschrieben, können Baustoffe aus Lehm in Abhängigkeit ihrer Rohdichte den Baustoffklassen A1 „nicht brennbar“ bzw. B1 „schwer entflammbar“ zugeordnet werden. Mineralische Zuschläge nehmen dabei keinen Einfluss auf die Baustoffklasse, während organische Faserstoffe durchaus in der Klassifizierung berücksichtigt werden. Die Baustoffklasse von Faser-, Stroh- und Leichtlehm ist derzeit noch nicht definiert und muss auf Grundlage von Brandversuchen ermittelt werden.<sup>125</sup>

Anders als für das Brandverhalten von Lehmbaustoffen liegt für den Feuerwiderstand von Lehmbauteilen derzeit keine ausreichende Klassifizierung vor. Baukonstruktionen aus Lehmbaustoffen müssen daher in entsprechenden Brandversuchen durch Prüfeinrichtungen ermittelt werden. Da eine derartige Überprüfung weder vorliegt noch im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführt werden kann, ist ein direkter Vergleich der in Kapitel 1 und 3 gezeigten Bauteilaufbauten hinsichtlich ihres Brandverhaltens an dieser Stelle nicht möglich. Der *Dachverband Lehm* stellt in den *Lehmbau Regeln* jedoch zumindest eine grundlegende Einteilung von Lehmbauteilen in Feuerwiderstandsklassen vor:

<i>Feuerwiderstandsklasse für Wände / Decken mit Lehmbaustoffen</i>	
Bauteil	Klassifizierung
Massive Wände - massive gemauerte oder gestampfte Lehmwände, Baustoffklasse A, d=24cm	F90A
Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen - Holzquerschnitte > 100x100mm bei einseitiger Brandbeanspruchung - Holzquerschnitte > 120x120mm bei beidseitiger Brandbeanspruchung - Ausfüllung mit Strohlehmausfachung - mindestens einseitige Bekleidung (z.B. Putz)	F30B
Holzbalkendecke mit verdeckten Balken - Einschub mit Lehmschlag >60mm oder Querhölzer (Stakung) mit Lehmschlag - obere Schalung - untere Bekleidung	F30B bis F60B
Deckenbeläge - Feuerbeanspruchung nur an der Oberseite - Belag aus >50mm Lehm	F30

*Tabelle 64: voraussichtliche Feuerwiderstandsklasse von Lehmbauteilen*<sup>126</sup>

*Schroeder* weist hinsichtlich der Klassifizierung des Brandverhaltens und der Feuerwiderstandsklassen von Lehm und Lehmbauteilen darauf hin, dass das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) das Kapitel „Brandverhalten“ der *Lehmbauregeln* kürzlich außer Kraft gesetzt hat und für Lehmbaustoffe und Lehmbauteile somit keine offiziell gültige Klassifizierung mehr vorliegt.<sup>127</sup>

Versuchsreihen von *Volhard*<sup>128</sup> zeigen allerdings, dass die Einschätzung des Brandverhaltens von Lehm durch den *Dachverband Lehm* durchaus Berechtigung finden. Ein erster Versuchsaufbau demonstrierte, dass Leichtlehm unter Flammeneinwirkung nicht zur Brandausbreitung beiträgt und mit zunehmender Beflammungsdauer eine schützende Kohleschicht ausbildet. Zudem entsteht bei den Brandversuchen kein Rauch, Qualm oder wahrnehmbares Verbrennungsgas durch Lehmbaustoffe. In einem weiteren Brandversuch zeigte sich, dass eine 5-10cm starke, verputzte Leichtlehmschicht dahinterliegende Holzbauteile vor einer Entzündung schützt.<sup>129</sup> Die Versuche *Volhards* beziehen sich hauptsächlich auf leichte

125 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.223

126 DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, 98f.

127 vgl. SCHROEDER 2010/2019, S.175

128 VOLHARD 1983/2013

129 ebenda, S.226ff.

Lehmmischungen mit organischen Faserzuschlägen. Schwere Lehmbaustoffe weisen wegen des geringeren Anteils an organischem Material voraussichtlich noch bessere Brandeigenschaften auf. Im Brandfall verdunstet das im Lehm enthaltene Wasser und schützt den Baustoff vor einer Entzündung. Durch das Entziehen des Wassers aus der kristallinen Struktur brennt Lehm unter langer Feuereinwirkung zum Scherben, wodurch sich seine Festigkeit erhöht. Schwindrisse treten dabei nur oberflächlich auf. Lehmmischungen mit einer Rohdichte  $< 600\text{kg/m}^3$  glimmen nach einer Beflammung oberflächlich, entzünden sich allerdings nicht, sondern werden porös.<sup>130</sup>

Aufgrund der beschriebenen Versuchsreihen und nachweisbaren chemischen Prozessen, die Lehmbaustoffe im Falle eines Brandes durchlaufen, wird angenommen, dass die Einstufung von Bauprodukten aus Lehm als „nicht brennbar“ bzw. „schwer entflammbar“ durchaus Berechtigung findet. Daraus ergibt sich, dass der Einsatz von Lehmbauteilen im städtischen Wohnungsbau keiner besonderen Vorkehrungen hinsichtlich des Brandschutzes bedarf. Allerdings muss hier mit Forderungen nach entsprechenden Nachweisen im Genehmigungsprozess gerechnet werden.

#### **4.1.6 Feuchteregulierung von Baustoffen**

Das Wohlbefinden in geschlossenen Räumen wird von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt. Auch die relative Luftfeuchtigkeit nimmt einen wesentlichen Einfluss darauf, ob ein Raumklima vom Menschen als angenehm empfunden wird. Wie in [2.2.10 Der Einfluss von Lehm auf das Raumklima](#) bereits beschrieben, soll diese möglichst konstant zwischen 40% und 60% gehalten werden.

Ein zu hoher Wasserdampfgehalt in der Luft wird vom menschlichen Organismus als unangenehm empfunden und belastet das menschliche Herz-Kreislauf-System. Die natürliche Kühlung des Körpers durch die Produktion von Schweiß verliert bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 65% an Effektivität, da die körpereigene Flüssigkeit auf der Haut langsamer verdampft.

Eine zu geringe relative Luftfeuchtigkeit im Raum ist für den Menschen ebenfalls unangenehm. Trockene Luft beeinträchtigt die Resistenz des Körpers gegenüber Keimen, Viren und Bakterien, da sie zu einer Austrocknung der Schleimhäute führt und so der natürliche Schutz vor dem Eindringen von Erregern ausgesetzt wird.

Eine konstante relative Luftfeuchtigkeit in Aufenthaltsräumen ist aus diesen Gründen ein wichtiger Aspekt im Bauwesen, dem jedoch selten ausreichend Beachtung geschenkt wird.

Der Feuchtigkeitsgehalt in der Raumluft hängt dabei von vielen Faktoren wie dem Nutzerverhalten und der Luftwechselrate ab. Neben diesen individuell beeinflussbaren Umständen spielt auch die Wahl der Baustoffe, die einen Raum begrenzen, eine große Rolle. Insbesondere die an der Oberfläche angeordneten Bauprodukte können die Luftfeuchtigkeit eines Raumes positiv oder negativ beeinflussen. Die beiden wesentlichsten Einflussfaktoren auf diese Eigenschaften stellen der Grundfeuchtegehalt des Baustoffes und seine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl dar.

Jeder Baustoff kann abhängig von seiner Porenstruktur und Oberfläche Feuchtigkeit aus seiner Umgebung aufnehmen oder an diese abgeben. Der Wasserdampfdruck strebt dabei stets nach einem Gleichgewichtszustand, der Wasserdampf strömt also immer von Bereichen höherer zu Bereichen niedrigerer Luftfeuchtigkeit. Welchen

130 vgl. BRUCKNER / SCHNEIDER / SCHWIMANN 1996, S.214

Widerstand ein Baustoff dem Wasserdampf entgegensetzt, wird – wie bereits in [2.2.5 Verhalten von Lehm bei Wasserdampfeinwirkung](#) beschrieben – durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ausgedrückt. Je geringer dabei der  $\mu$ -Wert eines Baustoffes, umso diffusionsoffener ist er und umso geringer ist der Widerstand, den er einströmendem Wasserdampf entgegensetzt.

Baustoff	$\mu$ [-]
Stahlbeton	100
Ziegel	5-20
Holz, Fichte	50
Stampflehm	10
Lehmstein (tragend)	10
Leichtlehmstein	10
Zementputz	30
Kalk-Gips-Putz	10
Silikatputz o.Kh.	20
Kalkputz	10
Lehmputz (2000kg/m <sup>3</sup> )	10
Gipskartonplatte	10
Lehm-Ausbauplatte	10
Lehm-Trockenputzplatte	18

*Tabelle 65: Wasserdampfdiffusionswiderstände einiger Baustoffe<sup>131</sup>*

Diffusionsoffene Materialien ermöglichen einen raschen Austausch von Feuchtigkeit und dienen als Feuchtepuffer. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit im Raum, nehmen hygroskope<sup>132</sup> Baustoffe diese auf und geben sie wieder ab, sobald der Feuchtegehalt im Raum sinkt.

Pflanzenfasern und tierische Stoffe sowie poröse mineralische Materialien wie Lehm oder Ziegel sind in der Regel diffusionsoffener als Metalle oder Kunststoffe. Auch Stahlbeton ist aufgrund seiner hohen Dichte und geschlossenen Porenstruktur wenig diffusionsoffen.

Neben dem Diffusionsverhalten von Baustoffen beeinflusst auch ihr praktischer Feuchtegehalt das Potential, Feuchtigkeit aus der Raumluft aufzunehmen. Dieser bezeichnet den Feuchtegehalt eines Stoffes, der unter normalen Bedingungen selten überschritten wird.<sup>133</sup> Er beschreibt somit die Gleichgewichtsfeuchte, die sich in einem Material in einem Raum üblicher Nutzung in der Regel einstellt. Je trockener ein Baustoff grundsätzlich ist, umso schneller wird er der Raumluft Feuchtigkeit entziehen, um eine Gleichgewichtsfeuchte zu erreichen.

Organische Stoffe wie Holz oder Stroh weisen meist einen etwas höheren praktischen Feuchtegehalt auf, während Lehm vergleichsweise trocken ist. Aus diesem Grund entziehen Lehmbaustoffe Materialien wie Holz Feuchtigkeit – dadurch schützt Lehm das Holz vor übermäßiger Durchfeuchtung.<sup>134</sup>

131  $\mu$ -Werte basierend auf Herstellerangaben, vgl. Kapitel 1.2 / 3.4

132 Hygroskopie beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes, Feuchtigkeit aus seiner Umgebung aufnehmen zu können.

133 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.213

134 vgl. ebenda, S.213

Baustoff	Vol.bezogener Feuchtegehalt $u_v$ [%]
Beton	5
Ziegel	1.5
Holz, Fichte	6,4
Massivlehm	3
Leichtlehm	3

Tabelle 66: volumenbezogener Feuchtegehalt einiger Baustoffe<sup>135, 136</sup>

Ein Vergleich der Wasserdampfdiffusionswiderstände und Gleichgewichtsfeuchten einiger in dieser Arbeit eingesetzten Baustoffe zeigt, dass Lehm und Ziegel besonders diffusionsoffen sind und gleichzeitig einen besonders geringen praktischen Feuchtegehalt aufweisen. In Kombination mit ausreichend hygroskopischen Oberflächenabschlüssen kann für diese Bauteile daher der größte Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit im Raum angenommen werden.

Die in [1.2 Wiener Bauteilaufbauten](#) gezeigten Stahlbeton-Bauteile können den Wasserdampfgehalt im Raum hingegen nur in sehr geringem Maß beeinflussen. Zwar ist der meist raumseitig aufgetragene Kalkputz ähnlich diffusionsoffen wie Lehm, die mögliche Wasserdampfaufnahme bleibt jedoch durch die geringe Schichtstärke von 1cm sehr eingeschränkt. Das direkt dahinter liegende Stahlbetonelement hat aufgrund seines hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandes keine Möglichkeit, zusätzlich Feuchtigkeit aus der Raumluft aufzunehmen.

Im Gegensatz dazu vermögen die gezeigten Ziegelaufbauten durchaus Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit im Raum zu nehmen, da die hier eingesetzten Baustoffe wesentlich diffusionsoffener sind.

Die Lehmteile erreichen voraussichtlich die höchste Wasserdampfaufnahme aller gezeigten Bauteile, da hier besonders auf den Einsatz diffusionsoffener Baustoffe geachtet wird. Hinter den Lehm-Innenputzsystemen werden in vielen dieser Bauteile weitere Lehmstoffe angeordnet. Durch den geringen praktischen Feuchtegehalt von Lehm erfolgt die Aufnahme von überschüssigem Wasserdampf dabei besonders rasch. Da in der Entwicklung der in dieser Arbeit gezeigten Lehmteile besonderes Augenmerk darauf gelegt wurde, auf dampfsperrende Bauteilschichten zu verzichten, wird die Feuchtigkeitsaufnahme aus der Raumluft dabei kaum behindert.

135 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.214

136 vgl. RAUCH 2006

## 4.2 Ein ökologischer Vergleich

Jeder Bauprozess stellt einen Eingriff in ein bestehendes Ökosystem dar und ist mit dem Verbrauch von stofflichen sowie energetischen Ressourcen verbunden. Durch das stetige Wachstum der Baubranche und der damit verbundenen erhöhten Produktion von Bauprodukten beansprucht der Bausektor einen immer größeren Anteil an Energie und Rohstoffen und verursacht gleichzeitig in immer höherem Maße klimaschädliche Gase und Abfallmassen.

Um den Klimawandel nicht weiter anzuheizen und schädliche Umweltwirkungen zu reduzieren, muss Bauen in Zukunft mit mehr Sorgfalt und verstärkt unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit erfolgen. Dies erfordert einerseits die Nutzung ökologischer Baustoffe, andererseits die Planung und Umsetzung rückbaubarer Konstruktionen.

Als umweltfreundliche Baustoffe können dabei Produkte angesehen werden, deren Rohstoffe ressourcenschonend und umweltverträglich gewonnen und deren Herstellung mit geringem Energieaufwand sowie ohne das Entstehen von problematischen Schadstoffemissionen erfolgen kann. Nachwachsende, natürliche Rohstoffe sind dabei synthetisch erzeugten Stoffen aus endlichen Ressourcen in der Regel vorzuziehen. Die Bauprodukte müssen im Sinne eines nachhaltigen Bauens zudem kreislauffähig sein, nach ihrer Nutzung also mit geringem Aufwand wiederverwendet, recycelt oder zumindest energetisch verwertet werden können.<sup>137</sup>

Bauteile aus ökologischen Baustoffen sind dabei jedoch nicht automatisch ebenfalls als nachhaltig anzusehen. Konstruktionen müssen, um als umweltfreundlich zu gelten, in gleichem Maße rückbaubar und recyclingfähig sein. Dies wird insbesondere durch entsprechende Verbindungen erreicht, die ein Lösen einzelner Bauteilschichten erlauben.<sup>138</sup> Dadurch wird nicht nur eine sortenreine Trennung der Bauprodukte ermöglicht, sondern auch die Sanierung einzelner Bauteilschichten ohne die Zerstörung darüber liegender Baustoffe.

Bauprodukte aus Lehm gelten grundlegend als besonders nachhaltig. Ihre Replastifizierbarkeit erlaubt eine stetige Wiederverwendbarkeit ohne aufwändige Verfahren, Lehm ist zudem als Rohstoff in großen Mengen in weiten Teilen der Erde vorrätig. Auch die Entsorgung von Lehmabbaustoffen, die nicht wiederverwendet werden, stellt keine Herausforderung dar. Solange die Lehmprodukte nicht mit Zement stabilisiert oder mit synthetischen Zuschlägen vermischt werden, können sie oft direkt an den Boden zurückgegeben werden.

Das Bauen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit wird seit dem Erkennen des menschlichen Einflusses auf die Klimakrise vielfach diskutiert. Da die Errichtung von Gebäuden ein sehr komplexer Prozess ist, in den eine Vielzahl von Gewerken involviert sind und nur sehr selten mehrere, in ihrer Ausführung exakt gleiche Bauwerke errichtet werden, bedarf es der Entwicklung von Systemen, die die Nachhaltigkeit eines Gebäudes greifbar und vergleichbar machen. Andernfalls ist eine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Umweltwirkungen von Gebäuden und somit eine Beurteilung des Fortschritts hin zu nachhaltigen Bauweisen nicht möglich.

Das folgende Kapitel gibt daher einen Überblick über einige wesentliche Indikatoren und Systeme, die der ökologischen Bewertung von Baustoffen, Bauteilen und Gebäuden dienen. Dabei werden einerseits Indikatoren vorgestellt, die der Beurteilung

137 vgl. SCHROEDER 2010/2019, S.24

138 vgl. ebenda, S.25

von Stoffen hinsichtlich ihrer Schadstoffemissionen dienen, andererseits Systeme aufgezeigt, die Bauteile und Bauwerke nach ökologischen Kriterien bewerten und dadurch vergleichbar machen.

Aufbauend auf dem grundlegenden Verständnis ökologischer Bewertungssysteme werden anschließend auch die in dieser Arbeit gezeigten Bauteilaufbauten mithilfe eines solchen Modells beurteilt, wodurch eine objektive und wissenschaftlich verankerte Bewertung der verschiedenen Bauteile ermöglicht wird. Wenngleich Lehm allgemein als nachhaltiger Baustoff angesehen wird, ist eine fundierte Aussage über den tatsächlichen ökologischen Vorteil von Lehm gegenüber anderen Bauprodukten nur auf Grundlage einer solchen Bewertung möglich. Als Beurteilungsmethode wird dabei das Berechnungsverfahren *O13 Index* gewählt, das die Bauteile anhand der Öko-Indikatoren PENRT, GWP und AP beurteilt (vgl. [4.2.3 Ökologische Bauteilbewertung – O13 Index](#)).

Zusätzlich zur Analyse der direkten Umweltwirkungen der Bauteile wird im Anschluss auch untersucht, wie problematisch die Entsorgung der Produkte, die in den hier gezeigten Aufbauten eingesetzt werden, einzustufen ist. Dies erfolgt über das Bewertungsverfahren *Entsorgungsindikator*, das Teil des Berechnungsmodells *O13 Index* ist (vgl. [4.2.5 Recyclingpotential und Entsorgungseinstufung der Bauteile](#)).

Anhand einer Benotung von Baustoffen entsprechend ihrer derzeitigen Entsorgungseinstufung und ihres zukünftigen Verwertungspotentials stellt diese Bewertung eine einfach zu erfassende Möglichkeit dar, zukünftige Problemstoffe zu identifizieren und die Entsorgungseinstufung verschiedener Konstruktionen zu vergleichen.

#### **4.2.1 Ökologische Kennwerte und ihre Bedeutung**

Die Wahl der Baumaterialien in einer Konstruktion nimmt immer mehr an Bedeutung zu. Neben statischen und bauphysikalischen Überlegungen wird es dabei zunehmend wichtiger, auch den ökologischen Fußabdruck der Baustoffe zu berücksichtigen.

Ökologische Kennwerte dienen in diesem Zusammenhang als Hilfsmittel, um Baustoffe, Konstruktionen oder ganze Gebäude hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit vergleichbar zu machen. Zur Beurteilung der Ökologie unterschiedlicher Produkte können verschiedene Kriterien wie die zur Herstellung notwendige Energie oder bei der Produktion entstehende Schadstoffemissionen herangezogen werden.

Im folgenden Abschnitt werden einige bedeutende Öko-Indikatoren angeführt, die für das Bauwesen von Bedeutung sind.

Im Ökobilanz-Modell der *IBO* (vgl. [4.2.3 Ökologische Bauteilbewertung – O13 Index](#)) haben sich insbesondere die Kenngrößen Primärenergieinhalt, globales Erwärmungspotential und Versauerungspotential etabliert. Während der PEI dabei vor allem als Ressourcenindikator dient, geben GWP und AP Aufschluss über die Emissionswirkung der erzeugten Stoffe.<sup>139</sup> Diese ökologischen Kennwerte werden auch im *O13 Index* sowie von vielen anderen Berechnungsmodellen häufig verwendet, um Ökobilanzen von Baustoffen, Bauteilen oder Gebäuden zu erstellen und werden daher nachfolgend im Detail vorgestellt.

139 vgl. LIPP: *Ökobilanz und Ökoindikatoren*

Öko-Indikator	Bedeutung	Einheit
PEI	Primärenergieinhalt	MJ
PENRE	Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, als Energieträger	
PENRM	Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, als Rohstoff	
PENRT	Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, total (Summe PENRM + PENRE)	
PERE	Bedarf an erneuerbarer Primärenergie, als Energieträger	
PERM	Bedarf an erneuerbarer Primärenergie, als Rohstoff	
PERT	Bedarf an erneuerbarer Primärenergie, total (Summe PERE + PERM)	
PEE	Bedarf an erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie, als Energieträger (Summe PENRE + PERE)	
GWP	Globales Erwärmungspotential	kg CO <sub>2</sub> eq.
GWP C-Gehalt	GWP des in Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs	
GWP Prozess	GWP der in Prozessen emittierten Treibhausgasemissionen	
GWP Summe	Globales Erwärmungspotential, total (Summe GWP C-Gehalt + GWP Prozess)	
AP	Versauerungspotential	kg SO <sub>2</sub> eq.
EP	Eutrophierungspotential	PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> eq.
POCP	Bildungspotential für troposphärisches Ozon	kg C <sub>2</sub> H <sup>4</sup> eq.
ODP	Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	kg CCl <sub>3</sub> F eq.

Tabelle 67: Öko-Indikatoren und ihre Bedeutung<sup>140</sup>

### Primärenergieinhalt

Die Primärenergie bezeichnet jene Rohenergie, die noch keiner technischen Umsetzung oder Umwandlung durch den Menschen und keinem Transport unterworfen ist.<sup>141</sup>

Der Primärenergieinhalt PEI beschreibt den Energieaufwand zur Herstellung eines Stoffes einschließlich der Energie für die Gewinnung und Verarbeitung von hierfür benötigten Rohstoffen, Hilfsstoffen und Betriebsmitteln sowie für Transporte.<sup>142</sup> Er bezeichnet somit den erforderlichen Gesamtbedarf an energetischen Ressourcen zur Herstellung eines Produktes oder einer Aktivität. Abhängig von der genutzten Energiequelle wird der PEI in erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger gegliedert. Als erneuerbare Quellen gelten beispielsweise Biomasse, Sonnen- und Windenergie, während Kohle, Erdöl und Uran als nicht erneuerbare Energielieferanten anzusehen sind. Letztere stellen endliche Ressourcen dar, die auf der Erde nur begrenzt verfügbar sind.

Der Primärenergieinhalt ist einer der bedeutendsten ökologischen Indikatoren zur Beurteilung von Baustoffen und Bauwerken. Wenngleich für eine ganzheitliche ökologische Beurteilung zusätzliche Wirkungsgrade berücksichtigt werden müssen, erlaubt der PEI eine gute Einschätzung über die graue Energie, die hinter der

140 vgl. IBO 2017, S.6f.

141 vgl. IBO 2018a, S.8f.

142 vgl. BOKU Wien / TU Graz, S.1.4.18

Herstellung eines Stoffes oder Produktes steht. Lehmbaustoffe weisen einen sehr geringen Primärenergieinhalt auf. Insbesondere der traditionelle Lehm, bei dem der Baugrubenaushub direkt zu Bauteilen weiterverarbeitet wird und somit keine Transportwege und kaum maschinelle Verarbeitungsprozesse anfallen, erzielt einen PEI von nahezu Null.<sup>143</sup> Moderne Lehmbauteile, die maschinell im Werk produziert und zur Baustelle transportiert werden, können zwar keinen ebenso geringen Primärenergieinhalt erreichen, benötigen im Vergleich zu den meisten Baustoffen aber deutlich weniger Energie in ihrer Herstellung als diese. Durch die hohe Verfügbarkeit des Rohstoffes Lehm und einer wachsenden Zahl an Anbietern von Lehmbaustoffen im deutschsprachigen Raum können zudem die Transportwege meist kurz gehalten werden.

### *Globales Erwärmungspotential*

Das Globale Erwärmungspotential GWP beschreibt den Beitrag treibhauswirksamer Gase zur globalen Erwärmung.

Den größten Einfluss auf den durch den Menschen verursachten Treibhauseffekt stellt dabei die Emission von CO<sub>2</sub> dar, da es den höchsten Anteil aller durch menschliche Aktivitäten produzierten Treibhausgase einnimmt. Neben CO<sub>2</sub> verstärken aber auch andere Gase wie Methan oder Lachgas die globale Erwärmung in unterschiedlich hohem Ausmaß. Um die Wirkung verschiedener treibhauswirksamer Gase dennoch miteinander vergleichen zu können, wird das GWP in massebezogenen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben.<sup>144</sup> Diese Maßeinheit beschreibt die Menge an Kohlendioxid in Kilogramm, die den gleichen Treibhauseffekt verursacht wie ein anderes Treibhausgas, eine bestimmte Substanz oder eine Aktivität.<sup>145</sup>

Die verschiedenen Treibhausgase nehmen nicht nur einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die globale Erwärmung, sie verweilen auch ungleich lange in der Erdatmosphäre. Emittiertes CO<sub>2</sub> bleibt beispielsweise für einige Jahrhunderte in der Atmosphäre, während Methan mit einer Halbwertszeit von 15 Jahren vergleichsweise rasch in Kohlendioxid und Wasserdampf zerfällt.<sup>146</sup> Um die Wirkung dieser Gase auf die globale Erwärmung ganzheitlich beurteilen zu können, wird daher zur Berechnung des GWP ein Zeithorizont festgelegt. Ein vergleichsweise kurzer Zeitraum von 20 Jahren kann dabei für Voraussagen kurzfristiger Änderungen durch einen erhöhten Treibhauseffekt dienen, während längere Zeitabschnitte beispielsweise zur Bewertung des dauerhaft ansteigenden Meeresspiegels herangezogen werden.<sup>147</sup> Für die meisten Berechnungen des GWP wird ein Zeithorizont von 100 Jahren festgelegt.

Das globale Erwärmungspotential gliedert sich in GWP C-Gehalt und GWP Prozesse. GWP C-Gehalt bezeichnet dabei die Menge an Kohlendioxid, die in Biomasse gespeichert ist, während GWP Prozesse den Gehalt an Treibhausgasen angibt, die in menschlich verursachten Prozessen emittiert werden. Die Summe dieser beiden Indikatoren wird als GWP Summe bezeichnet, die zusätzlich angegebene Zahl, z.B. „GWP Summe 100“, spiegelt den betrachteten Zeithorizont wider.

143 vgl. SCHROEDER 2010, S.24  
144 vgl. BOKU Wien / TU Graz, S.1.4.22  
145 vgl. PASCHOTTA: CO<sub>2</sub>-Äquivalente  
146 vgl. ebenda  
147 vgl. BOKU Wien / TU Graz, S.1.4.22

### Versauerungspotential

Versauerung beschreibt eine Erhöhung der H<sup>+</sup>-Ionen in Luft, Wasser und Boden durch die Freisetzung von Stoffen mit versauernder Wirkung.<sup>148</sup> Sie entsteht insbesondere durch Stickoxid- und Schwefeldioxidgase, die mit anderen Bestandteilen der Luft reagieren<sup>149</sup> und häufig durch vom Menschen verursachte Emissionen freigesetzt werden. Die so innerhalb weniger Tage entstehenden Schwefel- und Salpetersäuren lösen sich in Wasser und führen zu saurem Regen, wodurch Boden und Gewässer versauert werden. Zu den Folgen der Versauerung zählen unter anderem die Dezimierung von Fischbeständen und eine beschleunigte Korrosion an Gebäuden.<sup>150</sup> Als Maß für die Versauerung einer Region wird das Versauerungspotential AP definiert, das die Tendenz eines Stoffes, säurewirksam zu werden, abbildet. Analog zum GWP wird auch AP als Äquivalenzwert definiert. Demnach wird das Versauerungspotential jedes Stoffes relativ zu Schwefeldioxid in Kilogramm angegeben.

Anders als die globale Erwärmung stellt die Versauerung kein globales, sondern ein geographisch begrenztes Umweltproblem dar, weshalb der Indikator AP nicht für alle Regionen von gleich hoher Bedeutung ist.<sup>151</sup>

Die an dieser Stelle beschriebenen Indikatoren erlauben eine erste Einschätzung des Umwelteinflusses unterschiedlicher Stoffe auf den Planeten. Nachfolgend werden daher Richtwerte des globalen Erwärmungspotentials, des Primärenergieinhaltes und des Versauerungspotentials einiger Baustoffe aufgezeigt.

Baustoff	PEI [MJ/kg]		GWP Summe 100 [kg CO <sub>2</sub> eq.]	AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]
	PENRT	PERT		
Massivlehm	0,38	1,02	0,022	0,000082
Leichtlehm	2,94	2,37	-0,030	0,000627
Ziegel-MW (HLZ)	2,30	0,38	0,182	0,000514
Stahlbeton, 2% Bewehrung	1,66	0,06	0,161	0,000429
Stahlträger	23,20	0,77	1,530	0,005610
Holz (Fichte), sägerau, luftgetrocknet	1,74	14,50	-1,410	0,000628

Tabelle 68: Öko-Indikatoren einiger Baustoffe<sup>152</sup>

Hinsichtlich des benötigten Energiebedarfs zur Herstellung der Bauprodukte wird bei einem Vergleich gängiger Baustoffe deutlich, dass Lehm ohne bzw. mit sehr geringem Anteil an Zuschlägen einen äußerst niedrigen Primärenergieinhalt aufweist. Mit steigendem Anteil an energieintensiv hergestellten Zuschlags- und Zusatzstoffen nimmt der PEI von Lehm zu und liegt etwa im Bereich des PEI von Ziegelmauerwerk. Insbesondere Leichtlehme mit Zuschlägen, die unter hohem Energieeinsatz beispielsweise aufgeschäumt oder gebläht werden, weisen dabei einen höheren Verbrauch an energetischen Ressourcen auf. Beimengungen aus organischen Fasern nehmen hingegen kaum einen negativen Einfluss auf den PEI von Leichtlehm.

Den höchsten Primärenergieinhalt der gezeigten Baustoffe weist Stahl auf, da dieser unter enorm hoher Hitze verarbeitet wird und auch die Rohstoffgewinnung einen großen Energieverbrauch beansprucht.

148 vgl. o.A.: *Versauerungspotential*  
 149 IBO 2018a, S.9  
 150 vgl. BOKU Wien / TU Graz, S.1.4.23  
 151 vgl. ebenda, S.1.4.23  
 152 *Richtwerte gemäß Baubook Datenbank*

Der Beitrag zur globalen Erwärmung kann für Lehmbaustoffe als sehr gering bezeichnet werden und liegt deutlich unter den Werten konventioneller anorganischer Baustoffe. Das beste Ergebnis wird in diesem Bereich jedoch nicht von Lehm, sondern von Holz erzielt, da zur Berechnung des GWP auch jene Menge an CO<sub>2</sub> berücksichtigt wird, die z.B. von Bäumen aus der Atmosphäre gebunden wird („GWP C-Gehalt“). Dies führt zu einer insgesamt positiven CO<sub>2</sub>-Bilanz und wird als negativer GWP-Wert dargestellt.

Auch hier erreicht Stahl den mit Abstand höchsten Wert, aber auch Ziegel und Stahlbeton leisten einen nicht unwesentlichen Beitrag zur globalen Erwärmung.

Im Bereich des Versauerungspotentials stellen Lehmbaustoffe ebenfalls nur eine sehr geringe Gefahr für die Umwelt dar, während Stahl wiederum den höchsten Wert erzielt.

Der negative Einfluss von Lehmbaustoffen auf die Umwelt kann somit allgemein als sehr gering eingeschätzt werden. Wenngleich energieintensiv hergestellte Zuschläge die Ökobilanz von Lehm etwas verschlechtern können, zeigt der direkte Vergleich mit anderen Baustoffen, dass Lehm im Bezug auf seinen Umwelteinfluss nahezu konkurrenzlos günstige Werte aufweist.

#### 4.2.2 Ökologische Bewertungssysteme

Das Bauwesen besteht aus einer großen Zahl verschiedener Prozesse und beansprucht einen stetig wachsenden Anteil an Ressourcen. Auch die Auswahl an Bauprodukten wächst immer weiter, wodurch es längst nicht mehr möglich ist, die Nachhaltigkeit von Baustoffen und Bauweisen auf einen Blick zu erkennen. Um die ökologischen Auswirkungen im Bauwesen ersichtlich zu machen, wurden daher standardisierte Bewertungsmethoden wie Ökobilanzen, Umweltproduktdeklarationen oder Gebäudezertifizierungen entwickelt, die Stoffe und Prozesse auf Basis der in [4.2.1 Ökologische Kennwerte und ihre Bedeutung](#) vorgestellten Kenngrößen beurteilen.

**Ökobilanzen** – auch Lebenszyklusanalysen (LCA) genannt – sind quantitative Berechnungsverfahren, die eine Abschätzung der Auswirkung unterschiedlicher Produkte oder Prozesse auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit erlauben. Dabei findet eine Bilanzierung der Stoff- und Energieflüsse der analysierten Substanzen und Aktivitäten für einzelne Lebensabschnitte oder den gesamten Lebenszyklus statt.<sup>153</sup> Ökonomische und soziale Aspekte werden bei Ökobilanzen hingegen nicht berücksichtigt.<sup>154</sup>

Zur Vereinheitlichung der Lebenszyklusanalysen sind von der EU internationale Standards zur Erstellung von Ökobilanzen festgelegt worden, die in Österreich in der ÖNORM EN ISO 14040<sup>155</sup> verankert sind.

Ökobilanzen bestehen dabei aus einer Sach- und Wirkungsbilanz, nach deren Auswertung eine ökologische Bewertung der analysierten Stoffe oder Prozesse erfolgt. Die Sachbilanz erhebt in einem ersten Schritt sämtliche Stoffe, Transporte, Prozesse, Emissionen und Abfälle, die für das zu bewertende Objekt benötigt

153 o.A.: *Ökobilanzen*

154 vgl. OBEREDER 2013, S.12

155 ÖNORM EN ISO 14040:2009 11 01, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*

werden.<sup>156</sup> Als Ressourcenindikatoren werden hierzu beispielsweise der (nicht) erneuerbare Primärenergiebedarf und die Wassernutzung herangezogen. In der Wirkungsbilanz werden anschließend die in der Sachbilanz ermittelten Mengen mit Wirkungsindikatoren zur Beurteilung der Umweltwirkungen multipliziert und zu einem Wirkungspotential aufsummiert.<sup>157</sup> Die dafür verwendeten Indikatoren umfassen unter anderem das Treibhaus-, Ozonabbau- und Versauerungspotential.

Die Methode der Lebenszyklusanalyse ermöglicht jedoch nicht nur die ökologische Bewertung von Stoffen und Prozessen, sie bildet auch die Basis für weitere ökologische Beurteilungen, die beispielsweise der ökologischen Deklaration von Produkten dienen.<sup>158</sup>

**Umweltproduktdeklarationen** (EPD) beschreiben die einem (Bau-)Produkt zugrunde liegenden Wirkungen auf die Umwelt. Durch die Abbildung umweltbezogener Daten weisen EPDs nach, dass ein bestimmtes Produkt den Grundanforderungen der europäischen Bauprodukteverordnung entspricht. Die Erstellung und der geforderte Inhalt solcher Umweltproduktdeklarationen werden in den internationalen Normen ISO 14025 und EN15804<sup>159</sup> geregelt.<sup>160</sup>

Grundlage jeder EPD ist die Erstellung einer Ökobilanz für das zu bewertende Produkt über dessen gesamten Lebenszyklus. Um für alle mittels EPD deklarierten Güter eine Vergleichbarkeit zu schaffen, erfolgt die Ökobilanzierung unter festgelegten Randbedingungen. Produktgruppenspezifische Vorgaben ermöglichen an dieser Stelle die Berücksichtigung besonderer Merkmale unterschiedlicher Produktgruppen. Die auf diese Weise erstellten Ökobilanzen der EPDs können so wiederum für die Bilanzierung von Gebäuden herangezogen werden, wodurch die Gebäudebewertung realitätsnäher abgebildet werden kann als dies bei der bloßen Verwendung von Produktrichtwerten möglich ist.<sup>161</sup>

Während Umweltproduktdeklarationen eine sehr spezifische und punktuelle ökologische Bewertung von Bauprodukten ermöglichen, kann durch **Gebäudezertifizierungen** eine sehr umfassende ökologische Betrachtung erfolgen, die ein Gebäude samt all seiner Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus abbildet. Zu den bekanntesten Gebäudezertifizierungen zählen in Europa beispielsweise BREAM, LEED und das DGNB-Zertifizierungssystem.

Basierend auf einem Kriterienkatalog beurteilen diese Modelle sowohl ökologische als auch ökonomische und soziokulturelle Aspekte, die je nach Schwerpunkt des Systems unterschiedlich gewichtet werden. Als ökonomische Kriterien gelten dabei beispielsweise die Schonung endlicher Ressourcen und die Reduktion umweltschädlicher Emissionen, während im Bereich der Ökonomie unter anderem eine Senkung der Lebenszykluskosten angestrebt und die Wertentwicklung des Gebäudes beurteilt werden. Als soziale Aspekte fließen z.B. der Nutzerkomfort, das Innenraumklima und gestalterische Qualitäten in die Bewertung ein.

156 vgl. LIPP: *Ökobilanz und Ökoindikatoren*

157 vgl. OBEREDER 2013, S.12

158 vgl. ALBRECHT et.al. 2009, S.5

159 ISO 14025: *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen, Typ III Umweltdeklarationen: Grundsätze und Verfahren*

EN 15804: *Nachhaltigkeit von Bauwerken, Umweltdeklarationen für Produkte, Grundregeln für die Kategorie Bauprodukte*

160 vgl. o.A. *Umweltproduktdeklarationen EPD*

161 vgl. ALBRECHT et.al. 2009, S.5

All diese ökologischen Bewertungssysteme haben das Ziel, die Umweltauswirkungen eines Stoffes oder Prozesses über einen definierten Zeitraum abzubilden. Durch die Zertifizierung von Bauprodukten oder Gebäuden soll deren ökologische Qualität sichtbar gemacht und ihre Vergleichbarkeit ermöglicht werden. Zudem sollen auf diese Weise Anreize geschaffen werden, nachhaltige Bauweisen umzusetzen.

Weltweit existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Zertifizierungssysteme, die verschiedene Schwerpunkte setzen. Ein österreichisches Modell zur ökologischen Bewertung von Baustoffen, Bauteilen und Gebäuden stellt beispielsweise die Ökobilanzierung *OI3 Index* dar, die vom Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie entwickelt wurde und heute unter anderem für Wohnbauförderungen genutzt wird.

Da dieses Ökobilanz-Modell auf einem vergleichsweise einfachen Punktebewertungssystem basiert und der Schwerpunkt dieser Analyse auf der Ökologie von Baustoffen liegt, werden auch die in dieser Arbeit vorgestellten Bauteilaufbauten im nachfolgenden Kapitel mithilfe des *OI3 Index* bewertet.

#### 4.2.3 Ökologische Bauteilbewertung – *OI3 Index*

Das *Österreichische Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO)* hat im Jahr 2003 die quantitative Bewertungsmethode *OI3* für Baustoffe, Konstruktionen und Gebäude auf Basis von ökologischen Kennzahlen entwickelt.<sup>162</sup> Diese bewertet die ökologische Qualität der Produkte, Aufbauten und Gebäude anhand der Indikatoren PENRT, GWP und AP in Form eines Punktesystems und trifft quantitative Aussagen über das Potential der analysierten Stoffe, zur Klimaerwärmung sowie Versauerung der Umwelt beizutragen und nicht erneuerbare Energieressourcen zu verbrauchen.<sup>163</sup>

Die Punktebewertung setzt sich dabei zu je einem Drittel aus den genannten Indikatoren zusammen und ist an den Heizwärmebedarf angelehnt. Je niedriger die Punktezahl eines zu bewertenden Objekts, umso geringer ist seine Wirkung auf die Umwelt. Konventionelle Außenwände erreichen beispielsweise durchschnittlich 70 Punkte, während ökologisch optimierte Wandkonstruktionen 15 Punkte oder weniger aufweisen.<sup>164</sup>

Abhängig davon, ob die Bewertungsmethode *OI3* zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen oder ganzen Gebäuden herangezogen wird, kommen unterschiedliche Basisindikatoren zur Anwendung.

Die Analyse von Baustoffschichten innerhalb einer Konstruktion erfolgt durch den Indikator  $\Delta OI3$ , der den Einfluss eines einzelnen Baustoffes in einem Bauteil auf die Umwelt abbildet.  $\Delta OI3$  gibt somit an, um wie viele Punkte eine Baustoffschicht den  $OI3_{KON}$ -Wert einer Konstruktion erhöht oder senkt, wodurch ökologisch ungünstige Bauprodukte schnell ersichtlich werden.<sup>165</sup>

$OI3_{KON}$  bildet die ökologische Qualität von Bauteilen ab und wird auf eine Konstruktionsfläche von  $1m^2$  bezogen. Die  $OI3_{KON}$ -Punktezahl einer Konstruktion entspricht dabei nicht exakt der Summe der  $\Delta OI3$ -Punkte ihrer Bauteilschichten, sondern erzielt einen um  $109/3$  höheren Wert. Der Grund für diese Differenz ist eine

162 vgl. IBO: *Oekoindex 3, Einführende Information*

163 vgl. o.A. *Oekoindex OI3, Das Instrument zur ökologischen Optimierung von Gebäuden*

164 vgl. IBO: *Oekoindex 3, Einführende Information*

165 vgl. IBO 2018a, S.12

Nullpunktverschiebung der OI3-Punkte, um auch Gebäude der Bilanzgrenze TGH<sup>166</sup> im Bereich von 0-100 Punkten abbilden zu können.<sup>167</sup>

Zur Beurteilung von Gebäuden wird der Index  $OI3_{BGx}$  ermittelt, der sich aus den  $OI3_{KON}$ -Punkten der einzelnen Konstruktionen zusammensetzt. „BGx“ bezeichnet an dieser Stelle die jeweilige Bilanzgrenze, für die die Bewertung durchgeführt wird. Das Bilanzgrenzen-Konzept ermöglicht dabei unterschiedliche Komplexitätsgrade in der Beurteilung eines Gebäudes und reduziert den Erfassungsaufwand, da abhängig von der gewählten Bilanzgrenze nicht alle Bauteile bzw. Bauteilschichten in die OI3-Bewertung einfließen. Während BG0 im Wesentlichen nur die thermische Gebäudehülle beurteilt, ermöglicht BG6 eine ganzheitliche Betrachtung eines Gebäudes. In Österreich werden derzeit hauptsächlich die Bilanzgrenzen BG0 bis BG3 angewandt.<sup>168</sup> Eine detaillierte Aufschlüsselung der einzubeziehenden Bauteile und Bauteilschichten in Abhängigkeit von der Bilanzgrenze kann im *Leitfaden zur Berechnung des Ökoindex OI3 für Bauteile und Gebäude* der IBO nachgelesen werden.

Ab der Bilanzgrenze 3 muss zusätzlich zu den allgemeinen ökologischen Kennwerten der Baustoffe auch die Nutzungsdauer der Bauteilschichten berücksichtigt werden. Dadurch werden nicht mehr nur die Auswirkungen der Errichtung eines Gebäudes berücksichtigt, sondern auch Sanierung und Instandhaltung der Immobilie. Dies erfolgt für Wohnbauten üblicherweise für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren.

Die Nutzungsdauer unterschiedlicher Bauteilschichten wie Putzsysteme oder tragende Konstruktionen wird von der IBO in einem Nutzungsdauerkatalog festgelegt, der Teil des *Leitfadens zur Berechnung des Entsorgungsindikators  $EI_{KON}$  von Bauteilen und des Entsorgungsindikators  $EI_{10}$  auf Gebäudeebene* ist.<sup>169</sup> Zusätzlich wurden für eine Vielzahl von Baustoffen deren durchschnittliche Nutzungsdauer in einem Forschungsprojekt der IBO<sup>170</sup> bestimmt.

### *OI3-Bauteilbewertung: Rahmenbedingungen*

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit angeführten Bauteilaufbauten mithilfe des *OI3 Index* auf ihre ökologische Qualität untersucht. Um sämtliche Bauteile bewerten zu können, wird hierfür die Bilanzgrenze BG3 festgelegt. Diese umfasst sämtliche Wand- und Deckenkonstruktionen eines Gebäudes inklusive etwaiger Türelemente. Als Betrachtungszeitraum wird eine Zeitspanne von 100 Jahren festgelegt, die Nutzungsdauer der verschiedenen Baustoffe wird der von der IBO erarbeiteten Studie<sup>171</sup> entnommen.

Die Bewertung der Bauteile erfolgt mithilfe der Software *Archiphysik*, die eine direkte Verknüpfung der verschiedenen Baustoffe mit der Datenbank *Baubook*<sup>172</sup> erlaubt, wodurch ökologische Kennwerte automatisch eingefügt werden. Dies erleichtert zum einen die Erstellung der Ökobilanz, zum anderen verringert es die Fehleranfälligkeit der Bewertung und minimiert Datenunsicherheiten.

166 Die Bilanzgrenze „TGH“ aus Version 1.7 stellt ab Version 2.0 die Bilanzgrenze „0“ dar.

167 vgl. LIPP 2009, S.20

168 o.A. *Oekoindex OI3*

169 vgl. IBO 2018b, S.9

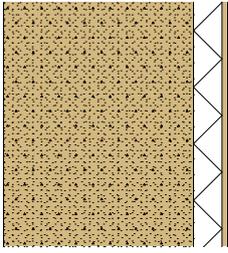
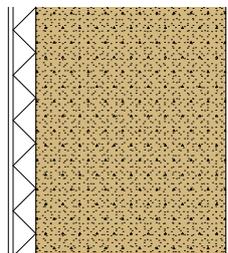
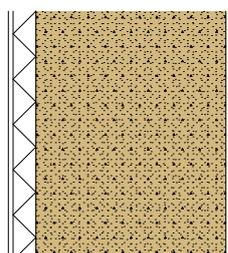
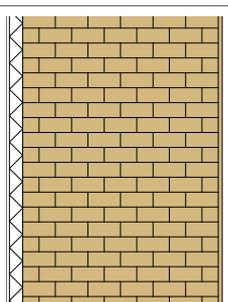
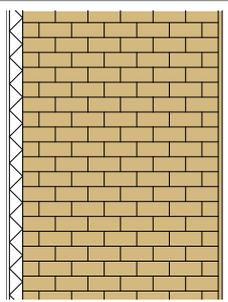
170 vgl. IBO 2009

171 IBO 2009

172 Die Datenbank BAUBOOK wird von der IBO gemeinsam mit dem Energieinstitut Vorarlberg betrieben. Die Kennwerte der Datenbank stimmen daher bestmöglich mit dem Forschungsstand der IBO überein.

## Außenwandsysteme

Eine Berechnung der OI3-Punktebewertung der in dieser Arbeit gezeigten Außenwände zeigt, welches ökologische Potential die unterschiedlichen Konstruktionen aufweisen. Da dieses mitunter durch ein einziges Material deutlich beeinflusst wird, gibt die nachstehende Liste einen Überblick über die  $\Delta$ OI3-Punkte der jeweiligen Bauteilschichten innerhalb eines Wandaufbaus.

	<i>L_AW1: Stampflehmwand, Innendämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Stampflehm	1,000	100	62,6
	Schilfdämmplatte	0,150	50	- 2,0
	Lehmputz	0,030	100	1,7
<b>Gesamt</b>	<b>1,180</b>		<b>62,3</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 25 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW2-1: Stampflehmwand, Schilfdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Schilfdämmplatte	0,120	50	- 1,6
	Stampflehm	1,000	100	62,6
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>		<b>72,1</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 35 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW2-2: Stampflehmwand, Holzfaserdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Holzfaserdämmplatte	0,120	50	56,4
	Stampflehm	1,000	100	62,6
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>		<b>130,1</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 93 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW3-1: Lehmsteinmauerwerk, Schilfdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Schilfdämmplatte	0,100	50	- 1,3
	Lehmstein schwer	1,500	100	68,7
	Lehmputz	0,030	100	1,7
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>		<b>80,2</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 43 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW3-2: Lehmsteinmauerwerk, Holzfaserdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Holzfaserdämmplatte	0,100	50	47,0
	Lehmstein schwer	1,500	100	68,7
	Lehmputz	0,030	100	1,7
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>		<b>128,5</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 92 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

	<i>L_AW4: Holzständerwand, Lehmsteinausfachung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Hanfämmplatte AW	0,080	50	12,7
	Leichtlehmstein zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	100 100	30,1 - 0,6
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	<b>Gesamt</b>	<b>0,375</b>		<b>55,0</b>
	<b>OI3<sub>KON</sub> = 18 Pkt./m<sup>2</sup></b>			
	<i>L_AW5-1: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Schilfdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Schilfdämmplatte	0,035	50	- 0,5
	Schilfdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240 0,240	50 100	- 3,0 - 0,6
	Lehmstein schwer	0,115	100	5,3
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>		<b>13,9</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 22 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW5-2: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Holzfaserdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Holzfaserdämmplatte	0,035	50	16,5
	Holzfaserdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240 0,240	50 100	106,1 - 0,6
	Lehmstein schwer	0,115	100	5,3
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>		<b>139,9</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = 103 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_AW6: Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalkputz	0,025	80	11,1
	Hanfämmplatte AW	0,020	50	3,2
	Hanfämmplatte AW zwischen TW Fichtenholz	0,240 0,240	50 100	35,7 - 0,6
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
	Lehmputz	0,020	100	1,1
	<b>Gesamt</b>	<b>0,321</b>		<b>54,9</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = 18 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

<i>L_AW7: Stahlbetonskelett, Stampflehm-Ausfuchung</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	80	11,1
Holzfaserdämmplatte	0,200	50	94,0
Stampflehm zwischen Stahlbetonstützen	0,200	100	10,5
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
Lehmputz	0,005	100	0,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>		<b>126,3</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 89 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_AW8: Stahlbetonskelett, Leichtlehmstein-Ausfuchung</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	80	11,1
Holzfaserdämmplatte	0,200	50	94,0
Leichtlehmstein zwischen Stahlbetonstützen	0,200	100	24,1
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
Lehmputz	0,005	100	0,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>		<b>139,8</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 103 Pkt./m<sup>2</sup></b>

Bauteilliste 28: Außenwandsysteme aus Lehm

<i>K_AW1: Stahlbetonwand</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Zement-Putz	0,020	70	11,4
EPS-Dämmplatte	0,200	50	40,7
Stahlbeton	0,200	100	60,5
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,430</b>		<b>113,8</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 77 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>K_AW2: Ziegelmauerwerk, Außendämmung</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Zement-Putz	0,020	70	11,4
EPS-Dämmplatte	0,200	50	40,7
Vollziegel	0,250	100	39,9
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,480</b>		<b>93,3</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 56 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>K_AW3: Ziegelmauerwerk, Kerndämmung</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Zement-Putz	0,020	70	11,4
Vollziegel	0,250	100	39,9
Mineralwolle	0,200	50	25,6
Vollziegel n.t.	0,120	100	29,1
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,600</b>		<b>107,3</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 70 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>K_AW4: Holzständerwand</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Silikatputz o.Kh.	0,010	50	10,9
HWL-Platte	0,050	50	9,8
Mineralwolle zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	50 100	28,8 - 0,6
OSB-Platte	0,018	60	10,9
Mineralwolle zw. Lattung	0,080 0,080	50 100	9,7 - 0,2
Gipskartonplatte	0,0125	60	6
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,421</b>		<b>76,8</b>
			<b><math>OI3_{KON} = 40</math> Pkt./m<sup>2</sup></b>

Bauteilliste 29: konventionelle Außenwandsysteme

Wie die obenstehende Auflistung verdeutlicht, weisen Lehmbaustoffe in Abhängigkeit von ihrer Schichtstärke generell sehr niedrige ökologische Auswirkungen auf. Bei einer Ausführung von tragenden Lehmteilen wird jedoch aufgrund der enorm dicken Bauteilstärken ein sehr hoher Ressourcenverbrauch notwendig. Trotzdem erreichen tragende Stampflehmwände mit einer Schichtstärke von 1m keine höhere  $\Delta OI3$ -Punktezahl als eine 20cm dicke Stahlbetonwand.

Ein wesentlicher Einfluss auf die ökologische Gesamtpformance eines Bauteiles ist neben dem tragenden Baustoff auch der Wärmedämmung zuzuschreiben. Dies wird insbesondere bei den Lehm-Außenwänden L\_AW2, L\_AW3 und L\_AW5 deutlich, bei denen eine Berechnung mit zwei verschiedenen Dämmstoffen durchgeführt wird.

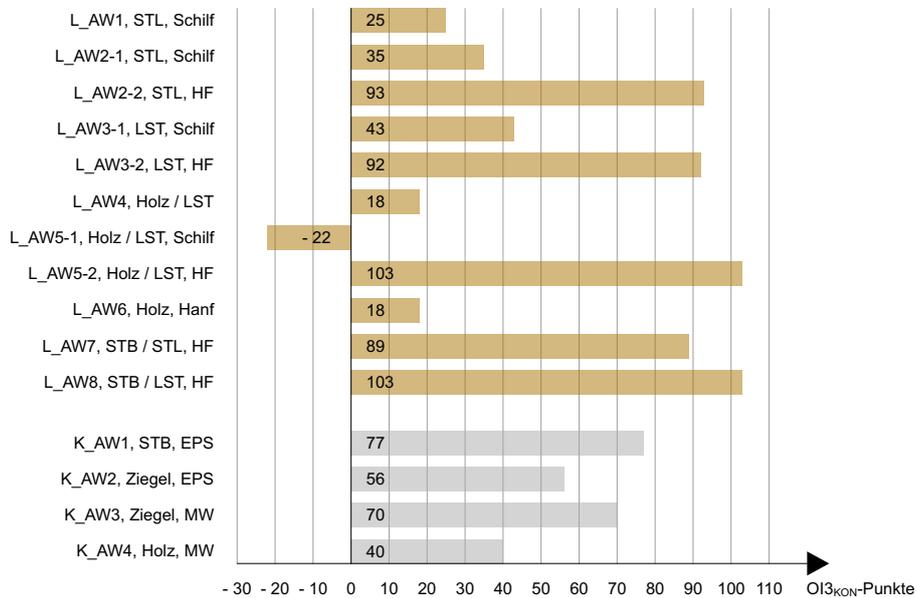


Abbildung 21:  $OI3_{KON}$ -Bewertung der Außenwandsysteme

Die obenstehende Grafik zeigt die erzielten  $OI3_{KON}$ -Punkte der in dieser Arbeit behandelten Außenwandaufbauten. Die konventionellen Massivwände K\_AW1 bis K\_AW3 werden mit 56 bis 77 Punkten beurteilt, was dem durchschnittlichen Wert ökologisch nicht optimierter Konstruktionen entspricht. Die Außenwand K\_AW4 in leichter Holzbauweise liegt mit 40 Punkten bereits deutlich unterhalb der Punktezahl der Massivwände. Dies liegt einerseits am geringeren Energieverbrauch bei der

Herstellung von Holz im Vergleich zu Stahlbeton oder Ziegel, insbesondere aber auch an der positiven CO<sub>2</sub>-Bilanz von Holzbaustoffen.

Die OI<sub>3</sub><sub>KON</sub>-Punkte der Lehm-Außenwände weisen mit -22 bis 103 Punkten eine deutlich größere Schwankungsbreite auf als die konventionellen Außenwandsysteme. Wenngleich die ökologische Bewertung von Lehmbaustoffen selbst als sehr gut beurteilt wird, können andere Baustoffe die OI<sub>3</sub>-Bilanz von Lehmkonstruktionen deutlich negativ beeinflussen.

Die höchsten Punktezahlen werden im Bereich der Lehm-Außenwände von jenen Aufbauten erzielt, die mit Holzfaserplatten gedämmt werden. Diese weisen zwar einen geringen Einfluss auf die globale Erwärmung auf und gelten allgemein als nachhaltiger Baustoff, sie benötigen allerdings in ihrer Herstellung ein vergleichsweise hohes Maß an Energieressourcen. Mit einem PENRT von 14,4MJ/kg liegt ihr Energieverbrauch nahezu im Bereich von Steinwolle (PENRT 21,4MJ/kg).

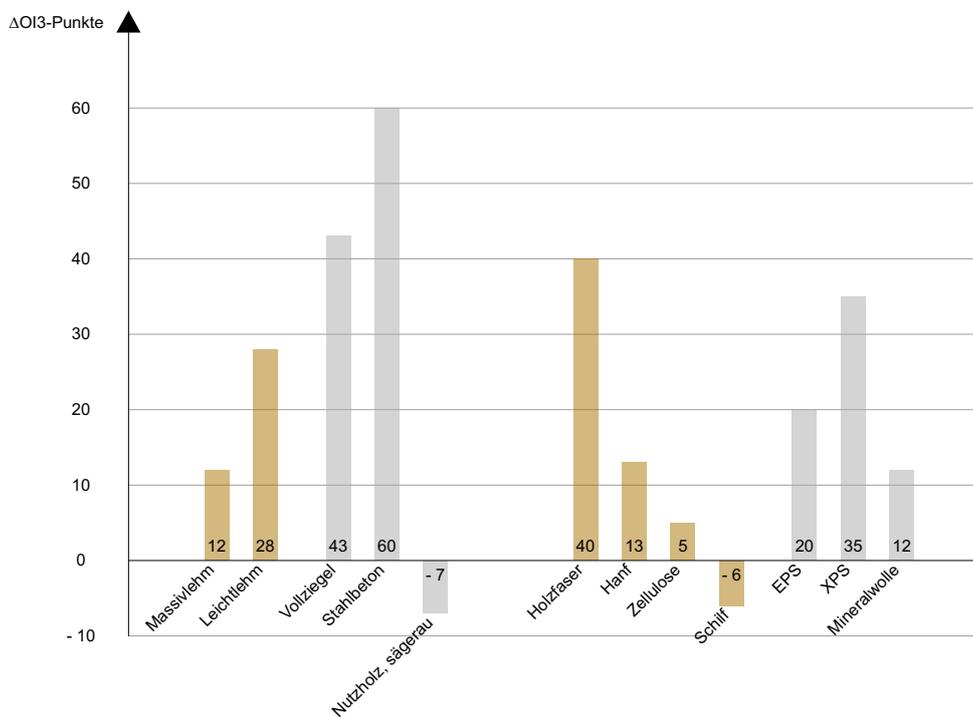


Abbildung 22: ΔOI<sub>3</sub>-Punktebewertung einiger Baustoffe (d = 20cm)

Ein Vergleich der Bauteile L\_AW2-1 und L\_AW2-2, die sich nur durch den gewählten Wärmedämmstoff unterscheiden, verdeutlicht diesen Einfluss auf die ökologische Gesamtleistung der Bauteile. Während L\_AW2-1 mit Schilf gedämmt ist und 35 OI<sub>3</sub><sub>KON</sub>-Punkte erzielt, erreicht die Außenwand L\_AW2-2 mit einer Holzfaserdämmung gleicher Schichtstärke 93 OI<sub>3</sub><sub>KON</sub>-Punkte. Die Auswirkung dieser Bauteilschicht auf die Umwelt ist somit rein aufgrund des gewählten Wärmedämmstoffes nahezu dreimal größer als jene des Aufbaus L\_AW2-1.

Hinzu kommt für die Bauteile L\_AW1 bis L\_AW3, dass Lehm zwar allgemein nur eine geringe Zahl an ΔOI<sub>3</sub>-Punkten aufweist, aufgrund der enorm hohen Schichtstärke in diesen Bauteilen jedoch trotzdem zum ökologischen Schwergewicht wird.

Die Lehm-Außenwandsysteme, die anstelle einer Holzfaserplatte mit anderen Baustoffen gedämmt werden und keine tragenden Lehmschichten aufweisen, erreichen maximal 43 OI<sub>3</sub><sub>KON</sub>-Punkte und erzielen somit ein ökologisch ähnlich günstiges Verhalten wie die konventionelle Holz-Außenwand K\_AW4.

Insbesondere die Bauteilaufbauten L\_AW4, L\_AW5-1 und L\_AW6 liegen mit -22 bis 18  $OI3_{KON}$ -Punkten deutlich unter der durchschnittlich erzielten Punktzahl für Außenwandsysteme. Eine tragende Holzkonstruktion ermöglicht bei diesen Außenwänden eine wesentlich schlankere Ausführung der Bauteile als im Bereich der tragenden Lehmwände. Zusätzlich werden bei diesen Wandsystemen neben Lehmbaumstoffen hauptsächlich Schilf- und Hanfdämmplatten eingesetzt, deren ökologischer Fußabdruck im Vergleich zu anderen Wärmedämmstoffen sehr gering ist. Auf diese Weise kann die  $OI3$ -Punktbewertung im Vergleich zur Holzständer-Außenwand K\_AW4 mit konventioneller Mineralwollendämmung deutlich unterschritten werden.

Die Stahlbeton-Lehm-Hybride L\_AW7 und L\_AW8 erzielen mit 89 und 103  $OI3_{KON}$ -Punkten auf den ersten Blick wiederum eine sehr ungünstige ökologische Bewertung. Dies liegt jedoch nicht direkt an der tragenden Stahlbetonkonstruktion, die nur einen sehr geringen Masseanteil in diesem Bauteil einnimmt. Der Grund für die hohe Punktebewertung resultiert bei diesen Aufbauten vielmehr erneut aus der eingesetzten Holzfaserdämmung, die bei einer Schichtstärke von 20cm 94  $\Delta OI3$ -Punkte aufweist. Eine zweite Bewertung dieser beiden Außenwände mit Hanfdämmstoffen anstelle der Holzfaserdämmplatte reduziert die  $OI3_{KON}$ -Punktebewertung auf 27 bzw. 41 Punkte. Die Außenwand L\_AW8 kann auf diese Weise aus ökologischer Sicht mit dem konventionellen Holz-Skelettbau gleichgesetzt werden, das Bauteil L\_AW7 unterschreitet deren ökologische Bewertung sogar um über 10  $OI3_{KON}$ -Punkte.

<i>L_AW7 mit Holzfaserdämmung</i>		
Material	d [m]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	11,1
<b>Holzfaserdämmung</b>	<b>0,200</b>	<b>94,0</b>
Stampflehm zwischen Stahlbetonstützen	0,200	10,5
Lehmplatte TP	0,016	4,4
Lehmputz	0,005	0,3
Gesamt	0,446	126,3
		<b><math>OI3_{KON} = 89</math> Pkt./m<sup>2</sup></b>

Tabelle 69:  $\Delta OI3$ -Bewertung der Lehmwand L\_AW7 bei unterschiedlichem Dämmstoff

<i>L_AW7 mit Hanfdämmung</i>		
Material	d [m]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	11,1
<b>Hanfdämmung</b>	<b>0,200</b>	<b>31,7</b>
Stampflehm zwischen Stahlbetonstützen	0,200	10,5
Lehmplatte TP	0,016	4,4
Lehmputz	0,005	0,3
Gesamt	0,446	64,1
		<b><math>OI3_{KON} = 27</math> Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_AW8 mit Holzfaserdämmung</i>		
Material	d [m]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	11,1
<b>Holzfaserdämmung</b>	<b>0,200</b>	<b>94,0</b>
Leichtlehmstein zwischen Stahlbetonstützen	0,200	24,1
Lehmplatte TP	0,016	4,4
Lehmputz	0,005	0,3
Gesamt	0,446	139,8
		<b><math>OI3_{KON} = 103</math> Pkt./m<sup>2</sup></b>

Tabelle 70:  $\Delta OI3$ -Bewertung der Lehmwand L\_AW8 bei unterschiedlichem Dämmstoff

<i>L_AW8 mit Hanfdämmung</i>		
Material	d [m]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalkputz	0,025	11,1
<b>Hanfdämmung</b>	<b>0,200</b>	<b>31,7</b>
Leichtlehmstein zwischen Stahlbetonstützen	0,200	24,1
Lehmplatte TP	0,016	4,4
Lehmputz	0,005	0,3
Gesamt	0,446	77,5
		<b><math>OI3_{KON} = 41</math> Pkt./m<sup>2</sup></b>

Der Vergleich der Außenwandsysteme hinsichtlich ihres Einflusses auf die Umwelt verdeutlicht, dass nicht nur die ohnehin als energieintensiv bekannten Baustoffe zum ökologischen Schwergewicht einer Konstruktion werden können, sondern auch

andere, allgemein als nachhaltig und ressourcenschonend angesehene Materialien, die ökologische Performance von Bauteilen deutlich verschlechtern können.

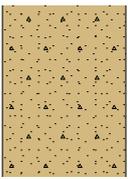
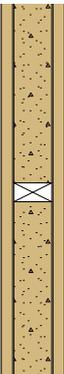
Unter Berücksichtigung des negativen Einflusses der Holzfaserdämmung auf die OI3-Punktebewertung zeigt sich trotz allem, dass die vorgestellten Lehmbauteile einen deutlich geringeren ökologischen Fußabdruck aufweisen als konventionelle Konstruktionen aus Stahlbeton oder Ziegel, sofern bei der Wahl des Dämmstoffes auf Materialien wie Hanf oder Schilf zurückgegriffen wird.

Selbst eine Ausführung der Außenwand als Stahlbetonskelett mit Lehmausfachung anstelle einer massiven Stahlbetonkonstruktion verbessert die ökologische Bewertung deutlich, da ein großer Anteil dieses energieintensiven Materials eingespart wird.

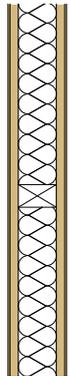
Auch im Bereich des Holz-Skelettbaus können durch den Einsatz von Lehm energetische und stoffliche Ressourcen geschont werden, in dem ein Teil der Wärmedämmstoffe durch Leichtlehm-Produkte ersetzt wird. Die in der konventionellen Holzständerwand K\_AW4 eingesetzte Mineralwolle-Gefachdämmung und das im Lehmbauteil L\_AW4 verbaute Leichtlehm-Mauerwerk erzielen bei einer Schichtstärke von 24cm jeweils ca. 30  $\Delta$ OI3-Punkte. Mit einer zu erwartenden Nutzungsdauer von 100 Jahren sind Leichtlehmsteine dagegen doppelt so lange einsetzbar wie die Gefachdämmung, deren durchschnittliche Nutzungsdauer mit 50 Jahren bewertet wird. Unter dieser Berücksichtigung liegt die OI3<sub>KON</sub>-Punktezahl der Außenwand L\_AW4 mit 18 Punkten nur halb so hoch wie jene der konventionellen Holzständerwand K\_AW4, die 40 OI3<sub>KON</sub>-Punkte erzielt.

### Innenwandsysteme: Scheidewände

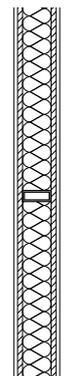
Eine Beurteilung der Wände innerhalb einer Wohneinheit betreffend ihrer ökologischen Performance zeigt erneut, wie gering der Einfluss von Lehmbaustoffen auf die Umwelt einzuschätzen ist. Wie im Bereich der Außenwände wird jedoch auch hier deutlich, dass einzelne Baustoffe die ökologische Gesamtbeurteilung eines Bauteils schnell verändern können.

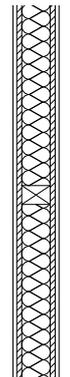
	<i>L_IW1: Stampflehmwand</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Stampflehm	0,240	100	15,0
	<b>Gesamt</b>	<b>0,240</b>		<b>15,0</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 21 Pkt./m<sup>2</sup></b>				
	<i>L_IW2: Holzständerwand, Leichtlehmschüttung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	Schilfrohwewebe	0,003	100	- 0,1
	Leichtlehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,100	100	4,5
	Schilfrohwewebe	0,003	100	- 0,1
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	<b>Gesamt</b>	<b>0,166</b>		<b>7,5</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 28 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

	<i>L_IW3: Lehmsteinmauerwerk</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	Lehmstein schwer	0,115	100	5,3
	Lehmputz	0,030	100	1,7
	<b>Gesamt</b>	<b>0,175</b>		<b>8,6</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 27 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

	<i>L_IW4: Holzständerwand, Hanfdämmung</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Lehmputz	0,005	100	0,3
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
	Hanfdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	12,4
		0,100	100	- 0,2
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
	Lehmputz	0,005	100	0,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,142</b>		<b>21,5</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 14 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

Bauteilliste 30: Scheidewände aus Lehm

	<i>K_IW1: Metallständerwand</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6,0
	Mineralwolle zwischen Metallprofil	0,075	50	9,6
		0,075	100	57,6
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6,0
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,120</b>		<b>81,8</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 45 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

	<i>K_IW2: Holzständerwand</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6,0
	Mineralwolle zwischen TW Fichte	0,080	50	9,6
		0,080	100	- 0,2
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6,0
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,125</b>		<b>24,2</b>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 12 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

	<i>K_IW3: Ziegelmauerwerk</i>			
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
	Vollziegel n.t.	0,120	100	29,1
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
	<b>Gesamt</b>	<b>0,140</b>		<b>31,8</b>
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 4 Pkt./m<sup>2</sup></b>				

Bauteilliste 31: konventionelle Scheidewände

Als Scheidewände werden aktuell vor allem leichte Konstruktionen in Trockenbauweise ausgeführt, die meist aus einer tragenden Metall- oder Holzständerkonstruktion und einer Beplankung mit Gipsplatten bestehen.

Im Bereich der Lehmteile werden diesen Ausführungen sowohl massive Wände aus Stampflehm-Fertigteilen oder Lehmsteinen als auch leichtere Holz-Lehm-Hybride gegenübergestellt.

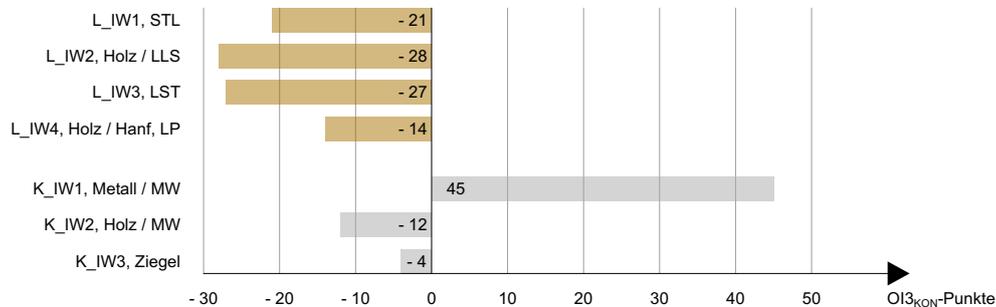


Abbildung 23: OI3<sub>KON</sub>-Bewertung der Scheidewände

Ein Vergleich der OI3<sub>KON</sub>-Punktezahlen der unterschiedlichen Wandaufbauten zeigt, dass die Lehmteile L\_IW1 bis L\_IW4 sowie die konventionellen Wandsysteme K\_IW2 und K\_IW3 kaum Auswirkungen auf die Umwelt verursachen. Ihre Punktebewertung liegt im Bereich von -4 bis -28 OI3<sub>KON</sub>-Punkten.

Die Metallständerwand K\_IW1 erzielt mit 45 OI3<sub>KON</sub>-Punkten eine deutlich schlechtere Ökobilanz, was auf den hohen  $\Delta$ OI3-Wert der Metallkonstruktion von 57,6 Punkten zurückzuführen ist und aus dem benötigten Energieverbrauch in der Metallherstellung resultiert. Die Holzständerwand K\_IW2, die sich in ihrem Aufbau rein durch das Traggerüst vom Bauteil K\_IW1 unterscheidet, weist hier mit -12 OI3<sub>KON</sub>-Punkten ein um 57 Punkte besseres Ergebnis auf.

Material	QS [m]	$\Delta$ OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Holzstütze	0,08 x 0,05	- 0,2
Metallprofil	0,075 x 0,035	57,6

Tabelle 71:  $\Delta$ OI3-Bewertung eines Holz- und Stahlprofils im direkten Vergleich

Im Bereich der Lehm-Scheidewände wird von allen Bauteilen eine äußerst geringe Punktebewertung erzielt. Die Bauteile L\_IW1 und L\_IW3 bestehen dabei ausschließlich aus Lehmstoffen, während im Bauteil L\_IW2 zusätzlich eine Holzständerkonstruktion und zwei Lagen Schilfrohwergewebe verbaut werden. Diesen Baustoffen ist gemein, dass sie in ihrer Herstellung kaum energetische Ressourcen benötigen und auch ihr Beitrag zur globalen Erwärmung und Versauerung der Umwelt als sehr gering eingeschätzt wird.

Die Lehmwand L\_IW4 erzielt zwar mit -14 OI3<sub>KON</sub>-Punkten ein ebenfalls sehr gutes Ergebnis, erhält aber aufgrund ihres Aufbaus eine etwas schlechtere Bewertung als die übrigen Lehm-Scheidewände. Das Bauteil weist einen deutlich geringeren Lehmanteil auf als die Aufbauten 1 bis 3, der auf ein beidseitiges Trockenputzsystem beschränkt ist. Die Holzständerkonstruktion wird an dieser Stelle nicht mit Lehm, sondern mit Hanfdämmstoff ausgefacht. Wenngleich dieser im Vergleich zu anderen Wärmedämmungen ökologisch weitestgehend unbedenklich ist, erzielt er keine ebenso gute Öko-Bilanz wie die zuvor eingesetzten Lehmstoffe.

Allgemein zeigt sich, dass die Auswirkungen auf den Planeten im Bereich der Wandsysteme innerhalb einer Wohnung als relativ gering angesehen werden können.

Anders als bei Außenwänden benötigen diese Bauteile kaum Wärmedämmstoffe und nur in Ausnahmefällen massive Baustoffe wie Stahlbeton.

Lehmabstoffe eignen sich für diese Bauteile besonders gut, da sie hier weder der Witterung ausgesetzt sind noch eine tragende Funktion übernehmen müssen. Gleichzeitig verbessern sie durch ihre rasche Feuchteregulierung und ihr gutes Wärmespeichervermögen das Raumklima und stellen zudem nahezu keine Belastung für die Umwelt dar.

### Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände

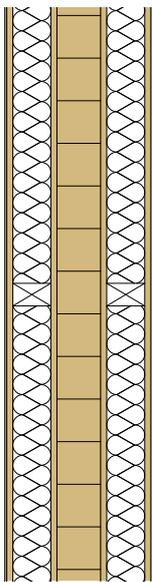
Wände, die Wohneinheiten bzw. allgemeine Bereiche des Hauses voneinander trennen, müssen höhere Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz erfüllen als Scheidewände. Zudem übernehmen diese Wände häufiger eine tragende Funktion.

In Wien werden diese Bauteile momentan wie Scheidewände oft in Trockenbauweise ausgeführt, aber auch massive Konstruktionen aus Stahlbeton oder Ziegel sind je nach statischer Anforderung denkbar.

Im Bereich des Lehmbaus werden diesen Aufbauten Holzständerkonstruktionen mit unterschiedlich hohem Lehmanteil gegenübergestellt. Zusätzlich können sich auch Lehmsteinwände für diese Funktion eignen.

Das in Kapitel 3.4 gezeigte Bauteil L\_WTW2 wird an dieser Stelle nicht behandelt, da es die gesetzlich geregelten Anforderungen an den Schallschutz nicht erfüllt (vgl. 3.4.2 Innenwandsysteme).

<i>L_WTW1: Holzständerwand, Lehmstein</i>				
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Lehmputz	0,005	100	0,3	
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	5,8	
	0,100	100	- 0,2	
Lehm-Ausbauplatte	0,016	50	10,0	
Lehmstein schwer	0,115	100	5,3	
Lehm-Ausbauplatte	0,016	50	10,0	
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	5,8	
	0,100	100	- 0,2	
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4	
Lehmputz	0,005	100	0,3	
<b>Gesamt</b>	<b>0,389</b>		<b>45,9</b>	
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 9 Pkt./m<sup>2</sup></b>	



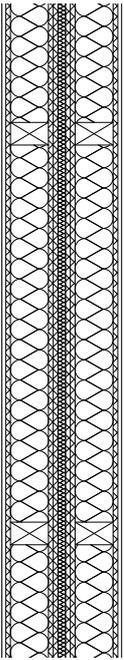
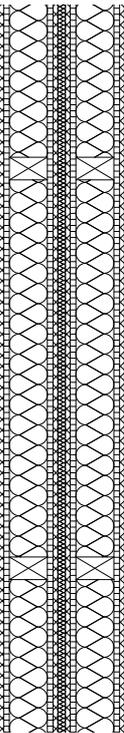
<i>L_WTW3: Holzständerwand, Lehm- bauplatten</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Lehmputz	0,005	100	0,3
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	5,8
	0,100	100	- 0,2
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	13,7
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	13,7
Glaswolle Akustik	0,020	50	7,2
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	13,7
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	13,7
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	5,8
	0,100	100	- 0,2
Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
Lehmputz	0,005	100	0,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>		<b>82,8</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 46 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_WTW4: Lehmsteinmauerwerk</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Lehmputz	0,020	100	1,1
Hanfämmplatte	0,050	50	6,5
Lehmstein schwer	0,240	100	11,0
Lehmputz	0,020	100	1,1
<b>Gesamt</b>	<b>0,330</b>		<b>19,7</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = - 16 Pkt./m<sup>2</sup></b>

*Bauteilliste 32: Wohnungstrennwände aus Lehm*

<i>K_WTW1: Stahlbetonwand</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
Gipskartonplatte	0,0125	60	6
Mineralfaserplatte	0,040	50	3,5
Stahlbeton	0,170	100	51,4
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,243</b>		<b>63,5</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 27 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>K_WTW2: Ziegelmauerwerk</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
Gipskartonplatte	0,0125	60	6
Mineralfaserplatte	0,060	50	5,2
Vollziegel	0,250	100	54,8
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,343</b>		<b>68,7</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 32 Pkt./m<sup>2</sup></b>

		<i>K_WTW3: Holzständerwand, GK</i>			
		Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	6,4	
	TW Fichtenholz	0,100	100	- 0,2	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Mineralwolle	0,020	50	2,6	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	6,4	
	TW Fichtenholz	0,100	100	- 0,2	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,315</b>		<b>53,5</b>	
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 17 Pkt./m<sup>2</sup></b>	
		<i>K_WTW4: Holzständerwand, GK/OSB</i>			
		Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	OSB-Platte	0,015	60	9,1	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	6,4	
	TW Fichtenholz	0,100	100	- 0,2	
	OSB-Platte	0,015	60	9,1	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Mineralwolle	0,020	50	2,6	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	OSB-Platte	0,015	60	9,1	
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	50	6,4	
	TW Fichtenholz	0,100	100	- 0,2	
	OSB-Platte	0,015	60	9,1	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>		<b>77,7</b>		
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 41 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

*Bauteilliste 33: konventionelle Wohnungstrennwände*

Ähnlich wie im Bereich der Außenwandsysteme zeigt auch die  $OI3_{KON}$ -Bewertung der Wohnungstrennwände sehr unterschiedliche Resultate für die verschiedenen, in dieser Arbeit behandelten Trennbauteile.

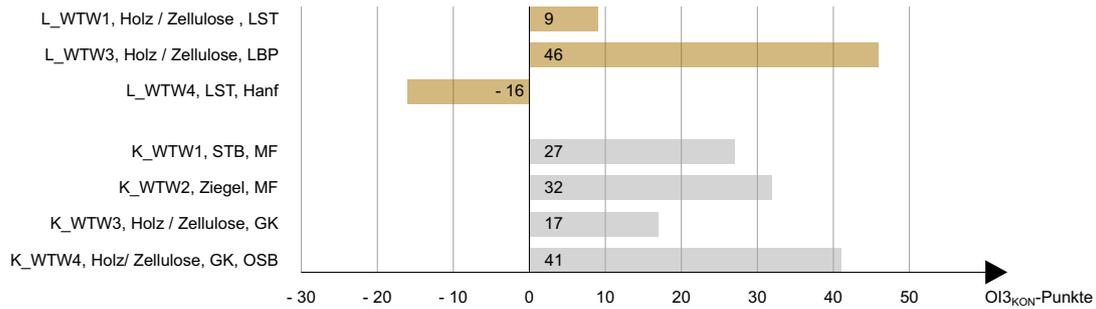


Abbildung 24: OI3<sub>KON</sub>-Bewertung der Wohnungstrennwände

Während die Lehm-Trennwände L\_WTW1 und L\_WTW4 mit 9 bzw. -16 OI3<sub>KON</sub>-Punkten ein ökologisch sehr gutes Ergebnis erzielen, liegt die Wohnungstrennwand L\_WTW3 mit 46 OI3<sub>KON</sub>-Punkten sowohl über der Punktebewertung der Lehmwände als auch der konventionellen Wandsysteme.

Das Bauteil L\_WTW3 zeigt eine Holzständerkonstruktion mit einem Dämmstoff aus Zellulosefaser, als Bepunktung werden schwere Lehm-Ausbauplatten eingesetzt. Diese benötigen aufgrund ihrer höheren Dichte und Dicke im Vergleich zu Lehm-Trockenputzplatten einen für Lehm-Baustoffe ungewöhnlich hohen Energieaufwand in der Herstellung, wodurch der  $\Delta$ OI3-Wert dieser Bauteilschicht negativ beeinflusst wird. Wenngleich diese Lehm-Bauplatten in Relation zu anderen Baustoffen einen kleinen ökologischen Fußabdruck aufweisen, erzielen sie dennoch verglichen mit anderen Lehmprodukten größere Auswirkungen auf die Umwelt. Eine Reduktion der Anzahl an schweren Lehm-Ausbauplatten kann die ökologische Gesamtleistung des Bauteils daher bereits deutlich verbessern.

Die Wohnungstrennwand L\_WTW1 wird beispielsweise ebenfalls mit schweren Lehm-Ausbauplatten bepunktet, anstelle von vier Lagen dieses Baustoffes werden allerdings nur zwei Schichten eingebaut. Zusätzlich ist der Einsatz von Dämmstoffen durch einen Bauteilkern aus Lehmsteinen wesentlich geringer. Insgesamt zeigt dieser Wandaufbau mit 9 statt 46 OI3<sub>KON</sub>-Punkten eine deutlich bessere ökologische Bauteilleistung.

Das beste Ergebnis wird in diesem Vergleich vom Wandaufbau L\_WTW4 erzielt, der aus einem Lehmsteinmauerwerk und einer dünnen Dämmschicht aus Hanf besteht.

Im Bereich der konventionellen Wohnungstrennwände zeigt sich, dass die massiven Wandaufbauten K\_WTW1 und K\_WTW2 deutlich höhere Punktebewertungen erzielen als die leichte Holzständerwand K\_WTW3, was auf die schlechtere Ökobilanz von Stahlbeton und Ziegel im Vergleich zu Holz zurückzuführen ist. Das Bauteil K\_WTW4, das ebenfalls eine gedämmte Holzständerkonstruktion zeigt, erreicht mit 41 OI3<sub>KON</sub>-Punkten die höchste Bewertung der gezeigten konventionellen Systeme. Wenngleich sich dieser Aufbau nur durch den Einsatz von OSB-Platten von dem Bauteil K\_WTW3 unterscheidet, wird seine ökologische Leistung durch die schlechte Bewertung dieser Holzwerkstoffplatten deutlich negativ beeinflusst. Ähnlich wie im Vergleich der Bauteile L\_WTW1 und L\_WTW3 zeigen auch die beiden konventionellen Holzständerwände, dass bereits geringfügige Änderungen in den gewählten Materialien eine große Änderung in der ökologischen Bewertung der Bauteile herbeiführen können.

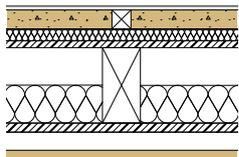
Insgesamt können die massiven Wohnungstrennwände K\_WTW1 und K\_WTW2 aus ökologischer Sicht als besonders ungünstig betrachtet werden. Leichtere Konstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen erzielen deutlich bessere

Ergebnisse. Ein Einsatz von Lehmputzen und Leichtlehmstoffen kann diese Leichtbauwände zusätzlich positiv beeinflussen. Des Weiteren wird deutlich, dass im Bereich der Wohnungstrennwände aus ökologischen Gründen dennoch nicht auf die Ausführung massiver Bauteile verzichtet werden muss, wenn diese beispielsweise aus Lehmsteinen hergestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Lehmbaumstoffe einen gleichermaßen geringen ökologischen Fußabdruck aufweisen. Wie der Vergleich der Bauteile L\_WTW1 und L\_WTW3 zeigt, sind auch im Bereich des Lehmbaus ökologisch günstigere und weniger geeignete Produkte vorzufinden. Es empfiehlt sich daher, im Zuge der Planung eine entsprechende Ökobilanzierung durchzuführen, um die am besten geeigneten Lehmbaumstoffe für die jeweilige Situation zu ermitteln.

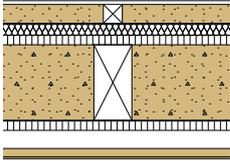
### Geschossdecken

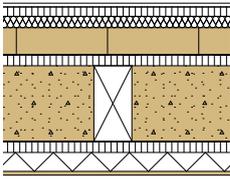
Im Wiener Wohnbau werden aktuell hauptsächlich Geschossdecken aus Stahlbeton realisiert, vereinzelt sind aber auch Ziegelhohlkörperdecken vorzufinden. Holzbalken- und Massivholzdecken wurden lange Zeit durch den Stahlbeton verdrängt, im Zuge des wachsenden ökologischen Bewusstseins können sie sich heute jedoch ebenfalls wieder einen steigenden Marktanteil sichern.

Im Lehmbau finden insbesondere Holzbalkendecken Anwendung, die mit Lehmbaumstoffen ausgefacht oder beschwert werden. Die in Kapitel 3 gezeigte Holz-Lehm-Decke L\_GD 6 wird an dieser Stelle nicht weiter analysiert, da sie wie die Wohnungstrennwand L\_WTW2 kein für den Wiener Wohnbau ausreichendes Schalldämmvermögen aufweist (vgl. 3.4.3 Geschossdecken).

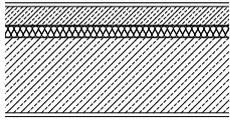
<i>L_GD1: Holzbalkendecke, Lehmestrich</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden	0,010	25	21,9	
	Polsterholz	0,050	60	0,1	
	Lehmestrich	0,050	100	2,2	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	TSD Holzfaserplatte	0,030	50	9,8	
	Vollschalung Fichte	0,018	60	0,5	
	Hanfdämmung	0,100	50	12,4	
	zwischen TW Fichtenholz	0,200	100	- 0,4	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Lattung Fichte	0,048	60	0,0	
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4	
	Lehmputz	0,005	100	0,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>			<b>52,1</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 15 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_GD2: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmsteinausfachung</i>				
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Parkettboden	0,010	25	21,9
	Polsterholz	0,050	60	0,1
	zwischen Lehmestrich	0,050	100	2,2
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2
	TSD Holzfaserplatte	0,030	50	9,8
	Vollschalung Fichte	0,018	60	0,5
	Lehmstein schwer	0,200	100	8,7
	zwischen TW Fichtenholz	0,200	100	- 0,4
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7
	Lattung Fichte	0,048	60	0,0
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
	Lehmputz	0,005	100	0,3
	<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>		
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 12 Pkt./m<sup>2</sup></b>
<i>L_GD3: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>				
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Parkettboden	0,010	25	21,9
	Polsterholz	0,050	60	0,1
	zwischen Lehmestrich	0,050	100	2,2
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2
	TSD Holzfaserplatte	0,030	50	9,8
	Lehmschüttung schwer	0,040	100	1,2
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2
	Vollschalung Fichte	0,018	60	0,5
	Hanfdämmung	0,100	50	12,4
	zwischen TW Fichtenholz	0,200	100	- 0,4
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7
	Lattung Fichte	0,048	60	0,0
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4
	Lehmputz	0,005	100	0,3
<b>Gesamt</b>	<b>0,441</b>			<b>53,5</b>
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 17 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_GD4: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden	0,010	25	21,9	
	Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050	60	0,1	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	TSD Holzfaserplatte	0,030	50	9,8	
	Spanplatte	0,025	60	1,3	
	Lehmschüttung schwer zwischen TW Fichtenholz	0,200	100	5,7	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Spanplatte	0,025	60	1,3	
	Lattung Fichte	0,048	60	0,0	
	Lehmplatte TP	0,016	50	4,4	
	Lehmputz	0,005	100	0,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,409</b>			<b>47,1</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 10 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_GD5: Holzbalkendecke, Leichtlehmschüttung, Lehmsteinauflage</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden	0,010	25	21,9	
	Spanplatte	0,025	60	1,3	
	TSD Holzfaserplatte	0,030	50	9,8	
	Lehmstein schwer	0,071	100	3,3	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Spanplatte	0,025	60	1,3	
	Leichtlehmschüttung zwischen TW Fichtenholz	0,200	100	1,4	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Spanplatte	0,025	60	1,3	
	Schilfdämmplatte	0,050	50	- 0,7	
	Lehmputz	0,010	100	0,6	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>			<b>40,2</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 3 Pkt./m<sup>2</sup></b>

*Bauteilliste 34: Geschossdecken aus Lehm*

<i>K_GD1: Stahlbetondecke</i>				
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
	Parkettboden	0,010	25	21,9
	Zementestrich	0,050	50	18,3
	Trennlage Kunststoff	0,0001	50	1,4
	Mineralwolle TSD	0,030	50	16,3
	Stahlbeton	0,200	100	60,5
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3
	<b>Gesamt</b>	<b>0,300</b>		
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 83 Pkt./m<sup>2</sup></b>

		<i>K_GD2: Ziegelhohlkörperdecke</i>				
		Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden		0,010	25	21,9	
	Zementestrich		0,050	50	18,3	
	Trennlage Kunststoff		0,0001	50	1,4	
	Mineralwolle TSD		0,030	50	16,3	
	Splittschüttung l.z.g.		0,040	50	2,2	
	Ziegelhohlkörper		0,200	100	42,4	
	Kalk-Gips-Putz		0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,340</b>			<b>103,8</b>
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 67 Pkt./m<sup>2</sup></b>
		<i>K_GD3: Holzbalkendecke</i>				
		Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden		0,010	25	21,9	
	Zementestrich		0,050	50	18,3	
	Trennlage Kunststoff		0,0001	50	1,4	
	Mineralwolle TSD		0,030	50	16,3	
	Schüttung lose		0,040	100	1,1	
	Rieselschutzpapier		0,0001	50	0,2	
	OSB-Platte		0,018	60	10,9	
	Mineralwolle zwischen TW Fichtenholz		0,100	50	12,1	
			0,200	100	- 0,4	
	Vollschalung Fichte		0,024	60	0,7	
	Gipskartonplatte		0,0125	60	6	
	Kalk-Gips-Putz		0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,395</b>			<b>89,3</b>
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 52 Pkt./m<sup>2</sup></b>
		<i>K_GD4: Brettstapeldecke</i>				
		Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Parkettboden		0,010	25	21,9	
	Zementestrich		0,050	50	18,3	
	Trennlage Kunststoff		0,0001	50	1,4	
	Mineralwolle TSD		0,030	50	16,3	
	Schüttung lose		0,040	100	1,1	
	Rieselschutzpapier		0,0001	50	0,2	
	Brettstapelelement		0,200	100	- 9,3	
	Gipskartonplatte		0,0125	60	6	
	Kalk-Gips-Putz		0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,353</b>			<b>57,2</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 20 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

Bauteilliste 35: konventionelle Geschossdecken

In Bezug auf die in dieser Arbeit behandelten Geschossdecken zeigt sich eine große Schwankungsbreite in der ökologischen Bewertung der Bauteile. Während der ökologische Fußabdruck der Holzdecken vergleichsweise gering ausfällt, erreichen massive Stahlbeton- und Ziegeldecken sehr hohe Punktebewertungen.

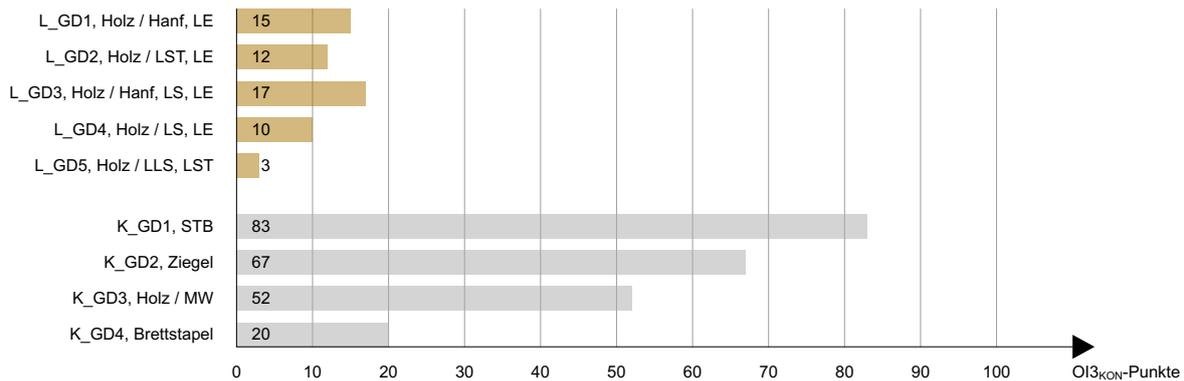


Abbildung 25: OI3<sub>KON</sub>-Bewertung der Geschossdecken

Wie die obenstehende Grafik veranschaulicht, erzielen die Holz-Lehm-Decken L\_GD1 bis L\_GD5 mit 3 bis 17 OI3<sub>KON</sub>-Punkten ein deutlich besseres Ergebnis als die konventionellen Stahlbeton- und Ziegeldecken, deren OI3<sub>KON</sub>-Bewertung bei 83 bzw. 67 OI3<sub>KON</sub>-Punkten liegt. Die Ursache für die hohe Punktezahl der beiden Massivdecken liegt in der schlechten  $\Delta$ OI3-Bewertung der Tragstruktur. Eine 20cm starke Stahlbetondecke wird dabei mit 60,5  $\Delta$ OI3-Punkten bewertet, das ebenso dicke Ziegelhohlkörperelement erhält 42,4  $\Delta$ OI3-Punkte. Im Gegensatz dazu liegt die Bewertung von Fichtenholzbalken mit einem Querschnitt von 10 mal 20cm bei -0,4  $\Delta$ OI3-Punkten.

Die konventionelle Holzbalkendecke K\_GD3 mit Mineralwolle-Gefachdämmung erreicht in diesem Vergleich eine OI3<sub>KON</sub>-Punktezahl von 52 und stellt somit aus ökologischer Perspektive bereits eine Verbesserung zu den zuvor beschriebenen Massivdecken dar. Die Brettstapeldecke K\_GD4 ist mit 20 OI3<sub>KON</sub>-Punkten die nachhaltigste dieser vier Deckenkonstruktion. Die niedrige Punkteanzahl wird hier vor allem durch das Brettstapelelement erzielt, das mit einem  $\Delta$ OI3-Wert von -9,3 Punkten beurteilt wird. Zusätzlich entfällt bei dieser Deckenvariante die im Bauteil K\_GD3 vorhandene Gefachdämmung, wodurch die ökologische Bilanz des Aufbaus ebenfalls verbessert wird.

Die Lehmdecken L\_GD1 bis L\_GD5 können den ohnehin guten Wert der Deckenkonstruktion K\_GD4 nochmals um einige Punkte unterschreiten, da hier anstelle eines konventionellen Zementestrichs eine Ausführung mit Lehmeestrich gewählt und so 16  $\Delta$ OI3-Punkte eingespart werden.

Die Schwankungsbreite in der Punktebewertung der Geschossdecken aus Holz und Lehm liegt bei 14 OI3<sub>KON</sub>-Punkten. Die höchsten Werte unter den Lehmdecken erzielen die Bauteile L\_GD1 und L\_GD3, da die Balkenzwischenräume bei diesen Bauteilen mit Wärmedämmstoffen verfüllt sind. Diese weisen im Vergleich zu Lehmschüttungen und Lehmsteinen eine etwas höhere  $\Delta$ OI3-Bewertung auf, wodurch die Gesamtbeurteilung dieser Bauteile im Vergleich zu den Decken L\_GD2 und L\_GD4 geringfügig schlechter ausfällt.

Der Vergleich der konventionellen Geschossdecken und jener aus Holz und Lehm verdeutlicht, wie groß der Einfluss gewisser Baustoffe auf die Nachhaltigkeit eines Bauteils ist. Holzdecken erzielen in dieser Gegenüberstellung wesentlich bessere Werte als massive Stahlbeton- und Ziegelhohlkörperdecken. Lehmstoffe bieten hier zusätzlich eine gute Möglichkeit, den Einsatz von Wärmedämmstoffen zu reduzieren und den ökologischen Fußabdruck der Konstruktion zusätzlich zu verbessern.

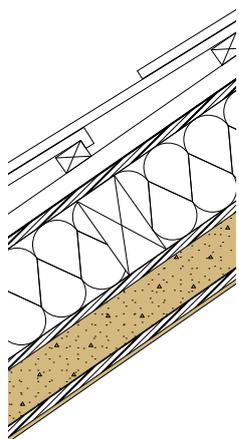
Wie die Analyse der bauphysikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Decken in [4.1 Ein bauphysikalischer Vergleich](#) bereits gezeigt hat, muss dabei zugunsten einer ökologischen Konstruktion keineswegs auf eine ausreichende Wärme- und Schalldämmung verzichtet werden. Durch einen einige Zentimeter dicken Lehmputz stellt zudem auch die Einhaltung brandschutztechnischer Vorschriften kein Problem dar, wenngleich auf diesem Gebiet aufgrund fehlender Deklarationen hinsichtlich des Brandschutzes von Lehmbauteilen wahrscheinlich im Falle einer Umsetzung entsprechende Nachweise zu erbringen sein werden.

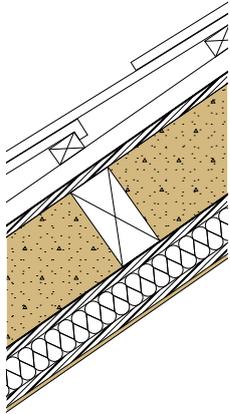
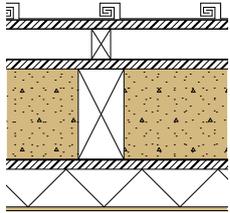
### Dachaufbauten

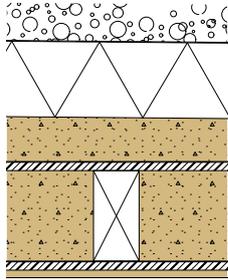
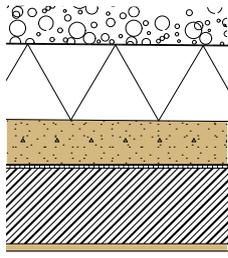
Im Bereich der Dachaufbauten muss zwischen Steil- und Flachdächern unterschieden werden. Während Steildächer insbesondere mit tragenden Holzsparren hergestellt werden, haben sich als Flachdächer vor allem Stahlbetonaufbauten etabliert.

Die in dieser Arbeit gezeigten Lehm-Flachdachaufbauten sind hingegen an die Geschosdecken angelehnt und bestehen hauptsächlich aus Holzbalkendecken, die mit Lehm verfüllt und entsprechend abgedichtet werden.

<i>L_SD1: Holzsparrendach, schwere Lehmschüttung</i>			
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Betondachstein	0,020	80	13,9
Lattung Fichte	0,050	60	0,1
Konterlattung Fichte	0,050	60	0,1
Unterdeckbahn	0,0001	50	0,4
Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7
Holzfaserdämmplatte zwischen Dachbalken Fichte	0,240	50	106,1
	0,240	100	- 0,6
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0001</i>	<i>50</i>	<i>0,6</i>
Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7
Lehmschüttung schwer zwischen Lattung	0,120	100	3,4
	0,120	60	0,2
Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2
Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7
Schilfrohwergewebe PT	0,003	100	- 0,1
Lehmputz	0,010	100	0,6
<b>Gesamt</b>	<b>0,565</b>		<b>127,0</b>
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 90 Pkt./m<sup>2</sup></b>



<i>L_SD2: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Betondachstein	0,020	80	13,9	
	Lattung Fichte	0,050	60	0,1	
	Konterlattung Fichte	0,050	60	0,1	
	Unterdeckbahn	0,0001	50	0,4	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Leichtlehmschüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240 0,240	100 100	10,8 - 0,6	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Holzfaserdämmplatte zwischen Lattung	0,080 0,080	50 60	37,6 0,1	
	<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0001</i>	<i>50</i>	<i>0,6</i>	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Schilfrohwergewebe PT	0,003	100	- 0,1	
	Lehmputz	0,010	100	0,6	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,525</b>		<b>65,8</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 29 Pkt./m<sup>2</sup></b>
<i>L_FD1: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Blecheindeckung</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Blecheindeckung	0,001	40	54,9	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Konterlattung Fichte	0,050	60	0,1	
	Unterdeckbahn	0,0001	50	0,4	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Leichtlehmschüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240 0,240	100 100	10,8 - 0,6	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Holzfaserdämmplatte hart	0,100	50	47	
	Schilfrohwergewebe PT	0,003	100	- 0,1	
	Lehmputz	0,010	100	0,6	
	<b>Gesamt</b>		<b>0,476</b>		<b>115,3</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 79 Pkt./m<sup>2</sup></b>

<i>L_FD2: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Kieseindeckung</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Kies	0,100	100	1,8	
	Vlies PP	0,0001	50	0,3	
	XPS-Dämmung	0,200	40	106,1	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	50	11,4	
	Lehmgefälle	0,120	100	3,6	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Leichtlehmschüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	100	10,8	
	Dachbalken Fichte	0,240	100	-0,6	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0001</i>	<i>50</i>	<i>0,6</i>	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Schilfrohwergewebe PT	0,003	100	-0,1	
	Lehmputz	0,010	100	0,6	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,723</b>			<b>136,1</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 99 Pkt./m<sup>2</sup></b>
<i>L_FD3: Massivholzdach</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Kies	0,100	100	1,8	
	Vlies PP	0,0001	50	0,3	
	XPS-Dämmung	0,200	40	106,1	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	50	11,4	
	Lehmgefälle	0,120	100	3,6	
	Rieselschutzpapier	0,0001	50	0,2	
	Funderplan Holzfaser	0,008	50	9,7	
	Brettstapelelement	0,200	100	-9,3	
	Schilfrohwergewebe PT	0,003	100	-0,1	
	Lehmputz	0,020	100	1,1	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,653</b>			<b>124,7</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 88 Pkt./m<sup>2</sup></b>

Bauteilliste 36: Dachaufbauten aus Lehm

<i>K_SD1: Holzsparrendach</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Betondachstein	0,020	80	13,9	
	Lattung Fichte	0,050	60	0,1	
	Konterlattung Fichte	0,050	60	0,1	
	Unterdeckbahn	0,0001	50	0,3	
	Holzfaserdämmplatte	0,020	50	9,4	
	Mineralwolle zwischen Dachbalken Fichte	0,240	100	- 0,6	
	Dampfbremse	0,0002	50	0,9	
	Vollschalung Fichte	0,024	60	0,7	
	Gipskartonplatte	0,0125	60	6,0	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,427</b>			<b>61,1</b>
					<b>OI3<sub>KON</sub> = 24 Pkt./m<sup>2</sup></b>
<i>K_FD1: Stahlbeton-Warmdach</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Kies	0,100	100	1,8	
	Vlies PP	0,0001	50	0,3	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	50	11,4	
	Trennlage PE	0,0001	50	1,5	
	EPS-Dämmplatte	0,250	50	50,9	
	Trennlage PE	0,0001	50	1,5	
	Gefällebeton	0,080	100	7,8	
	Stahlbeton	0,200	100	60,5	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>			<b>137,0</b>
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 100 Pkt./m<sup>2</sup></b>	
<i>K_FD2: Stahlbeton-Umkehrdach</i>					
	Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
	Kies	0,100	100	1,8	
	Vlies PP	0,0001	50	0,3	
	XPS-Dämmplatte	0,250	40	132,6	
	Trennlage PE	0,0001	50	1,5	
	Dachabdichtung Bit.	0,0002	50	11,4	
	Gefällebeton	0,080	100	7,8	
	Stahlbeton	0,200	100	60,5	
	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
	<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>			<b>217,1</b>
				<b>OI3<sub>KON</sub> = 180 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

Bauteilliste 37: konventionelle Dachaufbauten

Die gezeigten Steildachausführungen erreichen 24 bis 90 OI3<sub>KON</sub>-Punkte, während die Flachdächer mit 79 bis 180 OI3<sub>KON</sub>-Punkten deutlich höhere Werte erzielen.

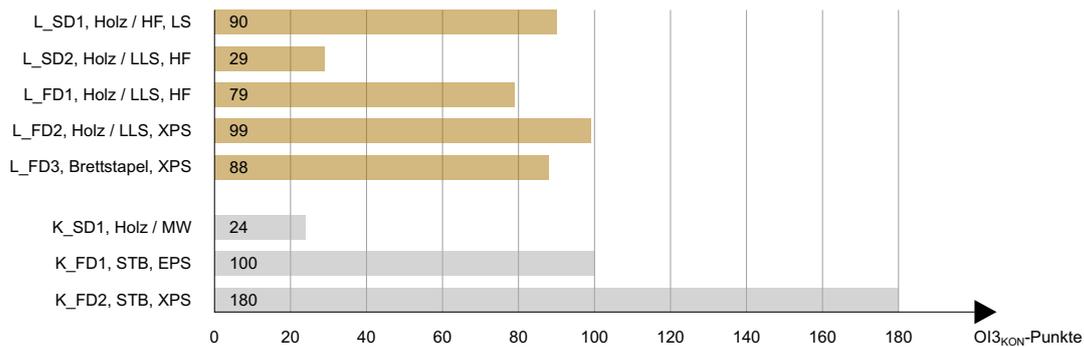


Abbildung 26: OI3<sub>KON</sub>-Bewertung der Dachaufbauten

Das mit Lehm verfüllte Steildach L\_SD2 sowie das konventionelle Holzsparren-Steildach K\_SD1 können bei einer OI3<sub>KON</sub>-Punktezahl von 29 bzw. 24 Punkten als ökologisch besonders günstig angesehen werden. Das Bauteil L\_SD1 erreicht hingegen 90 OI3<sub>KON</sub>-Punkte und liegt somit deutlich über den Werten der beiden anderen Steildächer. Sein Aufbau unterscheidet sich insbesondere durch die Position der Lehmschüttung und des Wärmedämmstoffs von der Ausführung des Bauteils L\_SD2. Während die Dachbalken im Bauteil L\_SD2 mit Leichtlehm verfüllt sind und zusätzlich an der Innenseite mit einer 8cm Holzfaserplatte gedämmt werden, ist das Bauteil L\_SD1 mit einer Holzfaser-Gefachdämmung ausgeführt. Eine schwere Lehmschüttung erhöht bei dieser Konstruktion zwar die Speichermasse, erfüllt jedoch keine wärmedämmende Funktion.

Wie bereits im ökologischen Vergleich der Außenwände angeführt, werden Holzfaserdämmplatten aufgrund ihres hohen energetischen Ressourcenverbrauchs in der Herstellung in der OI3-Bewertung deutlich schlechter beurteilt als ihr Ruf vermuten lässt. Durch die Ausführung einer 24cm starken Dämmschicht aus diesem Baustoff erhält der Steildachaufbau L\_SD1 daher eine wesentlich schlechtere ökologische Beurteilung als die beiden anderen gezeigten Steildächer.

<i>L_SD1 mit Holzfaserdämmung</i>			<i>L_SD1 mit Hanfdämmung</i>		
Material	d [m]	ΔOI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	Material	d [m]	ΔOI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]
Betondachstein	0,020	13,9	Betondachstein	0,020	13,9
Lattung Fichte	0,050	0,1	Lattung Fichte	0,050	0,1
Konterlattung Fichte	0,050	0,1	Konterlattung Fichte	0,050	0,1
Unterdeckbahn	0,0001	0,4	Unterdeckbahn	0,0001	0,4
Vollschalung Fichte	0,024	0,7	Vollschalung Fichte	0,024	0,7
<b>Holzfaserdämmung</b>	<b>0,240</b>	<b>106,1</b>	<b>Hanfdämmung</b>	<b>0,240</b>	<b>31,3</b>
zwischen Dachbalken Fichte	0,240	- 0,6	zwischen Dachbalken Fichte	0,240	- 0,6
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0001</i>	<i>0,6</i>	<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0001</i>	<i>0,6</i>
Vollschalung Fichte	0,024	0,7	Vollschalung Fichte	0,024	0,7
Lehmschüttung schwer	0,120	3,4	Lehmschüttung schwer	0,120	3,4
zwischen Lattung	0,120	0,2	zwischen Lattung	0,120	0,2
Rieselschutzpapier	0,0001	0,2	Rieselschutzpapier	0,0001	0,2
Vollschalung Fichte	0,024	0,7	Vollschalung Fichte	0,024	0,7
Schilfrohwergewebe PT	0,003	- 0,1	Schilfrohwergewebe PT	0,003	- 0,1
Lehmputz	0,010	0,6	Lehmputz	0,010	0,6
Gesamt	0,565	127,0	Gesamt	0,565	52,2
<b>OI3<sub>KON</sub> = 90 Pkt./m<sup>2</sup></b>			<b>OI3<sub>KON</sub> = 15 Pkt./m<sup>2</sup></b>		

Tabelle 72: ΔOI3-Bewertung des Steildachs L\_SD1 bei unterschiedlichem Dämmstoff

Eine zweite Bewertung dieses Aufbaus mit einer Hanf- anstelle einer Holzfaserdämmung zeigt eine deutliche Verbesserung der Ökobilanz dieses Bauteils. Mit 31  $\Delta\text{OI3}$ -Punkten erzielt der Hanfdämmstoff eine Reduktion der  $\Delta\text{OI3}$ -Punkte der Wärmedämmung um 75 Punkte im Vergleich zur Holzfaserdämmung. Insgesamt kann die  $\text{OI3}_{\text{KON}}$ -Bewertung von 90 auf 15 Punkte verbessert werden. In dieser Ausführung erzielt das Bauteil L\_SD1 sogar eine günstigere ökologische Bewertung als die Bauteile L\_SD2 und K\_SD1.

Die vorgestellten Flachdachaufbauten weisen im Vergleich zu den gezeigten Steildächern wesentlich höhere  $\text{OI3}_{\text{KON}}$ -Bewertungen auf. Dies liegt einerseits an den hier häufig eingesetzten XPS- und EPS-Dämmstoffen, andererseits auch an der tragenden Stahlbetondecke, die ebenfalls einen hohen  $\Delta\text{OI3}$ -Wert aufweist.

Im Bereich der Lehm-Flachdächer wird das beste Ergebnis von der Ausführungsvariante L\_FD1 erzielt. Diese verfügt zwar über eine Blecheindeckung, deren  $\Delta\text{OI3}$ -Bewertung sehr hoch ist, kann jedoch aufgrund dieses Dachabschlusses ohne zusätzliche Bitumen-Dachabdichtung ausgeführt werden. Zusätzlich zeigt der Aufbau L\_FD1 als einziges Flachdach eine Ausführung ohne Polystyrol-Dämmstoff. Als Wärmedämmung wird in diesem Bauteil eine innenseitig angebrachte Holzfaserdämmplatte eingesetzt, deren  $\Delta\text{OI3}$ -Punktwertung zwar - wie bereits mehrfach angeführt - ebenfalls sehr hoch ist, allerdings immer noch deutlich unterhalb jener von XPS- und EPS-Platten liegt. Aufgrund der für Dachaufbauten dünnen Schichtstärke des Dämmstoffs kann die negative Auswirkung dieser Bauteilschicht auf die Gesamtperformance zudem geringgehalten werden. Diese Verringerung der Dämmstärke wird durch die Verfüllung der Balkenzwischenräume mit einer Leichtlehmschüttung möglich, deren Wärmedämmvermögen nur wenig schlechter ist als jenes traditioneller Wärmedämmstoffe.

Die Bauteile L\_FD2 und L\_FD3 sind anders als L\_FD1 als Umkehrdächer konzipiert, die Wärmedämmung liegt hier also außerhalb der wassersperrenden Bitumenbahn. Aus diesem Grund müssen für diese Dachaufbauten entsprechend feuchteresistente Dämmstoffe eingesetzt werden. Als solche eignen sich insbesondere XPS-Dämmplatten sowie Schaumglas, die aber aus ökologischer Sicht als problematisch anzusehen sind.

Bei einer Schichtstärke der Wärmedämmung von 20cm und einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 40 Jahren erreichen XPS-Platten 106,1  $\Delta\text{OI3}$ -Punkte und erzielen somit die mit Abstand höchste Punktebewertung aller Schichten in diesen Bauteilen. Wenngleich der übrige Aufbau mit Ausnahme der wassersperrenden Abdichtungen aus sehr nachhaltigen Materialien besteht, kann der negative Einfluss dieses Dämmstoffs nicht ausgeglichen werden.

Auch das konventionelle Flachdach K\_FD2 ist als Umkehrdach konzipiert und wird mit XPS-Dämmplatten ausgeführt. Mit 180  $\text{OI3}_{\text{KON}}$ -Punkten erreicht dieser Aufbau von allen gezeigten Flachdachaufbauten die schlechteste Bewertung, da hier zusätzlich zu dem ökologisch bedenklichen Dämmstoff eine Stahlbetondecke als tragendes Element eingesetzt wird. Mit 60,5 bzw. 132,6  $\Delta\text{OI3}$ -Punkten stellen diese beiden Schichten die ökologischen Schwergewichte der Konstruktion dar.

Das Bauteil K\_FD1 liegt aufgrund einer EPS- anstelle der XPS-Dämmung mit 100  $\text{OI3}_{\text{KON}}$ -Punkten zwar deutlich unterhalb der Punktebewertung des Aufbaus K\_FD2, kann jedoch ebenfalls nicht als nachhaltig angesehen werden.

Insgesamt ermöglichen die gezeigten Holz-Lehm-Flachdächer eine deutliche

ökologische Verbesserung zu den konventionellen Stahlbetondächern. Insbesondere der Aufbau L\_FD1 erzielt ein gutes Ergebnis, wenngleich dieses unter Einsatz eines anderen Dämmstoffes wie Hanf oder Schilf voraussichtlich nochmals verbessert werden kann.

Der Vergleich der verschiedenen Dachaufbauten verdeutlicht zudem nochmals, wie hoch der Einfluss des Wärmedämmstoffes auf die ökologische Gesamtpformance des Bauteils ist. Obwohl die Ökobilanz von Stahlbeton nicht vernachlässigt werden darf, zeigen sich dennoch vor allem wärmedämmende Materialien oft als besonders umweltschädlich.

### Erdberührte Bauteile: Kelleraußenwände

Kellerwände werden in Wien aktuell vor allem in Stahlbeton, teilweise auch in Ziegelbauweise ausgeführt, als Wärmedämmung werden insbesondere XPS-Perimeterdämmplatten eingesetzt.

Die Umsetzung von Lehmteilen im Bereich des Kellers ist derzeit kaum üblich. Wie bereits mehrfach erwähnt, verliert Lehm bei Kontakt mit direktem Wasser an Festigkeit, eine Beschichtung des Lehms mit wassersperrenden Schichten steht aber im Widerspruch zur Diffusionsoffenheit dieses Materials. Dennoch werden an dieser Stelle zwei mögliche Umsetzungen von Kelleraußenwänden aus Stampflehm gezeigt, die an ein realisiertes Beispiel angelehnt sind (vgl. 3.4.5 Erdberührte Bauteile).

<i>L_KAW1: Stampflehmwand</i>				
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta\text{OI3}$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Kies	0,100	100	3,7	
Filtervlies PP	0,0001	50	0,3	
Schaumglas	0,100	50	77,1	
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	11,4	
Stampflehm	1,000	100	62,6	
<b>Gesamt</b>	<b>1,100</b>		<b>155,0</b>	
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 118 Pkt./m<sup>2</sup></b>	
<i>L_KAW2: Stampflehmwand</i>				
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta\text{OI3}$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Kies	0,100	100	3,7	
Filtervlies PP	0,0001	50	0,3	
XPS-Dämmplatte	0,100	40	53,0	
Lehmschlämme	0,001			
Stampflehm	1,000	100	62,6	
<b>Gesamt</b>	<b>1,100</b>		<b>119,6</b>	
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 83 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

Bauteilliste 38: Kelleraußenwände aus Lehm

<i>K_KAW1: Stahlbetonwand</i>				
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Filtervlies PP	0,0001	50	0,3	
bit. Drain. EPS	0,080	40	18,5	
XPS-Dämmplatte	0,250	40	132,6	
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	1,4	
Stahlbeton	0,300	100	90,7	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	1,3	
<b>Gesamt</b>	<b>0,640</b>		<b>244,8</b>	
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 208 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>K_KAW2: Ziegelmauerwerk</i>				
Material	d [m]	Nutzungsdauer [a]	$\Delta OI3$ [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Filtervlies PP	0,0001	50	0,3	
bit. Drainageplatte EPS	0,080	40	18,5	
XPS-Dämmplatte	0,250	40	132,6	
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	1,4	
Vollziegel	0,300	100	49,2	
Zement-Putz	0,020	100	5,7	
<b>Gesamt</b>	<b>0,650</b>		<b>207,6</b>	
			<b>OI3<sub>KON</sub> = 171 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

Bauteilliste 39: konventionelle Kelleraußenwände

Ein Vergleich der Kelleraußenwände verdeutlicht, dass diese Bauteile mitunter die höchsten Umweltauswirkungen aller Gebäudeteile verursachen.

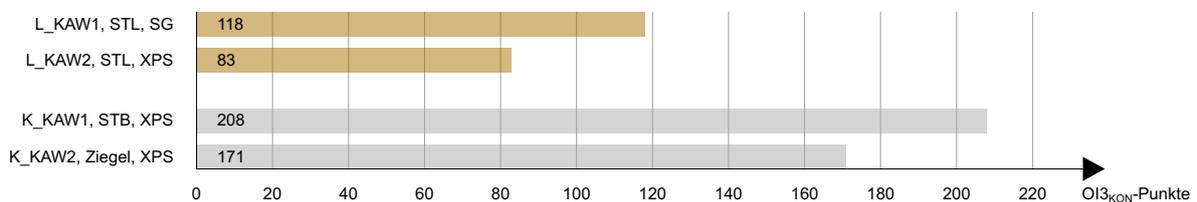


Abbildung 27: OI3<sub>KON</sub>-Bewertung der Kelleraußenwände

Insbesondere die konventionellen Aufbauten K\_KAW1 und K\_KAW2 nehmen mit 208 bzw. 171 OI3<sub>KON</sub>-Punkten besonders hohen Einfluss auf die ökologische Bewertung von Gebäuden.

Mit 83 bzw. 118 OI3<sub>KON</sub>-Punkten erlauben die beiden Lehm-Kellerwände L\_KAW1 und L\_KAW2 eine deutliche Reduktion in dieser Punktwertung. Obgleich auch diese Bauteile aufgrund fehlender Alternativen mit einer Perimeterdämmung aus Schaumglas bzw. XPS-Platten ausgeführt werden müssen, kann durch den Einsatz einer tragenden Stampflehmkonstruktion ein hohes Maß an energetischen Ressourcen im Vergleich zu Stahlbeton eingespart werden. Obwohl die Lehm-Kellerwände mit einer 1m dicken Stampflehmenschicht ausgeführt werden, liegt ihre  $\Delta OI3$ -Bewertung 28,1 Punkte unter jener der 30cm starken Stahlbetonwand.

Auch die dünnere Ausführung der Wärmedämmschicht erzielt zudem eine Verringerung der  $\Delta OI3$ -Punkte der XPS-Platte um ca. 80 Punkte.

Abschließend kann anhand des zuvor geführten Vergleichs der OI3<sub>KON</sub>-Punktwertung der Bauteile gezeigt werden, dass Lehmbaustoffe im Sektor Nachhaltigkeit einen großen Beitrag leisten können, den schädigenden Einfluss von Bauprodukten auf

die Umwelt zu reduzieren. Dies gilt insbesondere für nicht tragende Bauteilschichten sowie der Möglichkeit, den Masseanteil von Wärmedämmstoffen in einer Konstruktion zu reduzieren.

Die Analyse der Bauteile mithilfe des OI3-Bewertungsmodells verdeutlicht zudem, dass auch Baustoffe, die allgemein als nachhaltig angesehen werden, mitunter eine sehr schlechte ökologische Performance erzielen können. Für die Planung von Gebäuden bedeutet dies, dass eine ökologische Bewertung des Objekts bereits früh in den Planungsprozess integriert werden muss, um auf derartige Erkenntnisse reagieren zu können und ökologisch besonders ungünstige Baustoffe zu reduzieren oder durch andere Produkte zu ersetzen.

#### 4.2.4 Über das Schließen des Stoffkreislaufes - Abfallmassen im Bauwesen

Der Stoffkreislauf beschreibt den gesamten Lebenszyklus eines Stoffes von dessen Rohstofferkundung über seine Aufbereitung und Nutzung bis hin zur Entsorgung oder Wiederverwertung. Neben allen Prozessen, die auf den Stoff wirken, werden dabei auch Transportwege in Bezug auf die entstehenden Stoff- und Energieströme berücksichtigt.<sup>173</sup>



Abbildung 28: Stoffkreislauf des Baustoffes Lehm<sup>174</sup>

Im Sinne eines nachhaltigen Bauens ist es erstrebenswert, diesen Stoffkreislauf möglichst zu schließen. Um dies zu ermöglichen, müssen die verwendeten Bauprodukte zu einem großen Teil wiederverwendbar sein, um die Menge an anfallendem Abfall bei einem Gebäudeabbruch gering zu halten. Zusätzlich sollte auch im Zuge der Produktion eines Bauprodukts darauf geachtet werden, die entstehenden Abfallmassen zu reduzieren.

173 vgl. SCHROEDER 2010, S.20

174 vgl. SCHROEDER 2010/2019, S.27

Das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz<sup>175</sup> unterscheidet hinsichtlich der Verarbeitung von Abfällen zwischen deren thermischer und stofflicher Verwertung sowie deren Ablagerung.

Den ökologisch günstigsten Fall stellt in diesem Zusammenhang die stoffliche Verwertung (Recycling) eines Produkts dar, bei der Abfälle oder aus ihnen gewonnene Stoffe unmittelbar anstelle von Rohstoffen oder aus Primärrohstoffen erzeugten Produkten verwendet werden.<sup>176</sup> Für diese Rückführung in den Stoffkreislauf gilt im Bereich von Abbruchmassen als Voraussetzung, dass der Baustoff nicht nur in seine ursprünglichen Bestandteile zerlegt, sondern auch von anderen Materialschichten getrennt werden kann.

Ist eine Rückführung in den Stoffkreislauf nicht möglich, kann eine thermische Verwertung erfolgen, bei der ein (Bau-)Stoff durch Verbrennung in Energie umgewandelt wird. Dies setzt voraus, dass die hierzu bestimmten Produkte sich für eine solche Umwandlung eignen, eine stoffliche Verwertung nicht zweckmäßig ist und beim Verbrennungsvorgang keine gefährlichen Abfälle entstehen.

Den ökologisch ungünstigsten Fall der Abfallbeseitigung stellt die Endlagerung von Stoffen dar, die keiner stofflichen oder thermischen Verwertung zugeführt werden können.

Das Problem anfallender Bauschuttmassen ist durch die steigende Tätigkeit im Bauwesen und den wachsenden Bedarf an Wohnraum in den letzten Jahrzehnten stetig gewachsen. Moderne Gebäude stellen dabei immer mehr ein Zwischenlager für Baustoffe dar, die in der Zukunft zu Abfall werden. Dies ist besonders auf Veränderungen im Bauwesen zurückzuführen, wo neue – oft auch erdölbasierte – Baustoffe eingesetzt werden, deren Entsorgung im Planungsprozess kaum mitgedacht wird. Das wohl bekannteste Beispiel auf diesem Gebiet stellen Wärmedämmverbundsysteme aus Polystyrolämmstoffen und Putzsystemen dar, bei denen Tragstruktur, Wärmedämmung und Außenputz miteinander verklebt werden. Eine Trennung dieser Schichten im Falle eines Gebäudeabbruchs ist kaum möglich bzw. mit hohem Aufwand verbunden. Ohne diese Baustoffe voneinander zu lösen ist jedoch weder eine stoffliche noch eine thermische Verwertung möglich, die Bauprodukte müssen deponiert werden.

Auch der in Gebäuden sehr häufig eingesetzte Stahlbeton bedarf bei einer geplanten Wiederverwendung eines vergleichsweise hohen Arbeitsaufwandes. Die Betonbestandteile müssen zerkleinert und der Bewehrungsstahl entfernt werden. Eine direkte Weiternutzung von Festbeton in neuen Bauteilen ist in der Regel nicht möglich.

Der Abfallbeseitigung im Bauwesen fällt heute somit eine wichtige Bedeutung zu und muss zukünftig bereits im Planungsprozess berücksichtigt werden – nicht zuletzt auch deshalb, weil die Kosten der Entsorgung von Abbruchmassen in den letzten 50 Jahren stetig zugenommen haben.

Insbesondere hinsichtlich der Entstehung von Abfallprodukten im Bausektor können Lehmbaustoffe einen Beitrag leisten, die Menge an Bauschuttmassen zu reduzieren. Bei der Produktion von Lehmbaustoffen entstehen kaum schädliche Nebenprodukte, Wasser und Boden werden im Wesentlichen nicht belastet. Lehmbaustoffe ohne Zuschlags- und Zusatzstoffe können zudem ohne energieintensive Aufbereitung wiederverwendet oder im Gelände deponiert werden. Dies gilt aber nur so lange, bis sie mit anderen Stoffen vermischt werden, die gesondert zu entsorgen sind oder wenn die Lehmbaustoffe in einer Art im Gebäude verbaut sind, die eine Trennung von

175 AWG 2002 BGBl 102/2002 idF BGBl 104/2019

176 vgl. §2 Abs 5 Z 2 AWG 2002 BGBl 102/2002 idF BGBl 104/2019

anderen Schichten nicht mehr erlaubt. Lehmbauplatten können anders als die meisten Bauprodukte aus Lehm nicht direkt weiterverwendet werden. Als Abfallprodukt sind sie immerhin frei von Schadstoffen.<sup>177</sup>

#### 4.2.5 Recyclingpotential und Entsorgungseinstufung der Bauteile

Das Bauwesen zählt zu den größten Verbrauchern von energetischen und stofflichen Ressourcen und gewinnt daher auch im Bereich der Abfallwirtschaft immer mehr an Bedeutung. Eine Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft verzeichnete beispielsweise für das Jahr 2017 eine Menge von Bau- und Abbruchmassen von ca. 10 Mio. Tonnen. 640.000 Tonnen konnten dabei aufgrund der Inhomogenität der Abfallströme nicht stofflich verwertet werden, sondern mussten zur Endlagerung deponiert werden.<sup>178</sup> Die Menge von Abfall, die auf Deponien gelagert wird, steigt stetig an, weshalb es dringend notwendig ist, Bauteile und Baustoffe vermehrt zu recyceln, um einerseits einer Ressourcenknappheit entgegenzuwirken und andererseits den Flächenverbrauch von Endlagerstätten zu reduzieren.

Die Beschäftigung mit der Frage nach einer späteren Entsorgung von Baustoffen und Bauteilen muss bereits in der Planungsphase eines Gebäudes beginnen, da hier am einfachsten und effektivsten den in Zukunft entstehenden Abfallmassen entgegengewirkt werden kann.

Um Planern ein Instrument zur Verfügung zu stellen, mit dem bereits durch geringen Arbeitsaufwand ersichtlich wird, wie problematisch die Entsorgung eines Baustoffes und wie hoch sein Recyclingpotential sind, wurde vom Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie der Entsorgungsindikator EI entwickelt und in das in [4.2.3 Ökologische Bauteilbewertung – OI3 Index](#) beschriebene Bewertungsmodell OI3 Index integriert.

#### Entsorgungsindikator EI

Die Entsorgungsindikatoren  $EI_{KON}$  für Bauteile und  $EI_{10}$  für Gebäude stellen eine semiquantitative Bewertungsmethode für Baustoffe, Konstruktionen und Bauwerke dar, die eine standardisierte Beurteilung des Entsorgungsprozesses der einzelnen Stoffe ermöglicht. Dabei wird einerseits der derzeit vorherrschende Entsorgungsweg einer Bauteilkomponente berücksichtigt, andererseits das Verwertungspotential angegeben, das unter Verbesserung der aktuellen Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt des Abbruchs erreichbar wäre.<sup>179</sup> Das Verwertungspotential gibt also an, wieviel der aus heutiger Sicht entstehenden Abfallmenge zum Zeitpunkt der tatsächlichen Entsorgung eingespart werden kann.<sup>180</sup>

Die Bewertung von Baustoffen hinsichtlich ihrer Entsorgung erfolgt dabei anhand einer Notenskala, wobei die Note 1 das beste, die Note 5 das schlechteste Ergebnis darstellt. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Bewertungskriterien des Entsorgungsindikators.

177 vgl. HUBER / KLEESPIES / SCHMIDT 1997, S.30f

178 vgl. o.A. *Wie die EU vom österreichischen Entsorgungsindikator profitieren kann*

179 vgl. o.A. *EI Entsorgungsindikator*

180 vgl. o.A. *Wie die EU vom österreichischen Entsorgungsindikator profitieren kann*

	1	2	3	4	5
<b>Recycling</b>	Wiederverwendung oder Wiederverwertung zu einem technisch gleichwertigen Sekundärprodukt / -rohstoff	Recyclingmaterial, das mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen / hochwertig verwertet werden kann	verunreinigtes Recyclingmaterial, das mit hohem Aufwand rückgebaut und verwertet werden kann	Downcycling	kein Recycling möglich
<b>Verbrennung</b>	Heizwert über 2000MJ/m <sup>3</sup> ; natürliche Metall-, Halogengehalte im ppm-Bereich; sortenreines Material	wie 1, aber nicht sortenrein	wie 1 und 2, aber Heizwert 500 - 2000 MJ/m <sup>3</sup> ; geringe Metall-, Halogengehalte	hoher Stickstoffgehalt; hoher Anteil mineralischer Bestandteile; erhöhte Metall-, Halogengehalte	hoher Metall-, Halogengehalt
<b>Deponierung</b>	zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie; geeignete Abfälle	zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigung	Material mit geringem Anteil nicht mineralischer Bestandteile	gipshaltige, faserförmige, mineralisierte organische Materialien mit erhöhtem Anteil nicht mineralischer Verunreinigung	organisch-mineralischer Verbund; Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

Tabelle 73: Überblick über einige Kriterien zur Entsorgungseinstufung<sup>181</sup>

Der Entsorgungsindikator ermöglicht eine Beurteilung von Baustoffschichten, Konstruktionen und ganzen Gebäuden. Für die Berechnung der Entsorgungseigenschaften werden dabei das Volumen jedes Baustoffes in einer Konstruktion, die durchschnittliche Nutzungsdauer der Bauteilschicht, die Entsorgungseinstufung des Baustoffes selbst sowie sein Verwertungspotential berücksichtigt. Zusätzlich wird den Baustoffen ein primärer Verwertungsweg wie Recycling, Energiegewinnung oder Deponierung zugeordnet.<sup>182</sup>

Der Entsorgungsindikator  $EI_{KON}$  pro m<sup>2</sup> Konstruktion wird anschließend aus den bewerteten Volumina, die am Ende des Gesamtlebenszyklus des Gebäudes zur Entsorgung anfallen und jenen aus den Austausch- und Sanierungszyklen gebildet.<sup>183</sup> Anders als für die OI3-Punktebewertung wird für die EI-Bewertung dabei anstelle der Masse das Volumen herangezogen, was auf der Hypothese basiert, dass der Entsorgungsaufwand mit steigendem Volumen zunimmt.<sup>184</sup>

Für die Ermittlung des Entsorgungsindikators muss dabei stets auch die Nutzungsdauer der unterschiedlichen Baustoffschichten berücksichtigt werden. Diese wird wie bereits erwähnt von der IBO in einem Nutzungsdauerkatalog für Bauteilschichten bzw. für Baustoffe festgelegt.

Die Nutzungsdauer einer Bauteilschicht wird dabei auch von darüberliegenden Materialien beeinflusst. Muss ein bestimmter Teil einer Konstruktion ausgetauscht werden und ist dies ohne Zerstörung davorliegender Baustoffe nicht möglich, verringert sich die Nutzungsdauer dieser Produkte auf den Wert der kurzlebigsten Materiallage.<sup>185</sup>

Der Entsorgungsindikator berücksichtigt außerdem, ob zwei aneinanderliegende Baustoffe zerstörungsfrei getrennt werden können. Für vollflächig verklebte Materialien wird die Einstufung für Entsorgung und Verwertung entsprechend erhöht, lose verbundene Schichten beeinflussen sich hingegen nicht.<sup>186</sup>

181 vgl. IBO 2018b, S.5

182 vgl. ebenda, S.6f.

183 vgl. ebenda, S.7

184 vgl. ebenda, S.8

185 vgl. ebenda, S.6

186 vgl. o.A. *Wie die EU vom österreichischen Entsorgungsindikator profitieren kann*

Im Folgenden werden die mithilfe der Software *Archiphysik* ermittelten  $E_{KON}$ -Bewertungen der in dieser Arbeit gezeigten Bauteilaufbauten analysiert. Eine vollständige Liste sämtlicher Punktebewertungen der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotentials kann in den im Anhang befindlichen Bauteillisten nachgelesen werden.

Die nachstehende Tabelle gibt zudem einen Überblick über die Einstufung einiger in dieser Arbeit häufig vorkommender Baustoffe.

<i>tragende und massive Baustoffe</i>		
Baustoff	Entsorgungseinstufung	Verwertungspotential
Lehm	2	1
Stahlbeton	2	2
Ziegel	2	2
Holz (Fichte)	1	1
<i>Wärmedämmstoffe</i>		
Baustoff	Entsorgungseinstufung	Verwertungspotential
Schilf	3	2
Holzfaser	4	3
Hanf	3	3
Zellulose	3	3
EPS	5	4
XPS	4	4
Schaumglas	3	3

Tabelle 74: Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential einiger Baustoffe<sup>187</sup>

### Außenwandsysteme

Die in dieser Arbeit gezeigten Lehm-Außenwände werden mit den Noten 0,6 bis 1,7 bewertet, während die konventionellen Außenwandsysteme Noten von 1,7 bis 2,4 erzielen.

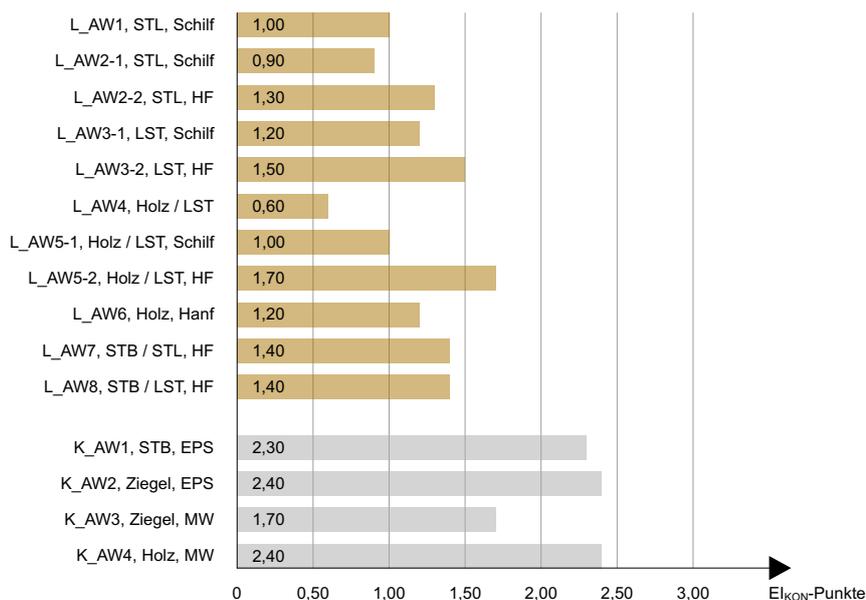


Abbildung 29:  $E_{KON}$ -Bewertung der Außenwandsysteme

Die obenstehende Grafik zeigt, dass Lehmbauteile hinsichtlich ihrer Entsorgung als deutlich ungefährlicher einzustufen sind als Bauteile aus Stahlbeton und Ziegel. Dies liegt insbesondere an den aktuell im Wohnbau beliebten Wärmedämmverbundsystemen mit Polystyrol-Dämmstoffen. Aufgrund fehlender Möglichkeiten zur Wiederverwendung bzw. Rückführung in den Stoffkreislauf werden EPS-Dämmplatten derzeit mit der Note 5 bewertet, auch das Verwertungspotential zeigt hier kaum Möglichkeiten, den Entsorgungsvorgang dieses Dämmstoffs zu verbessern.

Zusätzlich werden Stahlbeton und Ziegel ebenfalls etwas schlechter bewertet als Lehmbaustoffe, da das Recycling dieser Stoffe mit höherem Aufwand verbunden ist. Während die meisten Produkte aus Lehm rein durch die Zugabe von Wasser replastifizierbar werden und somit ohne Energiezufuhr erneut eingesetzt werden können, müssen Bauteile aus Stahlbeton oder Ziegel zunächst zerkleinert und von Armierungsstahl bzw. Mauermörtel getrennt werden. Erst dann können die Baustoffe weiterverarbeitet und als Recyclingmaterial weitergenutzt werden. Dieser Vorgang ist jedoch deutlich aufwändiger als die Umwandlung von Lehmbauteilen in Recyclinglehm.

Ein Vergleich der Lehmbauteile untereinander zeigt, dass auch im Bereich nachhaltiger Architektur noch viel Spielraum gegeben ist. Während die Außenwand L\_AW4 eine  $EI_{\text{KON}}$ -Bewertung von 0,6Pkt./m<sup>2</sup> erhält, steigt diese für das Bauteil L\_AW5-2 auf 1,7Pkt./m<sup>2</sup>. Beide Bauteile zeigen einen ähnlichen Aufbau einer Holzständerwand, die mit Lehmsteinen kombiniert wird. Die Außenwand L\_AW4 weist dabei allerdings eine wesentlich dünnere Wärmedämmschicht auf, die durch die Ausfachung der Holzständerkonstruktion mit Leichtlehmsteinen möglich wird. Das geringere Volumen der Wärmedämmung einerseits und die bessere Bewertung der Hanfdämmung im Vergleich zur Holzfaserdämmung andererseits sind an dieser Stelle ausschlaggebend für die Differenz in der Punktebewertung der beiden Außenwandsysteme.

Insgesamt verdeutlicht eine Betrachtung der Entsorgungsindikatoren der hier gezeigten Außenwandsysteme, dass eine ökologische Optimierung der Bauteile nicht nur die direkten Umweltwirkungen positiv beeinflusst, sondern auch zukünftig anfallende Abfallmassen reduziert. So kann beispielsweise bereits durch die Ausfachung von Stahlbetonskeletten mit Lehmbaustoffen und einen Verzicht auf EPS-Dämmplatten die  $EI_{\text{KON}}$ -Bewertung im Stahlbetonbau deutlich verbessert werden. Während die klassische massive Stahlbetonwand hier mit 2,3Pkt./m<sup>2</sup> beurteilt wird, erzielen die Stahlbeton-Lehm-Hybride L\_AW7 und L\_AW8 mit 1,4Pkt./m<sup>2</sup> ein deutlich besseres Ergebnis.

### *Innenwandsysteme: Scheidewände*

Im Bereich der Scheidewände werden von allen Bauteilen sehr geringe Entsorgungsindikatoren erzielt. Diese liegen für Lehmbauteile im Bereich von 0,1 bis 0,5Pkt./m<sup>2</sup>, während die konventionellen Systeme mit 0,2 bis 0,7Pkt./m<sup>2</sup> bewertet werden.

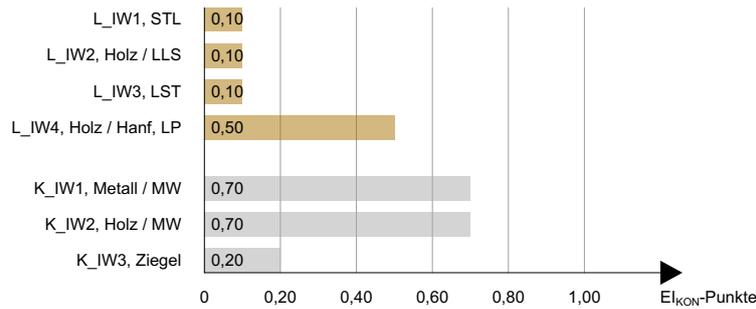


Abbildung 30:  $EI_{KON}$ -Bewertung der Scheidewände

Für Scheidewände zeigt sich, dass sich die  $EI_{KON}$ -Bewertung der Bauteile mit zunehmendem Anteil an Wärmedämmstoffen verschlechtert, da diese eine ungünstigere Entsorgungseinstufung aufweisen.

Die Lehmwände L\_IW1 bis L\_IW3 erreichen mit 0,1Pkt./m<sup>2</sup> die günstigste Bewertung. Ihnen ist gemein, dass sie nahezu vollständig aus Lehmbaustoffen bestehen, deren Entsorgung allgemein als unproblematisch gilt. Zudem stellt sich die Trennung der Bauteilschichten bei diesen Aufbauten als besonders einfach dar, da Lehm keinen chemischen Erhärtungsprozess durchläuft und sich so weniger dauerhaft mit anderen Baustoffen verbindet.

### Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände

Die Wohnungstrennwände erzielen etwas höhere  $EI_{KON}$ -Bewertungen als Scheidewände. Lehmteile erreichen hier 0,4 bis 1,1Pkt./m<sup>2</sup>, konventionelle Wohnungstrennwände liegen im Bereich von 0,4 bis 1,6Pkt./m<sup>2</sup>.

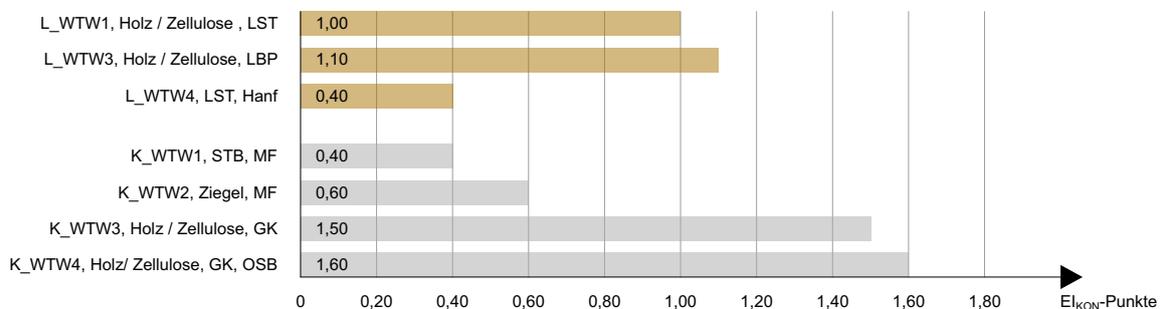


Abbildung 31:  $EI_{KON}$ -Bewertung der Wohnungstrennwände

Die Holzständerwände L\_WTW1 und L\_WTW3 sowie K\_WTW3 und K\_WTW4 erzielen in diesem Vergleich jeweils eine  $EI_{KON}$ -Bewertung von über 1Pkt./m<sup>2</sup>, während die massiven Bauteile L\_WTW4 sowie K\_WTW1 und K\_WTW2 maximal 0,6Pkt./m<sup>2</sup> aufweisen. Auch hier zeigt sich, dass die Wärmedämmstoffe die Entsorgungseinstufung der Bauteile negativ beeinflussen. Das Maß an Wärmedämmung in den Holzständerkonstruktionen ist mit durchschnittlich 20cm deutlich höher als im Bereich der massiven Bauteile. Trotz der Wahl nachhaltiger Baustoffe erzielen die Holz-Lehm-Wände aufgrund der Gefachdämmung eine schlechtere Beurteilung als beispielsweise die massive Stahlbetonwand. Ein Vergleich der verschiedenen Holzständerwände untereinander ergibt, dass der Einsatz von Lehm und ökologischen Dämmstoffen eine Verbesserung zur konventionellen Holzständerwand mit Mineralwollendämmung darstellt.

Die Gegenüberstellung der Lehmziegelwand und der massiven Ziegelwand zeigt ebenfalls eine leichte Verbesserung der Entsorgungsnote. Die Stahlbetonwand

K\_WTW1 erreicht die gleiche Bewertung wie das Lehmziegel-Mauerwerk L\_WTW4. Dies ist aber nicht darauf zurückzuführen, dass Stahlbeton in seiner Entsorgung ebenso unproblematisch ist wie Lehmstein, sondern beruht vielmehr auf der dünneren Ausführung der Stahlbetonschicht. Diese erzielt mit einer Dicke von 17cm anstelle der 24cm starken Lehmwand ein geringeres Volumen, wodurch sich die Bewertung des Stahlbetons etwas verbessert.

Insgesamt zeigt sich keines der vorgestellten Bauteile als in seiner Entsorgung problematisch. Es wird vielmehr wie bereits in den vorangegangenen Analysen deutlich, dass homogene Bauteile mit geringem Anteil an Wärmedämmstoffen hinsichtlich des Entsorgungsindikators aufgrund des einfacheren Aufbaus und der geringeren Zahl unterschiedlicher Baustoffe besser zu beurteilen sind als z.B. leichte Konstruktionen mit Gefachdämmung.

### Geschossdecken

Im Bereich der Geschossdecken kann ebenfalls für keine der gezeigten Konstruktionen eine bedeutend ungünstige  $EI_{KON}$ -Bewertung festgestellt werden. Im Bereich der Holz-Lehm-Decken werden hier 0,4 bis 0,7Pkt./m<sup>2</sup> erzielt, die konventionellen Bauteile liegen mit 0,7 bis 1,3Pkt./m<sup>2</sup> dennoch etwas höher.

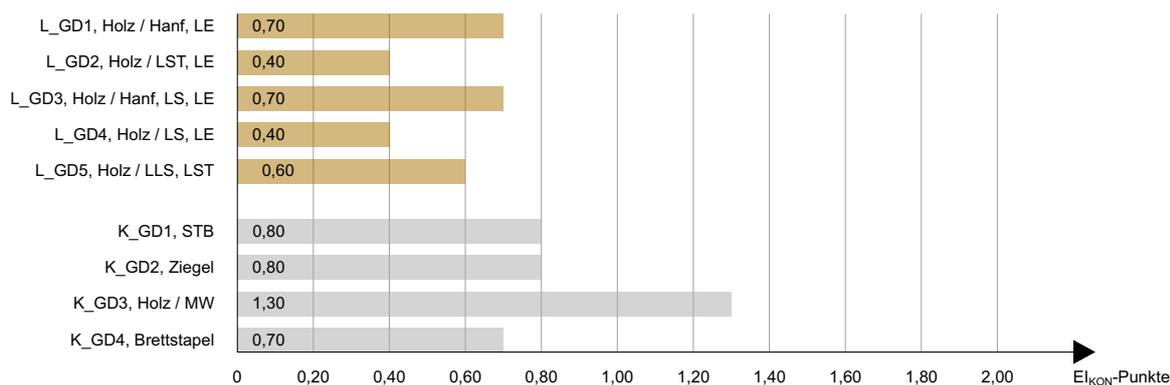


Abbildung 32:  $EI_{KON}$ -Bewertung der Geschossdecken

Ein direkter Vergleich der Holzbalkendecken L\_GD1 und L\_GD3 sowie K\_GD3, die einen sehr ähnlichen Aufbau aufweisen, zeigt trotz der allgemein guten Bewertung, welchen positiven Einfluss ökologische Materialien auf die zukünftige Entsorgung der Bauteile nehmen kann. Mit 0,7Pkt./m<sup>2</sup> erzielen die Holz-Lehm-Decken hier ein deutlich besseres Ergebnis als die konventionelle Holzdecke mit Mineralwollendämmung, deren Bewertung bei 1,3Pkt./m<sup>2</sup> liegt. Der Unterschied in dieser Beurteilung liegt einerseits an der schlechteren Entsorgungseinstufung von Mineralwolle im Vergleich zu Hanf, andererseits aber vor allem auch an dem in der konventionellen Decke eingebauten Zementestrich. Dieser wird hinsichtlich seiner Entsorgung mit der Note 3 bzw. 4 eingestuft, während Lehmestrich mit 2 bzw. 1 benotet wird.

Die besten Ergebnisse werden in diesem Vergleich von den Holz-Lehm-Decken L\_GD2 und L\_GD4 erzielt (0,4Pkt./m<sup>2</sup>). Bei diesen Holzbalkendecken entfällt die Gefachdämmung und wird durch unterschiedliche Lehmbaustoffe ersetzt. Eine Trennung der verschiedenen Lehmprodukte durch Holzschalungen erlaubt dabei eine besonders einfache Rückbaubarkeit, zudem kann in diesen Decken nahezu vollständig auf verklebte Verbindungen verzichtet werden. Dies ermöglicht auch den Austausch einzelner Schichten ohne eine Zerstörung von darüberliegenden Bauteilabschnitten.

## Dachaufbauten

Anders als bei den vorangegangenen Bauteilvergleichen zeigt sich im Bereich der Dachaufbauten eine größere Schwankungsbreite in den  $EI_{KON}$ -Bewertungen der Bauteilaufbauten. Die Lehtmächer erzielen hier Werte von 0,7 bis 2,7 Pkt./m<sup>2</sup>, die konventionellen Dachausführungen liegen mit 1,6 bis 3,4 Pkt./m<sup>2</sup> erneut etwas höher.

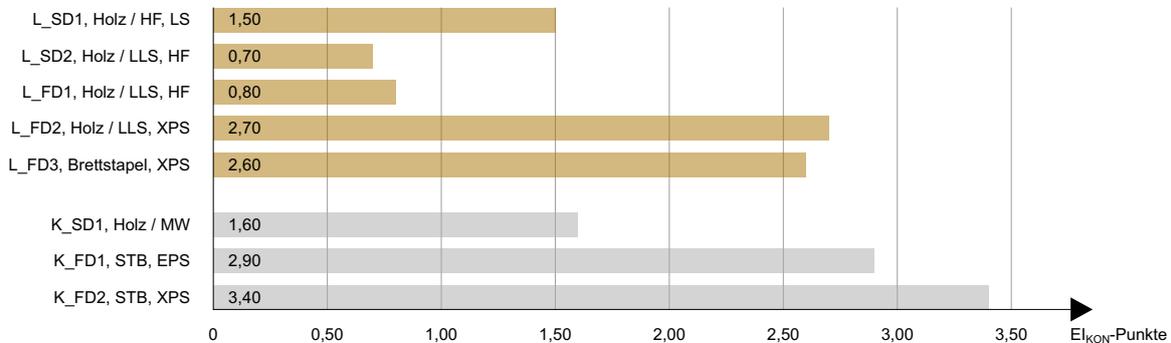


Abbildung 33:  $EI_{KON}$ -Bewertung der Dachaufbauten

Ein Vergleich der Holz-Lehm-Steildächer zeigt ein ähnliches Ergebnis wie im Bereich der OI3-Bauteilbewertung. Während das Steildach L\_SD2 mit 0,7 Pkt./m<sup>2</sup> ein hervorragendes Ergebnis erzielt, liegt die Punktebewertung für den Aufbau L\_SD1 mit 1,5 Pkt./m<sup>2</sup> doppelt so hoch. Dies resultiert aus dem deutlich größeren Volumen an Holzfaserdämmstoffen, die mit einer Entsorgungseinstufung der Note 4 sehr schlecht beurteilt werden.

Das konventionelle Steildach K\_SD1 erzielt mit 1,6 Pkt./m<sup>2</sup> eine ähnliche Bewertung wie das Bauteil L\_SD1, da auch hier eine Dämmschicht von 24 cm eingesetzt wird. Mineralwolle wird dabei in ihrer Entsorgung ebenso wie Holzfaser mit der Note 4 beurteilt.

Nichtsdestoweniger liegen die Entsorgungsindikatoren der drei angeführten Steildächer erheblich unter jenen der Flachdächer L\_FD2 und L\_FD3 sowie K\_FD1 und K\_FD2. Einzig der Flachdachaufbau L\_FD1 erzielt ein ähnlich gutes Ergebnis wie die bereits besprochenen Steildachausführungen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dieser Flachdachaufbau anders als die übrigen gezeigten Flachdächer nicht mit Polystyrol-, sondern mit Holzfaserplatten gedämmt wird, deren Entsorgungseinstufung mit der Note 4 statt 5 beurteilt wird. Die Dämmstärke und das somit für die Bewertung betrachtete Volumen ist wesentlich geringer als im Bereich anderer Flachdächer. Aus diesem Grund wirkt sich der Dämmstoff weniger deutlich auf die Endbewertung aus.

Die besonders schlechte Notenvergabe für die Bauteile L\_FD2, L\_FD3, K\_FD1 und K\_FD2 beruht erneut insbesondere auf der Wahl des Dämmstoffes sowie der hohen Dicke dieser Bauteilschicht. Mit einer Entsorgungseinstufung von 4 und einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 40 Jahren stellen sich XPS-Platten dabei als besonders problematisch heraus.

Die Punktebewertung der Lehm-Flachdächer zeigt trotz des Einsatzes dieses Dämmstoffes dennoch ein besseres Ergebnis als jenes der konventionellen Flachdächer, da in den Lehmbauteilen, abgesehen von der Wärmedämmung, kaum in ihrer Entsorgung problematische Baustoffe eingesetzt werden.

### Erdberührte Bauteile: Kelleraußenwände

Ein Vergleich der Kelleraußenwände aus Lehm, Stahlbeton und Ziegel zeigt deutlich, wie unterschiedlich die Entsorgungsbewertung dieser Bauteile abhängig von den gewählten Baustoffen ausfällt. Während Kellerwände aus Stampflehm hier mit 1 bzw. 1,8Pkt./m<sup>2</sup> sehr gute Werte erzielen, sind die  $EI_{KON}$ -Beurteilungen der Stahlbeton- und Ziegelwände in diesem Bereich mit 4,5 bzw. 4,6Pkt./m<sup>2</sup> als sehr problematisch einzustufen.

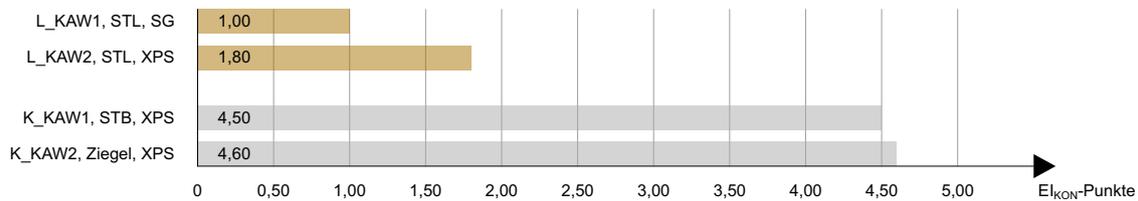


Abbildung 34:  $EI_{KON}$ -Bewertung der Kelleraußenwände

Der hohe Unterschied in der Bewertung setzt sich bei diesen Bauteilen im Wesentlichen aus zwei Faktoren zusammen. Zum einen ist der Anteil an Wärmedämmstoffen in den beiden konventionellen Kelleraußenwänden mit einer Schichtstärke von 25cm wesentlich höher als im Bereich der Lehmwände, deren Dämmung mit 10cm deutlich dünner bemessen ist. Die Drainageplatte aus EPS, deren Entsorgungseinstufung nochmals ungünstiger ist als jene von XPS-Platten, verschlechtert das Ergebnis zusätzlich. Das Bauteil L\_KAW1 zeigt eine Ausführungsvariante mit Schaumglas, deren  $\Delta OI3$ -Bewertung zwar im Vergleich zu XPS schlechter ist, der jedoch eine bessere Entsorgungseinstufung zugewiesen wird, wodurch sich die Bewertung im Vergleich zu den übrigen Kelleraußenwänden leicht verbessert.

Zum anderen verschlechtert sich der Entsorgungsindikator der konventionellen Kelleraußenwände auch durch die – im Vergleich zu oberirdischen Außenwänden – dickere Ausführung der tragenden Struktur. Stahlbeton und Ziegel weisen hier eine etwas schlechtere Bewertung auf als Lehm, was sich auch im Vergleich zu einer 1m dicken Lehmschicht noch negativ auf die Gesamtbilanz auswirkt.

Zusammenfassend zeigen die vorangegangenen Analysen, dass Lehmstoffe in Bezug auf das zukünftige Abfallmanagement im Wesentlichen kaum problematische Werte aufweisen. Ein Verkleben einzelner Lehmschichten ist in der Regel nicht erforderlich, da das Material selbst als Klebmasse genutzt werden kann, sich dabei aber nicht so dauerhaft an andere Baustoffe bindet wie dies bei synthetischen Klebstoffen erfolgt. Zudem geht mit dem Bauen mit Lehm in der Regel der Gedanke einer nachhaltigen Architektur einher, weshalb auch andere, gemeinsam mit Lehm eingesetzte Baustoffe sowohl in ihrer direkten Umweltwirkung als auch in der späteren Entsorgung meist weniger ungünstige Werte aufweisen als dies in konventionellen Systemen der Fall ist.

Insgesamt bestehen dabei auch zwischen der  $OI3_{KON}$ - und  $EI_{KON}$ -Bewertung der Bauteile durchaus viele Parallelen. Meist zeigen sich Bauteile, die in ihrer Herstellung ressourcensparend und umweltverträglich sind, auch im Bereich des Abfallmanagements als nachhaltig und weisen ein hohes Recyclingpotential auf. Nur vereinzelt besteht bei Baustoffen ein Widerspruch zwischen ihrer  $\Delta OI3$ -Bewertung und der Entsorgungseinstufung. Schaumglas wird beispielsweise hinsichtlich seiner Ökologie als schädlicher eingestuft als XPS, gleichzeitig ist sein Entsorgungsindikator besser als jener von extrudiertem Polystyrol.

Abschließend wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass Lehm sich in allen hier behandelten ökologischen Vergleichen als besonders nachhaltig herausstellt. Wenngleich gewisse Zuschläge oder Zusätze den ökologischen Fußabdruck etwas verschlechtern und Lehmbauplatten ein geringeres Recyclingpotential aufweisen als lose Lehmschüttungen, erzielen alle Lehmbaumaterialien im Vergleich zu herkömmlichen Massivbaumaterialien ein nahezu unschlagbares Ergebnis.

### 4.3 Ein ökonomischer Vergleich

Während die Errichtung von Wohngebäuden historisch betrachtet vor allem dem Zweck diente, Menschen vor Witterung und äußeren Gefahren zu schützen, werden an diese Nutzungsform heute wesentlich höhere Anforderungen gestellt. Seitens der Nutzer werden eine ansprechende Architektur sowie ein angenehmes Raumklima eingefordert, während Bauträger und Investoren Wohngebäude heute primär als monetäres Gut verstehen und nach Gewinnoptimierung streben.

Das Verständnis von Immobilien als Kapitalanlage hat zu einer Veränderung des Bauwesens geführt, das heute vermehrt darauf ausgerichtet ist, die Errichtungskosten gering zu halten und die Gewinnausschüttung zu maximieren. Dieser Intention kann vor allem durch günstige und schnell umzusetzende Bauweisen nachgekommen werden. Preiswerte Wärmedämmverbundsysteme aus Polystyrol-Dämmstoffen, die mit massiven Baumaterialien wie Stahlbeton verklebt werden, gelten aus wirtschaftlicher Sicht als die Bauweise der Zukunft. Für Kriterien der Nachhaltigkeit wird nur vereinzelt Raum geschaffen, die Interessen vermögender Investoren und einiger Baumaterialienlobbys überwiegen aktuell.

Damit sich nachhaltige Baumaterialien wie Lehm oder Holz am Baumaterialienmarkt durchsetzen können, müssen sie sich den aktuell geltenden Spielregeln anpassen. Ein Bauprodukt wird sich nicht allein aufgrund seiner ökologischen Qualitäten am Baumaterialienmarkt etablieren, wenn es wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig ist.

Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel der Frage nachgegangen, welche wirtschaftlichen Stärken und Schwächen das Bauen mit Lehm birgt und ob der Baumaterialien in der Lage ist, sich im vom Kapitalmarkt dominierten Baubereich durchzusetzen.

Dabei wird einerseits untersucht, inwieweit sich die Bauzeiten und Errichtungskosten von Lehm-Bauteilen von herkömmlichen Bauweisen unterscheiden, andererseits auch gezeigt, welche Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufbauten hinsichtlich der Komplexität ihrer Ausführung bestehen.

Abschließend erfolgt ein Einblick in die aktuelle Normenlage, die dem Bauen mit Lehm zugrunde liegt. Aufgrund fehlender Regulierungen im Bereich der Lehm-Bauweise muss hier aktuell noch mit einigen Hürden im Bauprozess gerechnet werden, was den größten wirtschaftlichen Nachteil dieses Baumaterialien verursacht. Aus diesem Grund wird im Detail dargelegt, welche Probleme der Einsatz von Lehm-Baumaterialien derzeit für Planer und Ausführer verursacht und welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um das Bauen mit Lehm im Wiener Wohnbau in einen sicheren Rechtsrahmen zu setzen.

### 4.3.1 Bauzeiten und Kostenschätzung

Lehm wird im allgemeinen Verständnis als ausgesprochen ökologischer Baustoff angesehen, gleichzeitig gilt das Bauen mit Lehm aber auch als besonders kosten- und zeitintensiv.

Diese pauschalen Aussagen über Lehmbaustoffe sind durchwegs bekannt und treffen – wie im vorangegangenen Kapitel mit konkreten Zahlenwerten belegt wird – zumindest hinsichtlich der Ökologie des Materials zu.

Im Gegensatz dazu kann der pauschalen Aussage über die hohen Kosten und langen Bauzeiten im Lehmbau aus heutiger Sicht nicht mehr zugestimmt werden, bezieht sich diese doch vor allem auf den traditionellen Lehmbau, bei dem das Material vor Ort gemischt und händisch zu Bauteilen geformt wird.

Die langen Bauzeiten entstehen dabei in erster Linie durch die Trocknungsdauer massiver Bauteile aus feuchten Lehmprodukten sowie durch die arbeitsintensive Herstellung von Bauteilen in traditionellen Lehmbautechniken.

Gleichermaßen resultieren die hohen Herstellungskosten aus dem enormen Verarbeitungsaufwand feuchter Lehmmischungen sowie der damit verbundenen langen Arbeitszeit der Facharbeiter, deren Folge für den Bausektor vergleichsweise hohe Lohnkosten sind.

Moderner Lehmbau unterscheidet sich in vielen Aspekten von der traditionellen Selbstbauweise, weshalb die allgemeinen Aussagen über Kosten und Bauzeit auf das Bauen mit Lehm heute nicht mehr pauschal als wahr angesehen werden können.

Im Folgenden wird aufgezeigt, mit welchen Bauzeiten und Kosten bei modernen Lehmgebäuden gerechnet werden muss. Eine exakte Ermittlung der Arbeitsdauer und des finanziellen Aufwands konkreter Bauteile stellt sich dabei als sehr schwierig dar. Obwohl die Zahl an Anbietern in den letzten Jahren gestiegen ist, ist die verfügbare Datenmenge über die Kosten von Lehmbauleistungen immer noch wesentlich geringer als im Bereich bereits im Bausektor etablierter Bauprodukte und -leistungen. Je nach Bauaufgabe unterscheiden sich die Anforderungen an diese Arbeiten außerdem teils stark voneinander.<sup>188</sup> Die im Folgenden vorgenommene Analyse der zu erwartenden Bauzeiten und -kosten von Lehmbauteilen stellt somit keine exakte Kalkulation dar und kann lediglich als Abschätzung verstanden werden.

#### Bauzeiten

Wie lange die Herstellung von Lehmbauteilen dauert, wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Eine genaue und gut überlegte Baustellenorganisation und Bauablaufplanung können die Errichtungsdauer beispielsweise wesentlich verkürzen und sind daher ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit von Lehmbauten.

Einen wichtigen Faktor stellt in diesem Zusammenhang die Planung der Einbauzeiten von Lehmbauteilen und deren Trocknung dar. Der Einbau von feuchten Lehmbaustoffen im Bereich der Außenbauteile sollte nach Möglichkeit in warmen Jahreszeiten erfolgen, da die Trocknung durch die höheren Temperaturen begünstigt wird. Bis zum Herbst muss der Rohbau soweit trocken sein, dass die außenliegenden Lehmbauteile verputzt und vor Frost geschützt sind.<sup>189</sup>

188 vgl. ROEHLER / ZIEGERT 2010, S.267

189 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.189

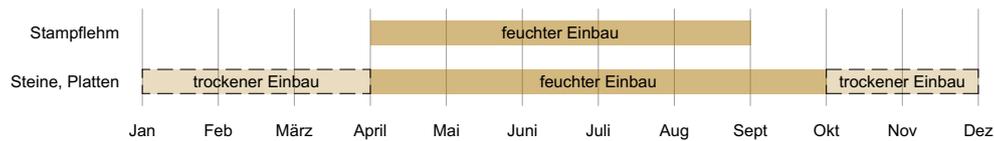


Abbildung 35: empfohlene Einbauzeiten einiger Lehmbaustoffe<sup>190</sup>

Die Trocknung der Lehmbaustoffe kann bei Bedarf auch durch herkömmliche Bautrocknungsgeräte beschleunigt werden. Lehm bietet dabei gegenüber einigen anderen Baustoffen den Vorteil, keinen chemischen Abbindeprozess zu durchlaufen, weshalb eine schnellere Trocknung der Bauteile deren Festigkeit im Wesentlichen nicht negativ beeinflusst.

Der in Beton als Bindemittel enthaltene Zement erhärtet beispielsweise durch die chemische Reaktion mit Wasser. Wird dem Beton dieses zu rasch entzogen, kann der Zement nicht vollständig abbinden, wodurch die Festigkeit des Baustoffes den geplanten Zielwert nicht erreicht. Beton muss daher anders als Lehm während des gesamten Abbindeprozesses ausreichend feucht gehalten und vor zu rascher Austrocknung geschützt werden. Dadurch ist es nicht möglich, die Trocknungsdauer von Beton wesentlich zu verkürzen, ohne dessen Eigenschaften negativ zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu erhärten Lehmbaustoffe rein durch die physikalische Austrocknung des in einer Lehmmischung enthaltenen Wassers. Eine Beschleunigung dieses Vorganges bedingt daher in der Regel keine negativen Folgen für die Festigkeitseigenschaften des Materials.

Zur optimalen Trocknung von Lehmbauteilen muss vor allem auf eine ausreichende Belüftung dieser geachtet werden. Einseitig abgeschlossene Aufbauten trocknen dabei wesentlich langsamer als freistehende Lehmelemente. Besonders Leichtlehme mit organischen Zuschlägen müssen möglichst rasch austrocknen, um das Schimmeln oder Verrotten dieser Bestandteile zu vermeiden.

Die genauen Zeiten, die Lehmbauteile für die Trocknung benötigen, hängen einerseits von der Einbausituation und Bauteilstärke ab, andererseits von der eingesetzten Lehmmischung. Konkrete Angaben zur Trocknungszeit von Lehmbaustoffen und -bauteilen sind daher nur vereinzelt zu finden. Als Richtwert kann aber beispielsweise angenommen werden, dass Außenwände aus Strohleichteilm mit einer Dicke von 30cm ohne maschinelle Trocknungsgeräte in ca. 2 Monaten ausreichend trocken sind.<sup>191</sup> Innenschalen aus Holzleichteilm mit einer Bauteilstärke von 15cm benötigen für den Trocknungsvorgang etwa 12 Wochen.<sup>192</sup> Die durchschnittliche Trocknungsdauer von Lehminnenputzen beträgt je nach Schichtstärke 4 bis 6 Wochen, kann aber durch den Einsatz von Lehm trockenputzplatten wesentlich verkürzt werden.

Neben Überlegungen zum optimalen Einbauzeitpunkt feuchter Lehmbaustoffe sowie ihrer Trocknung ist auch die Planung der Bauabläufe verschiedener Gewerke ausschlaggebend dafür, ob die Bauzeiten eines Lehmhauses mit jenen konventioneller Bauweisen konkurrieren können. Die teils längeren Trocknungszeiten von Lehm gegenüber anderen Baustoffen bedeuten keinesfalls, dass zwischen verschiedenen Bauabschnitten lange Stehzeiten zu kalkulieren sind. Vielmehr muss der Bauablauf so organisiert werden, dass während der Trocknungsphase eines Bauabschnitts an anderen Teilen des Gebäudes weitergearbeitet werden kann.

190 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.189

191 vgl. ebenda, S.189

192 vgl. ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.121

Die Dauer der Errichtung unterschiedlicher Lehmbauteile stellt einen weiteren Faktor dar, der die Bauzeiten im Lehmabau wesentlich beeinflusst. Auch hier gibt es große Unterschiede in den Zeitangaben für verschiedene Lehmabauarbeiten, da nicht alle Lehmmischungen gleich gut zu verarbeiten sind und je nach Technik in ihrem Aufwand stark variieren können. Die Optimierung des Baustoffgemisches sowie die Wahl geeigneter Maschinen erlauben dabei teils eine enorme Zeitersparnis.

Während für die Herstellung einer Stampflehmwand ohne Maschineneinsatz für die Aufbereitung, den Transport und die Schalungsarbeiten mit einer Herstellungsdauer von 20 bis 30 Stunden je Kubikmeter Bauteil gerechnet werden muss, verringert eine Optimierung des Schalungssystems und der Einsatz elektrischer Vibrationsrüttler diese Zeitspanne auf 8 bis 10 Stunden pro Kubikmeter. Eine weitere Automatisierung des Verfahrens, bei der der Baustoff maschinell in die Schalung gefördert und mit schweren pneumatischen Stampfern verdichtet wird, führt zu einer erneuten Reduktion der Arbeitszeit auf etwa 2 Stunden pro Kubikmeter.<sup>193</sup>

Der Einsatz von Maschinen kann die Herstellungsdauer von Lehmbauteilen aus erdfeuchtem Lehm somit wesentlich verkürzen. Dies setzt jedoch voraus, dass Lehmabauverfahren gewählt werden, die mit herkömmlichen Baumaschinen gut umsetzbar sind und ein möglichst geringes Maß an spezialisiertem Wissen der Arbeiter erfordern. Zudem muss für die Arbeit mit großen Maschinen gewährleistet sein, dass diese nicht von einer gegebenenfalls benötigten Schalung behindert werden.

Wenngleich sich die Bauzeiten verschiedener Lehmbauteile je nach Geometrie, Lehmmischung und Lehmabauverfahren unterscheiden können, geben die nachstehenden Richtzeiten einen ungefähren Überblick, mit welchen Zeitspannen bei der Durchführung einiger Lehmabauarbeiten gerechnet werden kann.

Lehmbauteil	Zeitaufwand
Herstellung einer Lehmputzmischung	5 Std./m <sup>2</sup>
Herstellung Lehmputz (Wand)	0,8 Std./m <sup>2</sup>
Herstellung Lehmputz (Decke)	1 Std./m <sup>2</sup>
Herstellung einer Leichtlehmmischung	4 Std./m <sup>2</sup>
Lehmstein-Stapelwand (ohne Mörtel)	25-30 min/m <sup>2</sup>
Beplankung einer Wandfläche mit Lehmplatten	20 min/m <sup>2</sup>
Herstellung Lehmsteinmauerwerk	48-92 min/m <sup>2</sup>
Ausfachung einer Holzständerwand mit Lehmsteinen (mit Mörtel)	58-102 min/m <sup>2</sup>
Herstellung einer Stampflehmwand (inkl. Schalungsarbeiten)	350-1250 min/m <sup>2</sup>

*Tabella 75: Herstellungsdauer einiger Lehmabauarbeiten<sup>194</sup>*

Die bisher angeführten Überlegungen zur Herstellungsdauer von Lehmbauteilen beziehen sich dabei vor allem auf die Verwendung feuchter Lehmabaustoffe, die vor Ort zu Bauteilen geformt und getrocknet werden. Diese Prozesse sind im Vergleich zu heutigen Bauweisen oft zeitintensiv, auch wenn ihr Arbeitsaufwand durch den Einsatz moderner Maschinen deutlich reduziert werden kann. Um im Bauwesen konkurrenzfähig zu werden, muss die Bauzeit im Bereich des Lehmabaus dennoch weiter verkürzt werden. Dies ist insbesondere aufgrund der wachsenden Zahl an Lehmfertigteilen und trockenen Lehmprodukten heute durchaus möglich. Die Herstellung eines Mauerwerksverbandes aus Lehmsteinen unterscheidet sich in

193 vgl. MINKE 1994/2001, S.118

194 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.193 sowie ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.276

seinem Zeitaufwand beispielsweise kaum von der Errichtung eines herkömmlichen Ziegelmauerwerks. Die Verarbeitung ist durch den Entfall der Trocknungszeiten der Steine außerdem weit weniger an warme Jahreszeiten gebunden als bei der Verarbeitung feuchter Lehmbaustoffe. Einzig durch den Einsatz von Lehm-Mauermörtel wird die Herstellungsdauer des Mauerwerksverbandes etwas verlängert, da die Höhe, die in einem Stück gemauert werden kann, auf maximal 2m pro Tag begrenzt ist (vgl. [3.1.6 Lehmmörtel](#)).

Auch im Stampflehmbau muss heute nicht mehr automatisch mit einer unwirtschaftlich langen Herstellungsdauer gerechnet werden. Vorgefertigte Elemente aus Stampflehm werden auf der Baustelle wie Betonfertigteile mittels Kran in Position gebracht und anschließend entsprechend verankert. Die langen Trocknungszeiten der Bauteile entfallen somit, der Einbau selbst ist zeitlich mit jenem der Betonelemente vergleichbar. Die möglichen Bauteilabmessungen sind dabei wie im Betonbau vor allem durch den Transport und die Gegebenheiten auf der Baustelle beschränkt.

In gleichem Maße gilt auch für die meisten anderen vorgefertigten Lehmprodukte, dass durch den Entfall der Herstellung einer Lehmmischung vor Ort, der aufwändigen Verarbeitung zu Bauteilen und der langen Trocknungszeiten die gleichen Bauzeiten erreicht werden können wie bei konventionellen Bauweisen. Ein zusätzlicher Vorteil der Lehmvorfertigung gegenüber feuchten Lehmmischungen liegt dabei in der witterungsgeschützten Produktion und kontrollierbaren Produktqualität. Zusätzlich werden für den Umgang mit vorfabrizierten Lehmteilen weniger spezialisierte Lehmfachkräfte benötigt, da sich der Einbau dieser Produkte nur geringfügig von bekannten Bauprodukten unterscheidet und keine Lehmmischungen vor Ort hergestellt werden müssen.<sup>195</sup>

Obwohl ein konkreter Vergleich zwischen der Herstellungsdauer von Lehmteilen und solchen aus konventionellen Systemen auf Basis genauer Zahlenwerte nicht möglich ist, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass sich die Kalkulation der Bauzeiten im Lehmfertigteilbau nur unwesentlich von anderen Bauweisen unterscheidet. Dies setzt allerdings voraus, dass die Planung der entsprechenden Bauteile rechtzeitig und genau erfolgt, da sich die Trocknungszeit der Lehmelemente in den Produktionsprozess verlagert. Mit Ausnahme der längeren Produktionszeiten können kaum zeitliche Unterschiede zwischen der Verarbeitung von werksmäßig hergestellten Lehmbaustoffen und heute gängigen Bauprodukten festgestellt werden.

### *Kostenschätzung*

Die Errichtungskosten eines Bauwerks hängen ähnlich wie die Herstellungsdauer von einer Vielzahl von Faktoren ab. Neben den reinen Materialkosten beeinflussen beispielsweise auch Transport, Komplexität der Bauaufgabe, die Anzahl benötigten Personals sowie die Baustellensituation das Kostengefüge eines Projekts. Eine fundierte Kalkulation der Kosten der in dieser Arbeit gezeigten Bauteilaufbauten kann in diesem Sinne nicht durchgeführt werden, da hierfür zu viele Faktoren mitwirken, für die Annahmen ohne gesicherte Datengrundlage getroffen werden müssten. Nachstehend wird dennoch zumindest ein Überblick über die Einflussfaktoren auf das Kostengefüge von Lehmteilen gegeben. Zusätzlich wird anhand einiger Richtpreise aufgezeigt, inwieweit sich die Kosten für Lehmprodukte von anderen Baustoffen unterscheiden.

195 vgl. BLASCHEK 2015, S.151

Der Baustoff Lehm weist ein breitgefächertes Preisspektrum auf. Während Lehm als Baugrubenaushub mehr oder weniger kostenlos zur Verfügung steht, muss bei komplexen und großformatigen Lehmfertigteilen, deren Herstellung einen hohen Arbeitsaufwand erfordert, mit teils sehr hohen Herstellungskosten gerechnet werden. Die Vorfertigung standardisierter Lehmstoffe wie Lehmsteine entspricht in ihren Herstellungskosten aber im Wesentlichen jenen konventioneller Materialien. Mit zunehmender Verbreitung eines Baustoffes im Bausektor und einer wachsenden Zahl von Anbietern für entsprechende Produkte sinken diese Preise zudem in der Regel, weshalb auch für Lehmstoffe aufgrund des wachsenden Interesses an diesem Baustoff mit einer stetigen Preisreduktion in den nächsten Jahren gerechnet werden kann.

Im Hinblick auf die steigenden Preise im Energiesektor ist zudem anzunehmen, dass industriell gefertigte Lehmstoffe in Zukunft in ihren Herstellungskosten günstiger werden könnten als Produkte wie Ziegel oder Beton. Die Produktion von Lehmstoffen benötigt durch den Entfall von Brennvorgängen deutlich weniger Energie als andere Baustoffe, eine Steigerung der Kosten energetischer Ressourcen wirkt sich daher auf Lehmstoffe weit geringer aus als auf Baustoffe mit energieintensiver Herstellung.<sup>196</sup>

Im Folgenden werden beispielhaft die Durchschnittswerte für Materialkosten einiger Baustoffe aufgezeigt. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Datengrundlage für eine solche Kostenaufstellung vergleichsweise unvollständig ist und kaum allgemeingültige Richtpreise vorliegen. Die nachstehend gezeigten Materialkosten setzen sich deswegen vorrangig aus dem Mittelwert verschiedener Preislisten, die von Herstellern zur Verfügung gestellt werden, zusammen. Zusätzlich wird für konventionelle Baustoffe auf das von der AOV *Südtirol*<sup>197</sup> erarbeitete *Richtpreisverzeichnis für Hochbauarbeiten* zurückgegriffen. Dabei wird besonderes Augenmerk darauf gelegt, nur Preise aus ähnlichen Zeitperioden miteinander zu vergleichen – so werden die von *Volhard*<sup>198</sup> angegebenen Richtwerte beispielsweise nur untereinander verglichen, da diese aus den Jahren um 2013 stammen und daher von aktuellen Preislisten abweichen können.

Lehmstein, Ziegel	Kostenschätzung	Quelle
Lehmstein (NF, AK2, stranggepresst)	190 €/m <sup>3</sup>	Volhard 2013, S.190
Leichtlehmstein (NF, AK1)	230 €/m <sup>3</sup>	Volhard 2013, S.190
Vollziegel (NF)	250 €/m <sup>3</sup>	Volhard 2013, S.190
Leichtziegel (2DF)	150 €/m <sup>3</sup>	Volhard 2013, S.190
Lehmziegel massiv (NF)	0,60-0,80 €/Stk.	Preisliste Naturbauhof
Lehmziegel gelocht (2DF / 3DF)	0,60-0,80 €/Stk.	Preisliste Naturbauhof
Leichtlehmstein (NF)	0,80 €/Stk.	Preisliste Naturbauhof
Mauerziegel, plan oder gelocht	0,70-0,80 €/Stk.	Preislisten Comelli / Wienerberger
Wärmedämmziegel, z.B. Porotherm, Acotherm (NF)	4-5€/Stk.	Preislisten Comelli / Wienerberger

Tabelle 76: Herstellerpreise von Lehmsteinen und Ziegeln

196 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.136

197 Aufgrund einer fehlenden aktuellen österreichischen Datengrundlage muss an dieser Stelle auf Richtpreise aus Südtirol verwiesen werden

198 VOLHARD 1983/2013, S.190f.

Lehmsteine werden sowohl von auf Lehmprodukte spezialisierten Anbietern als auch in einigen Ziegeleien hergestellt. Im Ziegelwerk werden sie als Grünlinge bezeichnet, womit nicht gebrannte Ziegel gemeint sind.

Da Lehmsteine mit den gleichen Verfahren wie Ziegelsteine hergestellt werden können und lediglich der Brennvorgang entfällt, stellt die Produktion dieser Lehmbaustoffe technisch keine Schwierigkeit dar und kann mit üblichen Maschinen erfolgen. Dadurch kann sich die Preisgestaltung problemlos an konventionelle Ziegel anpassen.

Wie die obenstehende Tabelle zeigt, liegen die Materialkosten von Lehmsteinen in etwa im Bereich konventioneller Mauerziegel. Spezielle Mauerziegel mit wärmedämmender Funktion erzielen dabei wesentlich höhere Stückpreise als einfache gebrannte oder ungebrannte Mauersteine, da diese mit speziellen Zuschlägen versetzt und in ihrer Herstellung etwas aufwändiger sind.

Während in den Stückpreisen kaum Unterschiede zwischen Lehmsteinen und Ziegeln zu erkennen sind, liegen die Kosten pro Kubikmeter etwas weiter auseinander.

Der Preisunterschied pro Kubikmeter im Bereich der leichten Steine ist dabei jedoch nicht auf das Material der Steine zurückzuführen, sondern auf deren Format. Während NF-Leichtlehmsteine hier mit 230€/m<sup>3</sup> geschätzt werden, belaufen sich die Kosten im Bereich konventioneller Leichtziegel auf 150€/m<sup>3</sup>. Aufgrund fehlender Schätzungswerte für die Kosten leichter Ziegel im Normalformat muss hier auf Preise von 2DF-Steinen zurückgegriffen werden, die größere Abmessungen aufweisen. Durch die somit geringere Stückzahl an benötigten Steinen für die gleiche Wandgröße können die Materialkosten pro Kubikmeter etwas reduziert werden.

Ein Vergleich der Kosten pro Kubikmeter Wand aus normalen Lehmsteinen und Mauerziegeln zeigt, dass das Lehmsteinmauerwerk etwas günstiger zu bewerten ist, da der Stückpreis für Lehmsteine geringfügig unterhalb jenem konventioneller Ziegel liegt.

Stamplfelm, Beton	Kostenschätzung	Quelle
<a href="#">Stamplfelm (erdfeucht, Sackware)</a>	250 €/m <sup>3</sup>	<a href="#">Volhard 2013, S.191</a>
Normalbeton (Sackware)	70 €/m <sup>3</sup>	Volhard 2013, S.191
Normalbeton C20/25 (Sackware)	80-85€/m <sup>3</sup>	Richtpreise AOV
Normalbeton C20/25 (Sackware)	105 €/m <sup>3</sup>	Preisliste Asamer
<a href="#">Stamplfelm (erdfeucht, Sackware)</a>	163 €/Tonne	<a href="#">Preisliste Naturbauhof</a>
Beton C25/30 (Sackware)	220 €/Tonne	Preisliste Profibaustoffe
Beton C16/20 (Sackware)	180 €/Tonne	Preisliste Profibaustoffe

*Tabelle 77: Herstellerpreise von Stamplfelm und Beton*

Während Lehmsteine sich in ihrer Produktion kaum von konventionellen Ziegeln unterscheiden, bestehen zwischen der Herstellung von Stamplfelm- und Betonmischungen sowie Bauteilen aus diesen Materialien größere Differenzen, wodurch auch die entsprechenden Kosten stärker voneinander abweichen.

Das Rohmaterial einer als Stamplfelm geplanten Lehmmischung weist einen geringeren Preis auf als jenes einer Betonmischung, gleichzeitig erweist sich der Betonpreis pro Kubikmeter als deutlich günstiger. Dies liegt einerseits an der aufwändigeren Verarbeitung von Stamplfelm in der Bauteilerzeugung, andererseits aber auch im höheren Materialverbrauch zur Herstellung eines gleich großen Bauteilabschnittes.

Wie bereits mehrfach ausgeführt, erscheint die Umsetzung von Bauteilen aus Stamplfelm vor Ort aufgrund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwandes sowie der damit einhergehenden Bodenerschütterungen für große Bauvorhaben im städtischen

Gefüge nicht als wirtschaftlich. Vielmehr scheint die Vorfabrikation von Bauteilen aus Stampflehm als zielführend. Angesichts der jungen Entwicklungsgeschichte von Stampflehmfertigteilen und der geringen Zahl an Vergleichsobjekten liegen für derartige Elemente kaum Kostenschätzungen vor. Daher kann an dieser Stelle kein Preisvergleich zwischen vorgefertigten Stampflehm- und Betonelementen erfolgen. Es muss allerdings damit gerechnet werden, dass vorgefertigte Stampflehmelemente preislich deutlich über gleichwertigen Stahlbeton-Fertigteilen liegen.

Putze, Mörtel	Kostenschätzung	Quelle
<a href="#">Lehmputz Grundputz (mineralisch)</a>	0,20 €/L	<a href="#">Volhard 2013, S.191</a>
<a href="#">Lehm-Mauermörtel, erdfeucht</a>	0,15 €/L	<a href="#">Volhard 2013, S.191</a>
Kalkputz Grundputz	0,50 €/L	Volhard 2013, S.191
Kalk-Fertigmörtel	0,40 €/L	Volhard 2013, S.191

*Tabelle 78: Herstellerpreise einiger Putzsysteme*

Wie die obenstehende Tabelle zeigt, liegen Lehmputze und Lehmmörtel hinsichtlich ihrer Materialkosten deutlich unterhalb der Kosten der gleichen Produkte aus Kalk, die in diesem Vergleich beispielhaft für konventionelle Putzsysteme herangezogen werden. Dies ist damit zu begründen, dass der Rohstoff Lehm vergleichsweise günstig ist und die Verarbeitung als Putz oder Mörtel mit handelsüblichen Maschinen durchgeführt werden kann, die auch für konventionelle Putzsysteme genutzt werden. Der Arbeitsaufwand erhöht sich dabei nur bedingt, einzig die lange Trocknungszeit von Lehmputz führt in der Gesamtbetrachtung zu höheren Kosten. Durch den Einsatz von Trockenputzplatten kann der Putzauftrag jedoch von einigen Zentimetern auf wenige Millimeter Dicke verringert werden, wodurch ein Großteil dieser Trocknungsdauer eingespart und das Kostengefüge entsprechend reduziert werden kann.

Plattenwerkstoffe	Kostenschätzung	Quelle
<a href="#">Lehmplatte stranggepresst</a>	15 €/m <sup>2</sup>	<a href="#">Volhard 2013, S.190</a>
<a href="#">Lehmplatte</a>	20-30 €/m <sup>2</sup>	<a href="#">Naturbauhof.de</a>
Gipsfaserplatte (d=12,5mm)	10-12 €/m <sup>2</sup>	Preisliste Fermacell
Gipsfaserplatte (d=12,5mm)	12-13 €/m <sup>2</sup>	Preisliste Knauf 2018
Gipskartonplatte (d=12,5mm)	5-7€/m <sup>2</sup>	Preisliste Knauf 2018

*Tabelle 79: Herstellerpreise einiger Trockenbauplatten*

Lehmplatten bieten in Bauteilen eine Alternative zu Gipsfaser- und Gipskartonplatten und dienen vor allem der Beplankung im Innenbereich sowie der Ausführung von Trockenputzsystemen.

Die Kostenschätzung liegt für derartige Platten nach aktuellen Preislisten bei 20 bis 30€/m<sup>2</sup> – *Volhard* bewertet die Platten etwas günstiger (Stand: 2013). Im Vergleich zu Gipsfaser- und Gipskartonplatten fallen Lehmbauplatten in ein deutlich höheres Preissegment. Für diese Produkte muss somit abgewogen werden, ob eine Kostensteigerung zugunsten besserer raumklimatischer Bedingungen wirtschaftlich vertretbar ist. Ausschlaggebend erscheint hier speziell die benötigte Menge solcher Platten, die in einem Projekt eingesetzt werden soll.

Der beispielhafte Vergleich einiger konventioneller Baustoffe und Lehmprodukte zeigt, dass Lehm nicht in allen Produktkategorien ähnlich günstige Preise erzielen kann wie herkömmliche Baustoffe. Dennoch wird deutlich, dass einige Lehmstoffe bereits heute durchaus im gleichen Preissegment liegen wie Vergleichsprodukte aus üblichen

Bauweisen. Mit einem wachsenden Interesse an nachhaltigen Bauprodukten und damit steigender Verbreitung von Lehmbaustoffen am Markt ist zudem anzunehmen, dass die Materialkosten von Lehmprodukten in den nächsten Jahren stetig sinken werden.

Die Gesamtkosten von Bauteilen über deren Lebenszyklus bestehen außerdem nicht nur aus den reinen Material- oder Herstellungskosten. Im Verlauf der Gebäudenutzung müssen je nach Langlebigkeit der Baustoffe auch Sanierungszyklen in die Kostenschätzung einberechnet werden. Als maßgebend kann hierfür die durchschnittlich zu erwartende Lebensdauer einzelner Bauteilschichten angenommen werden.

Berücksichtigt man, dass Lehmbaustoffe nach Einschätzung der *IBO*<sup>199</sup> eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 100 Jahren erreichen und dementsprechend deutlich weniger Sanierungszyklen durchlaufen als andere Baustoffe, können die Instandhaltungskosten von Bauteilen aus Lehm als wesentlich geringer eingeschätzt werden als jene gleichwertiger Konstruktionen aus anderen Baustoffen. Wenngleich Lehm hinsichtlich der Instandhaltungskosten aller Wahrscheinlichkeit nach als sehr positiv beurteilt werden kann, ist der Aspekt der Lebensdauer von Baustoffen in derzeit vorliegenden Kostenschätzungen oft unterrepräsentiert.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, der in aktuellen Kostenrechnungen von Baustoffen kaum berücksichtigt wird, ist jener der Entsorgungskosten. Prognosen über Deponiekosten von Bauabfällen, die in 50 bis 100 Jahren entstehen, stellen sich als sehr schwierig dar und sind daher in der Regel nicht Teil einer baustoffbezogenen Kostenaufstellung.<sup>200</sup>

Die Entsorgungskosten können für Lehmprodukte allgemein dennoch als sehr gering eingeschätzt werden, da das Material in hohem Maße recyclingfähig ist und nicht mehr benötigte Lehmbaustoffe meist ohne großen Aufwand sortenrein an die Umwelt zurückgegeben werden können. Dem stehen in heute üblichen Bauweisen vielmals Baustoffe gegenüber, deren Recycling nur unter erheblicher Anstrengung möglich ist. Durch die Vielzahl von verklebten Verbindungen ist darüber hinaus eine sortenreine Trennung der Baustoffe und anschließende stoffliche oder energetische Verwertung nur schwierig umzusetzen. Die wachsenden Massen an Bauabfällen, die endgelagert werden müssen, stellen dabei nicht nur ein ökologisches Problem dar, sondern erhöhen auch die entsprechenden Entsorgungskosten.

Zusätzlich muss im Sinne einer Kostenschätzung berücksichtigt werden, dass Materialkosten die Preisgestaltung verschiedener Bauweisen oft weit weniger beeinflussen als der Arbeitsaufwand zur Bauteilherstellung sowie die damit verbundenen Lohnkosten. Diese liegen meist um ein Vielfaches höher als die reinen Kosten für Material und steigen in der Regel proportional zum Zeitaufwand für die Herstellung eines Bauteils.

Wie bereits angeführt, müssen Lehmbauteile in ihrer Herstellung dabei nicht kostenintensiver sein als konventionelle Systeme. Durch die steigende Zahl vorgefertigter Lehmbauteile und -baustoffe können die Bauzeit und somit auch der Lohnkostenanteil moderner Lehmbauten im Vergleich zu traditionellen Lehmbautechniken entscheidend reduziert werden.

Allgemein wird deutlich, dass das Vorurteil, mit Lehm zu bauen dauere lange und sei sehr teuer, aus heutiger Sicht nicht mehr ausnahmslos zutrifft.

199 vgl. IBO 2009

200 vgl. SCHROEDER 2010, S.28

Während die Herstellungskosten traditioneller Lehmbauteile, die vor Ort aus selbst erstellten Lehmmischungen gefertigt werden, tatsächlich wesentlich über jenen anderer, heute vorherrschenden Bauweisen liegen, ermöglichen Bauteile aus Lehmfertigteilen und vorgefertigten Lehmbaumaterialien eine wesentliche Reduktion dieser Herstellungskosten. Auch wenn Produkte aus Lehm nach derzeitigem Stand nicht in allen Kategorien den Preisen von Vergleichsprodukten entsprechen, kann zumindest teilweise bereits jetzt für einige Baustoffe ein sehr geringer Preisunterschied aufgezeigt werden.

Unter Berücksichtigung der Instandhaltungs- und Entsorgungskosten sowie ökologischer Aspekte wie der Kosten für die benötigte Energie zur Baustoffherstellung ist davon auszugehen, dass sich der Preisunterschied zwischen Lehmbaumaterialien und aktuell vorrangig eingesetzten Materialien in Zukunft nochmals deutlich reduzieren wird.

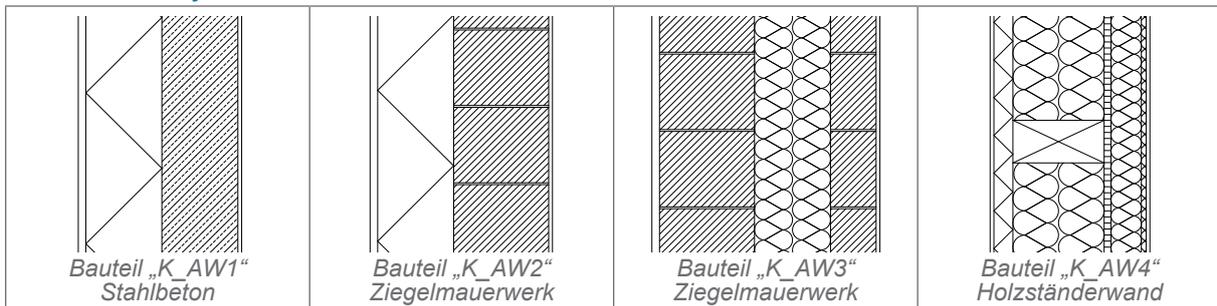
### 4.3.2 Nutzflächenanalyse

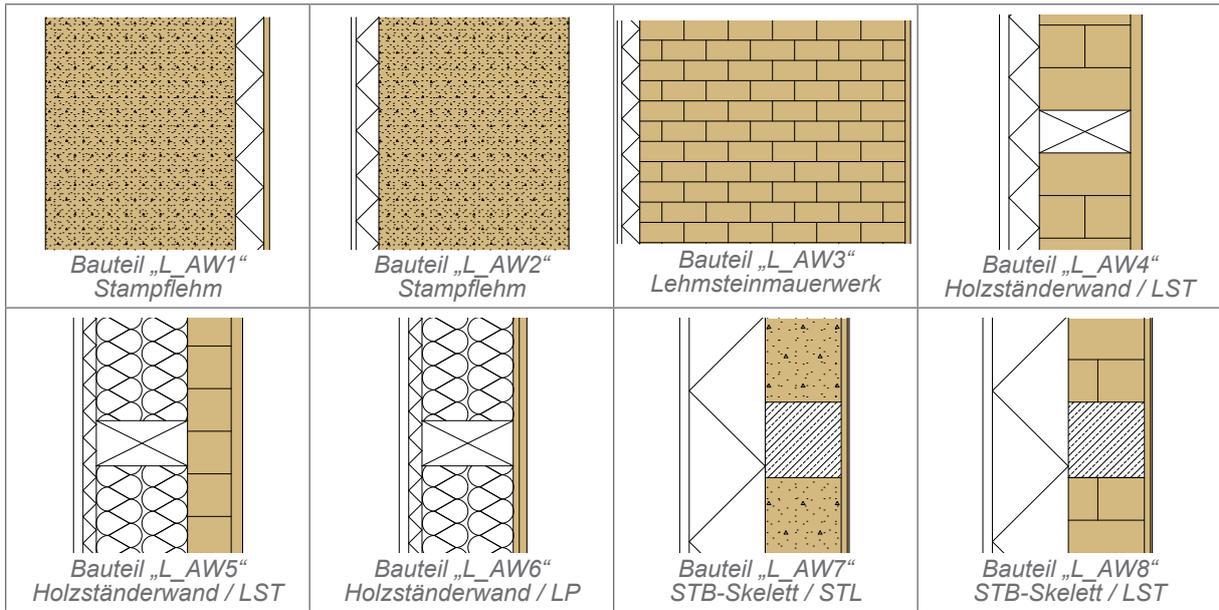
Die weltweit wachsenden Bevölkerungszahlen und die vermehrte Zuwanderung von Menschen vom Land in die Stadt erhöhen den Bedarf an Wohnraum im städtischen Gefüge. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, müssen freie Bauflächen effizient genutzt und somit viel zusätzliche Wohnfläche geschaffen werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Bauteile möglichst schlank auszuführen, um die Nutzfläche eines Gebäudes auf ein Maximum zu erhöhen.

Neben dem Stillen des wachsenden Wohnbedarfs wird auf diese Weise auch die Wirtschaftlichkeit des Gebäudes bedient, da eine Optimierung der Nutzfläche gleichsam auch die vermietbare Fläche erhöht. Zusätzlich werden durch das Einsparen von Material die Herstellungskosten gesenkt.

Die optimale Bauplatzausnutzung und Grundrissgliederung beeinflussen die erzielbaren Nutzflächen ebenso wie die Bauteildicken der gewählten Bauweise. Im Folgenden werden daher die in dieser Arbeit entwickelten Bauteilaufbauten hinsichtlich ihrer Schlankheit miteinander verglichen und daraus Schlüsse auf potentielle Verluste und Gewinne in der Nutzfläche geschlossen.

### Außenwandsysteme





Das am weitesten verbreitete Außenwandsystem im Wiener Wohnbau stellt eine 20cm starke Stahlbetonwand mit Wärmedämmverbundsystem dar. Ziegelmauerwerk wird mit einer durchschnittlich 25cm starken Tragstruktur geringfügig dicker ausgeführt. Holzständerwände, die sich im Wiener Wohnbau erst langsam auch abseits von Dachgeschossausbauten wieder durchsetzen, weisen einen etwas komplexeren Aufbau auf, wodurch größere Schwankungsbreiten in der Bauteildicke auftreten können.

Auch im Lehmbau kann weniger auf standardisierte Ausführungsvarianten zurückgegriffen werden, wodurch hinsichtlich der Bauteildicke sehr große Unterschiede zwischen den einzelnen Außenwandsystemen entstehen.

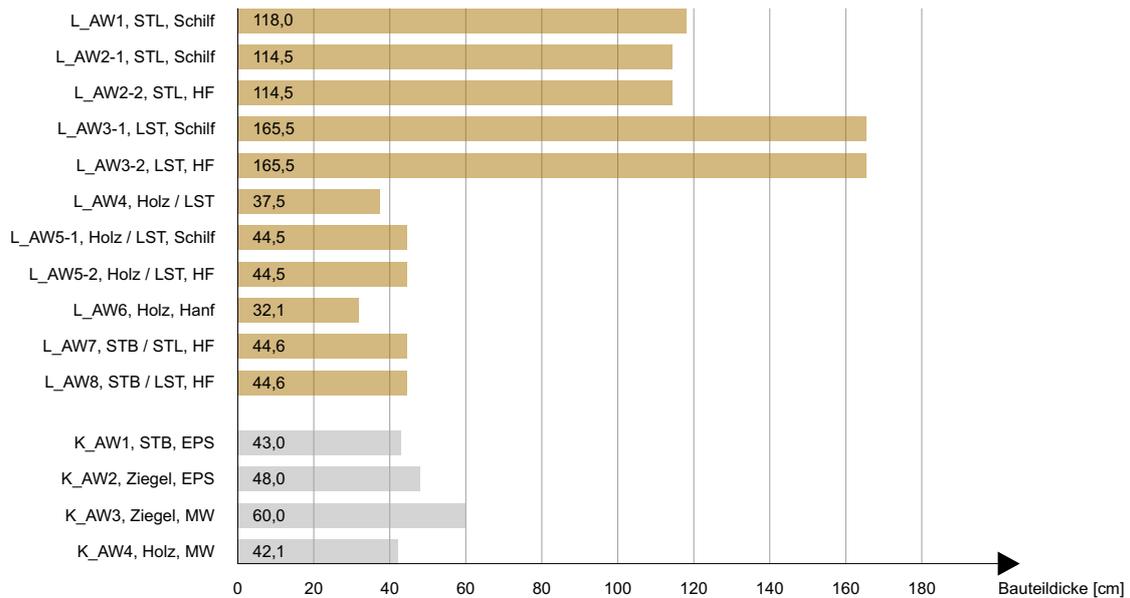


Abbildung 36: Bauteildicken der Außenwandsysteme

Eine Gegenüberstellung aller in dieser Arbeit behandelten Außenwandaufbauten verdeutlicht, wie sehr die Bauteilstärken der einzelnen Außenwände voneinander abweichen.

Insbesondere die tragenden Lehmwände L\_AW1 bis L\_AW3 erreichen hier unverhältnismäßig hohe Werte. Wie bereits an mehreren Stellen erwähnt, ist eine wirtschaftliche Herstellung dieser Bauteile kaum möglich, da die geforderten Schichtstärken von tragendem Lehm aufgrund seiner geringen Festigkeit in keinem Verhältnis zu üblichen Bauteildicken stehen. Der Arbeitsaufwand für die Herstellung derartig massiver Lehmschichten liegt zudem deutlich über jenem gängiger Bauweisen. Auch die für die Herstellung und besonders für die Trocknung dieser Bauteile benötigten Zeitspannen überschreiten die im Wohnbau aktuell übliche Dauer wesentlich. Im Hinblick auf die in [4.3.1 Bauzeiten und Kostenschätzung](#) festgestellten Preisunterschiede zwischen Stampflehm und Beton ist eine wirtschaftliche Umsetzung der tragenden Lehmbauteile auch aus diesem Grund kaum zu erreichen.

Im Gegensatz dazu erzielen die übrigen an dieser Stelle angeführten Lehm-Außenwände durchaus Bauteilstärken, die mit üblichen Konstruktionen vergleichbar sind. Dies kann durch eine tragende Struktur aus Stahlbeton- oder Holzstützen erreicht werden, deren Schichtstärke sich kaum von tragenden Konstruktionen aus massivem Stahlbeton oder Ziegel unterscheidet. Da die Wärmedämmung in diesen Bauteilen oft zu einem großen Teil in einer Ebene mit der Tragstruktur angeordnet werden kann, ist es teilweise sogar möglich, die aktuell üblichen Bauteildicken für Außenwände zu unterschreiten und dennoch die gesetzlich geforderten Anforderungen an den Wärmeschutz einzuhalten.

Eine Gegenüberstellung der klassischen Holzständer-Außenwand K\_AW4 und der Lehm-Holzwanne L\_AW4 bis L\_AW6 zeigt nur geringfügige Unterschiede in den Bauteilstärken. Während das Bauteil L\_AW5 eine 2,4cm stärkere Ausführung erfordert, erlauben die Bauteile L\_AW4 und L\_AW6 eine um 4,6-10cm schlankere Bauteildicke.

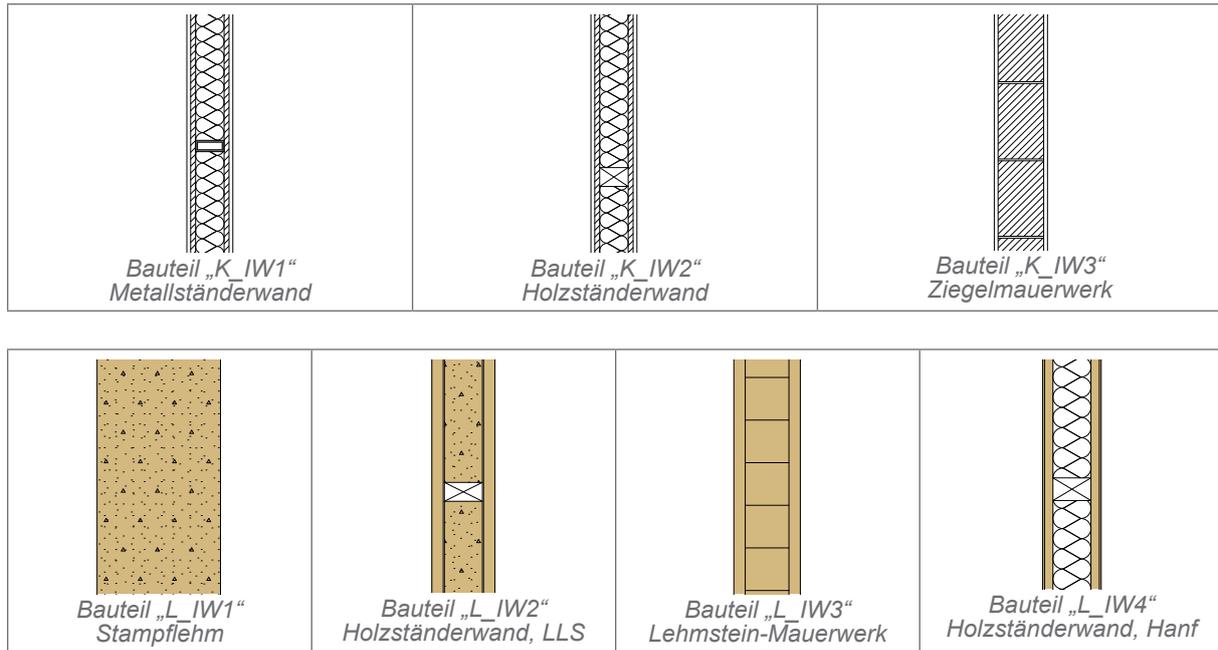
Durch den prinzipiell ähnlichen Aufbau dieser Außenwände, bei dem hauptsächlich ein Teil der konventionellen Wärmedämmung durch Lehmbaustoffe ersetzt wird, können die im Holzbau üblichen Bauteilstärken ohne Schwierigkeit eingehalten werden.

Bauteile aus Stahlbeton weisen mit 43cm allgemein ähnliche Bauteildicken auf wie konventionelle Holzständer- und Holz-Lehm-Außenwände, während die Ziegelmauerwerke K\_AW2 und K\_AW3 mit 48-60cm bereits deutlich massiver ausgeführt werden.

Die Stahlbeton-Lehm-Bauteile L\_AW7 und L\_AW8 liegen mit 44,6cm in etwa im Bereich der konventionellen Stahlbetonwand. Die um 1,6cm stärkere Ausführung ist hier auf das innenliegende Trockenputzsystem aus Lehmbauplatte und Lehmputz zurückzuführen. Der somit entstehende Verlust an Nutzfläche ist dennoch sehr gering und entsprechend vernachlässigbar.

Mit Ausnahme der tragenden Lehm-Außenwände liegen die Bauteilstärken der gezeigten Lehmbauteile somit in ähnlichen Bereichen wie jene konventioneller Bauweisen. Einige der Holz-Lehm-Wandsysteme ermöglichen sogar eine schlankere Ausführung der Bauteile, wodurch zusätzliche Fläche gewonnen werden kann.

## Innenwandsysteme: Scheidewände



Im Innenausbau haben sich im Bereich nicht tragender Innenwände in Wien vornehmlich Bauteile in Trockenbauweise etabliert. Diese bestehen meist aus einer Metall- oder Holzständerkonstruktion, die mit Platten beplankt wird und Bauteilstärken von 10-15cm erreicht.

Auch die diesen gegenübergestellten Lehmbauteile werden größtenteils als Holzständerwände ausgeführt, die aber mit Lehmbaumaterialien ausgefacht und beplankt werden.

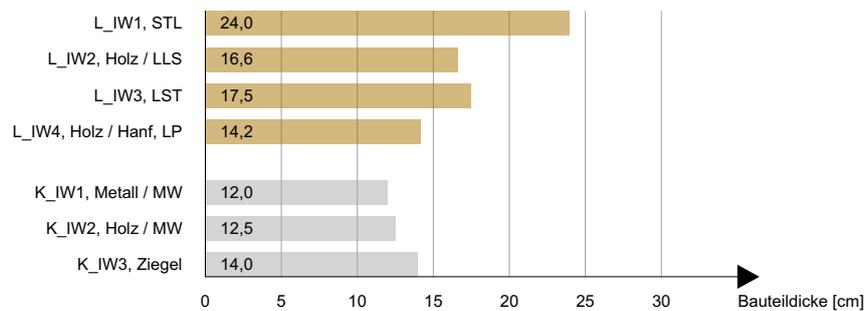


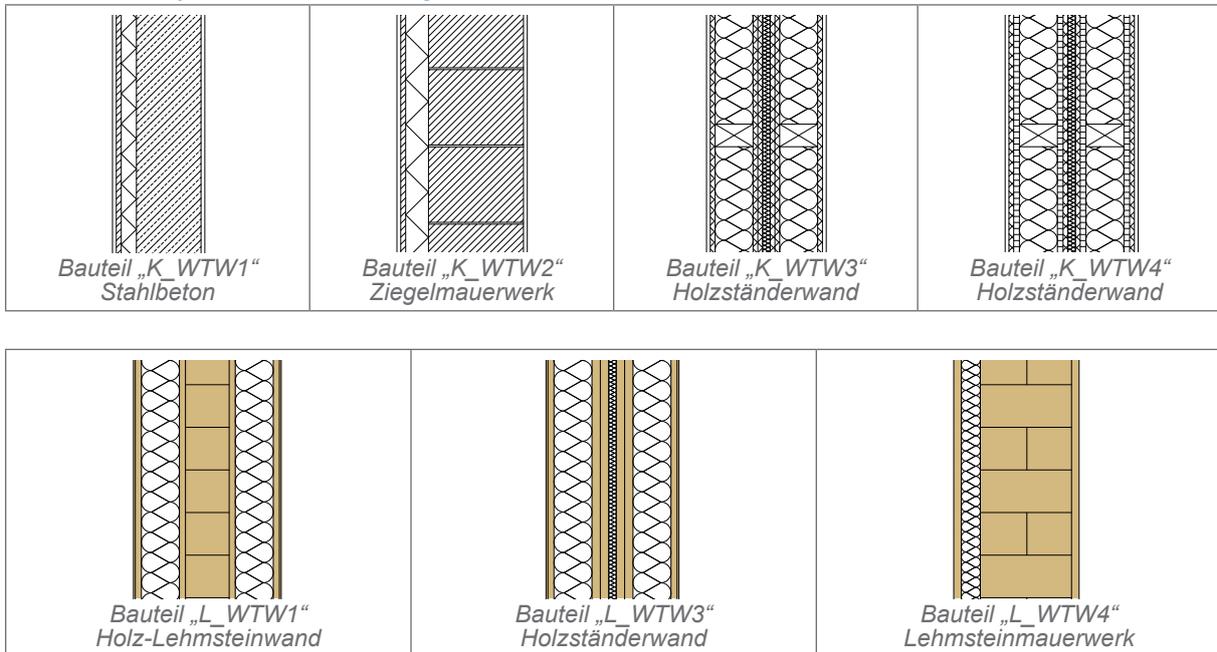
Abbildung 37: Bauteildicken der Scheidewände

Wie die obenstehende Grafik zeigt, erzielen die konventionellen Scheidewände Bauteildicken von 12-14cm. Das Bauteil L\_IW4, das aus einer Holzständerwand mit beidseitigem Lehm-Trockenputzsystem besteht, erreicht mit 14,2cm Bauteilstärke einen ähnlichen Wert. Die beiden Holz-Lehm-Bauteile L\_IW2 und L\_IW3 benötigen in ihrer Ausführung mit 16,6cm bzw. 17,5cm hingegen etwas mehr Fläche. Im Fall des Aufbaus L\_IW2 ist dieser zusätzliche Bedarf speziell auf den Lehmputz zurückzuführen, dessen Ausführung etwas dicker erfolgen muss als bei konventionellen Putzsystemen. Die höhere Bauteildicke der Innenwand L\_IW3 resultiert zusätzlich aus den üblichen Lehmsteinformaten, deren Breite in der Regel 11,5cm aufweist. Durch die Adaptierung dieser Bauteile mit einem Trockenputzsystem anstelle des feuchten Lehmputzes wäre allerdings eine um 2cm schlankere Ausführung möglich.

Einen deutlich erhöhten Flächenbedarf im Vergleich zu sämtlichen anderen Scheidewänden weist die Stampflehmwand L\_IW1 auf. Die Bemessung dieses Bauteils erfolgt anhand der für Stampflehm vorgegebenen Bauteilstärken durch den *Dachverband Lehm*, der hier eine Mindestwandstärke von 24cm vorschreibt.<sup>201</sup> Für diesen Wandaufbau muss somit zugunsten von ökologischen und raumklimatischen Aspekten mit einem durchschnittlichen Raumverlust von 10cm pro Wand gerechnet werden.

Insgesamt wird dennoch deutlich, dass die meisten Innenwandsysteme aus Lehm ähnliche Ausführungen erlauben wie konventionelle Innenwandaufbauten und nur ein geringes Maß an Nutzfläche eingebüßt wird. Unter dem Aspekt des nachhaltigen Bauens und in Zusammenhang mit der positiven Wirkung von Lehmbauteilen auf das Raumklima erscheint der geringe Flächenverlust als wirtschaftlich vertretbar.

### Innenwandsysteme: Wohnungstrennwände



Wohnungstrennwände werden wie Scheidewände oft in Trockenbauweise ausgeführt, wobei aufgrund erhöhter Anforderungen an den Schall-, Wärme- und Brandschutz größere Bauteildicken entstehen als für Wände innerhalb einer Wohneinheit.

Tragende Wohnungstrennwände können dabei ebenfalls in Form von Holzständerwänden ausgeführt werden, im Massivbau sind hier aber vor allem auch schlanke Stahlbeton- und Ziegelbauteile möglich.

Diesen Bauteilen stehen im Lehm-bau oft ebenfalls Ausführungen aus tragender Holzstruktur und ausfachenden Lehm-baustoffen gegenüber. Als massive Wände eignen sich im Lehm-Geschossbau hingegen vor allem Lehmsteinwände, deren Ausführung weniger arbeits-, zeit- und lärmintensiv ist als dies bei Stampflehmwänden der Fall wäre.

201 vgl. DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.50

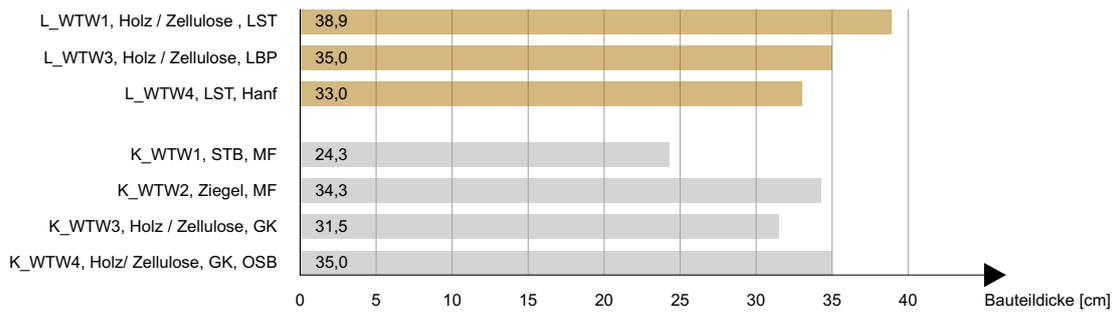


Abbildung 38: Bauteildicken der Wohnungstrennwände

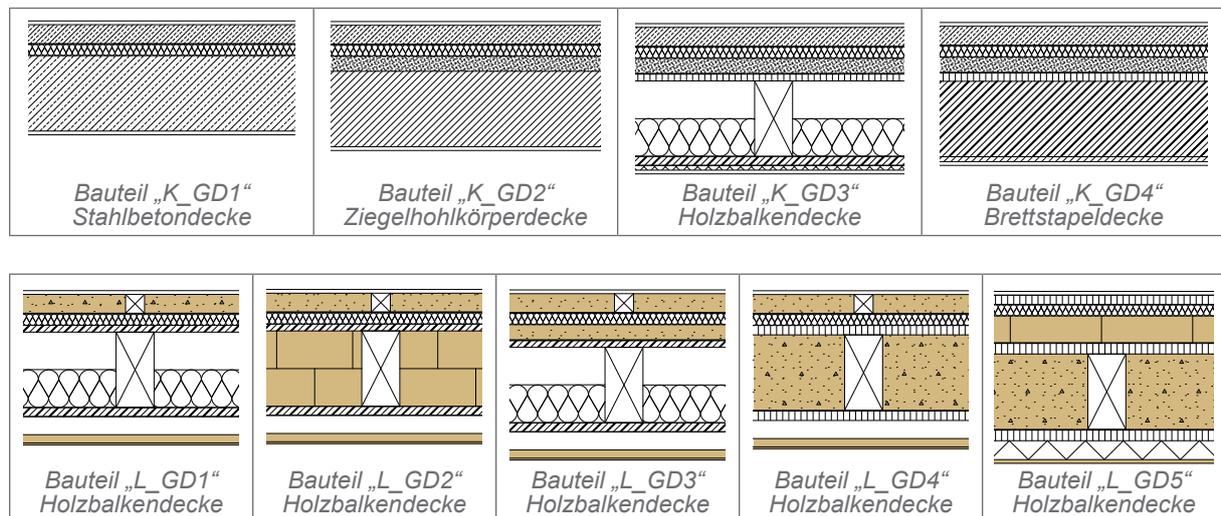
Die konventionellen Wohnungstrennwände erreichen Bauteildicken von 24,3 bis 35cm, während die Lehmwände 33 bis 38,9cm stark ausgeführt sind.

Ein Vergleich der Lehmsteinwand L\_WTW4 mit der massiven Ziegelwand K\_WTW2 zeigt eine geringfügig schlankere Ausführung des Lehmbauteils um 1,3cm. Ein ähnlich dünner Bauteilaufbau wie jener der Stahlbetonwand K\_WTW1 kann aber aufgrund der zuvor bereits beschriebenen Mindestdicken von Lehmwänden nicht erreicht werden.

Im Bereich der konventionellen und mit Lehm ausgefachten Holzständerwände können hingegen sehr ähnliche Bauteildicken erzielt werden. Die geringfügig höhere Bauteilstärke der Innenwand L\_WTW1 ist dabei auf die verfügbaren Lehmsteinformate zurückzuführen, die zu einer Erhöhung der Gesamtdicke um ca. 4cm führt.

Insgesamt kann auch für die Wohnungstrennwände nachgewiesen werden, dass die Ausführung dieser Bauteilkategorie in Lehm- oder Lehm-Holz-Bauweise nicht automatisch zu einer erhöhten Bauteildicke führt.

## Geschossdecken



Während derzeitige Bauweisen in Wien vorrangig Geschossdecken in Stahlbeton, etwas seltener auch in Ziegel- oder Holz Ausführung aufweisen, bestehen Lehmdecken in den meisten Fällen aus tragenden Holzbalken, die mit Lehmbaustoffen ausgefacht, umwickelt oder beschwert werden.

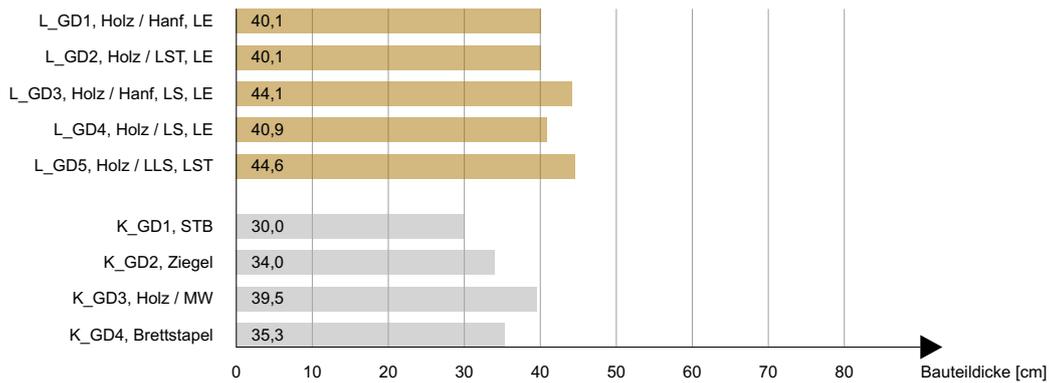


Abbildung 39: Bauteildicken der Geschossdecken

Eine erste Gegenüberstellung der konventionellen Geschossdecken mit den in dieser Arbeit gezeigten Lehmdecken erweckt den Eindruck, dass die Ausführung von Decken aus Holz und Lehm mit einem Raumhöhenverlust von bis zu 15cm einhergeht.

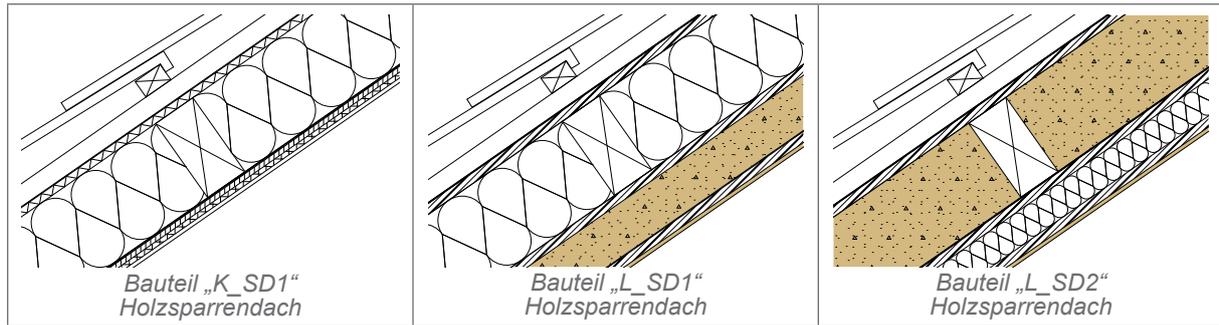
Die hauptsächliche Ursache für diese Schlussfolgerung besteht jedoch lediglich in der in den Lehmdecken geplanten Installationsebene, die in den konventionellen Geschossdecken nicht aufscheint und eine Erhöhung der Bauteilstärke um ca. 5cm verursacht. Die Sinnhaftigkeit einer abgehängten Decke ist von Projekt zu Projekt unterschiedlich, das Ausführen dieser Installationsebene somit optional. Entfällt diese Bauteilschicht, erzielen die Holz-Lehm-Decken Bauteilstärken von etwa 35-40cm und nähern sich somit in ihrer Bauteildicke an die konventionellen Deckenausführungen an.

Besonders der Vergleich zwischen den Lehmbauteilen und der konventionellen Holzbalkendecke K\_GD3 zeigt, dass die Bauteilhöhe bei Entfall der Installationsebene jener der klassischen Holzdecke entspricht oder diese sogar auf das Maß der Brettstapeldecke K\_GD4 reduziert werden kann. Insbesondere die Deckenaufbauten L\_GD1, L\_GD2 und L\_GD4 erreichen ohne Installationsebene nahezu dieselben Bauteilabmessungen wie konventionelle Brettstapel- und Ziegelhohlkörperdecken.

Eine genauere Betrachtung der besonders schlanken Stahlbetondecke K\_GD1 zeigt zudem, dass dieses Bauteil ohne Schüttung oder zusätzliche Wärmedämmung ausgeführt wird – die Reduktion der Bauteilhöhe um 5cm im Vergleich zur Ziegelhohlkörperdecke sowie den genannten Holz-Lehm-Decken ist somit auf den Entfall dieser Bauteilschichten zurückzuführen.

Es kann angenommen werden, dass je nach tatsächlicher Bauaufgabe und Rahmenbedingungen Decken aus Lehm in sehr ähnlichen Bauteilhöhen umsetzbar sind wie vergleichbare, aktuell eingesetzte Konstruktionen. Die auf den ersten Blick größeren Bauteilhöhen der Holz-Lehm-Decken können bei Entfall der Installationsebene im Wesentlichen auf die Abmessungen herkömmlicher Deckensysteme reduziert werden.

## Dachaufbauten: Steildächer



Im Bereich der Steildächer werden dem konventionellen Holzsparrendach mit Mineralwolle-Gefachdämmung zwei Ausführungen mit leichter bzw. schwerer Lehmschüttung gegenübergestellt.

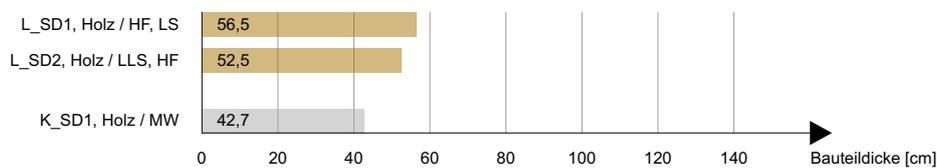


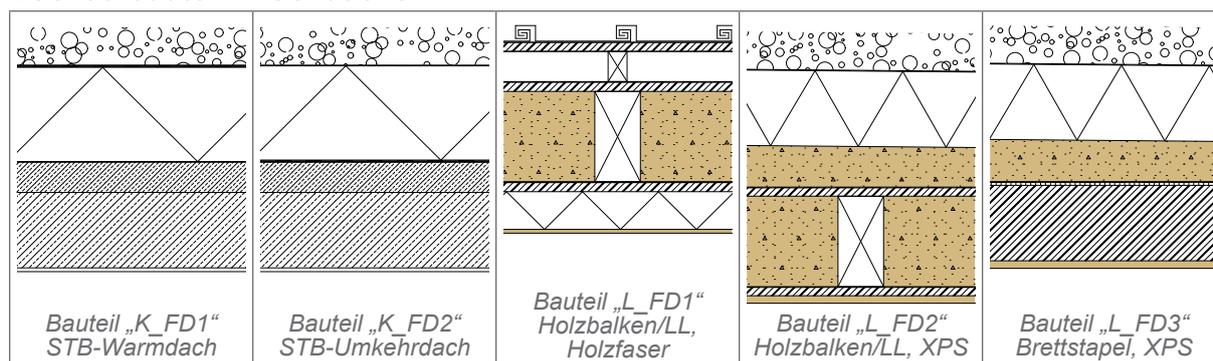
Abbildung 40: Bauteildicken der Steildächer

Mit 52,5cm bzw. 56,5cm weisen die beiden Holz-Lehm-Dächer etwas höhere Bauteilabmessungen auf als das konventionelle Holzsparrendach, dessen Bauteildicke mit 42,7cm bemessen ist.

Im Fall des Bauteils L\_SD1 ist die Erhöhung der Bauteilmaße auf die innenseitig angeordnete Lehmschüttung zurückzuführen, die hauptsächlich dem Wärmespeichervermögen des Bauteils dient. In der Dachvariante L\_SD2 wird die Lehmschüttung stattdessen in der Ebene der Dachbalken angeordnet, wodurch im Vergleich zur Ausführung L\_SD1 ein um 4cm schlanker Aufbau ermöglicht wird. Wenngleich diese Leichtlehmschüttung bereits teilweise als Wärmedämmung eingesetzt werden kann, muss dennoch eine zusätzliche Wärmedämmebene angeordnet werden. Dadurch erhöht sich die Bauteilabmessung im Vergleich zum konventionellen Steildach K\_SD1 um knapp 10cm.

Diesem Raumhöhenverlust stehen allerdings bauphysikalische Vorteile wie ein verbesserter Schutz vor sommerlicher Überhitzung und ein günstigeres Wärmespeichervermögen gegenüber. Zusätzlich verbessert sich die Feuchteregulierung im Innenraum durch Anordnung einer Lehmschüttung im Vergleich zu konventionellen Bauweisen deutlich. Auch hier gilt es somit im Einzelfall abzuwägen, ob eine Erhöhung der Bauteildicke zugunsten raumklimatischer und ökologischer Kriterien wirtschaftlich gerechtfertigt werden kann.

## Dachaufbauten: Flachdächer



Im Bereich der Flachdächer werden in Wien aktuell insbesondere Aufbauten aus Stahlbeton in Kombination mit EPS- oder XPS-Dämmplatten ausgeführt, die eine durchschnittliche Bauteilhöhe von 64cm erreichen. Mit 47,6cm bis 72,3cm stehen diesen sowohl deutlich schlankere als auch etwas stärker ausgeführte Lehmdächer gegenüber.

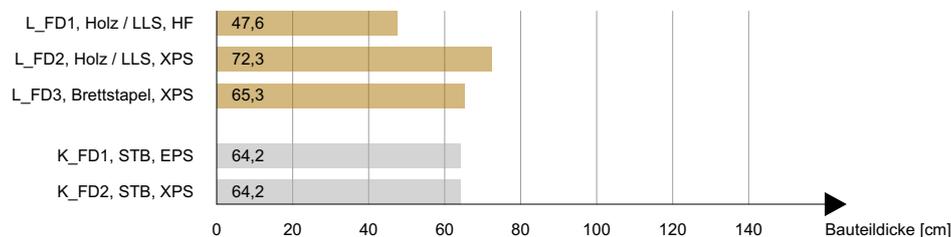


Abbildung 41: Bauteildicken der Flachdächer

Der Bauteilaufbau L\_FD3 weist hinsichtlich der gewählten Schichtstärken und -reihenfolge die größte Ähnlichkeit zu klassischen Stahlbetondächern auf und unterscheidet sich vor allem durch die gewählten Materialien von diesen. Mit 65,3cm Bauteilhöhe liegt dieser Aufbau sehr nahe an den Bauteilabmessungen konventioneller Flachdächer, wodurch ein Verlust an Raumhöhe minimiert werden kann.

Der Dachaufbau L\_FD1 weist in seinem Aufbau größere Unterschiede zu klassischen Stahlbetondächern auf. Durch die Verfüllung der Dachbalkenebene mit Leichtlehm kann in diesem Aufbau ein hohes Maß an konventionellem Wärmedämmstoff eingespart werden. Die Schichtstärke der eigentlichen Dämmebene verringert sich dadurch von durchschnittlich 25cm auf 10cm, wodurch der Dachaufbau deutlich schlanker ausgeführt werden kann.

Im Gegensatz dazu erzielt der Flachdachaufbau L\_FD2 mit 72,3cm Bauteildicke eine Erhöhung der Bauteilabmessungen um etwa 9cm und stellt von allen gezeigten Flachdachausführungen den höchsten Aufbau dar. Dieser resultiert einerseits aus der um 4cm größeren Ausführung der Gefälleebene und andererseits aus den hier notwendigen Schalungen, die eine weitere Erhöhung der Bauteilabmessungen um 4,8cm verursachen.

Wie auch in den vorangegangenen Vergleichen wird jedoch an dieser Stelle betont, dass sich die Wirtschaftlichkeit eines Bauteils nicht nur aus einem Faktor berechnet. Wenngleich der Dachaufbau L\_FD2 deutlich höhere Bauteilabmessungen aufweist, verbessern die in diesem eingesetzten Lehmbaustoffe unter anderem das Raumklima sowie das Verhalten gegenüber Wärme. Eine somit gewährleistete Verbesserung des Nutzerkomforts kann durchaus in der späteren Vermarktung eines Gebäudes relevant werden und den wirtschaftlichen Nachteil der verlorenen Raumhöhe ausgleichen.

Die Analyse der benötigten Bauteilstärken der in dieser Arbeit besprochenen Bauteilaufbauten zeigt, dass Bauteile aus Lehm nicht stets in unwirtschaftlichen Abmessungen hergestellt werden müssen. Eine durchdachte Kombination von Lehm mit anderen Baustoffen, die beispielsweise die tragende Funktion übernehmen, erlaubt in den meisten Fällen eine Einhaltung üblicher Bauteilstärken. Der stellenweise Verlust von Nutzfläche oder Raumhöhe ist meist auf wenige Zentimeter begrenzt und kann durch die ökologischen und raumklimatischen Vorteile von Lehmbaustoffen in der Regel durchaus aufgewogen werden.

### 4.3.3 Notwendiges Vorwissen und Schulungen

Das Bauen mit Stahlbeton, Ziegel und Holz ist weitreichend bekannt, ein Einschulen der Arbeiter und die Präsenz von spezialisiertem Fachpersonal ist heute in der Regel nur punktuell notwendig.

Das Arbeiten mit Lehmbaustoffen ist hingegen im städtischen Wohnbau aktuell kaum üblich und beschränkt sich maximal auf die Ausführung von Lehminnenputz. Um Lehmmischungen vor Ort herzustellen und korrekt zu verarbeiten, wird indessen viel Erfahrung und Sorgfalt benötigt. Unter der Anleitung entsprechender Fachplaner ist das Bauen mit Lehm allerdings leicht zu erlernen,<sup>202</sup> Fehler können oft gut ausgebessert werden, da das Material nur physikalisch erhärtet und unter Wasserzugabe wieder plastifizierbar wird. Dadurch stellen auch längere Verarbeitungszeiten keine Schwierigkeit dar, in Maschinen angetrockneter Lehm kann einfach aus diesen ausgespült oder entfernt werden.

Im Hinblick auf die meist straffen Zeitpläne und engen Kostenkalkulationen kann das Erlernen einer neuen Bautechnik trotz des prinzipiell überschaubaren zusätzlichen Lernaufwandes für Planer und Bauträger ein Problem darstellen. Zudem fallen durch die Beauftragung geeigneter Facharbeiter und den hinzukommenden Zeitaufwand weitere Kosten an. In Kombination mit den zusätzlich einzuberechnenden Bauzeiten und -kosten für das Mischen von Lehmbaustoffen vor Ort sowie der Verarbeitung zu Bauteilen und der langen Trocknungszeiten erscheint die Umsetzung dieser Bauweise nach rein wirtschaftlichen Aspekten zukünftig jedenfalls nach wie vor unwahrscheinlich. Im Gegensatz dazu verringert sich durch den Einsatz von vorgefertigten Lehmprodukten nicht nur der Arbeits- und Zeitaufwand, auch das Einschulen der Arbeiter kann teilweise entfallen. Viele Lehmbaustoffe werden ähnlich wie konventionelle Produkte verarbeitet, zudem bieten Produktinformationen und durch den Hersteller kommunizierte Verarbeitungsregeln eine gute Hilfestellung. So erfolgt das Erstellen von Mauerwerk aus Lehmsteinen beispielsweise nach denselben Regeln, die auch für Ziegelmauerwerk gelten. Lehmörtel wird im Wesentlichen ebenfalls nach herkömmlichen Methoden aufgetragen, die Unterschiede in der benötigten Schichtstärke des Mörtels und der möglichen Bauteilhöhe pro Tag sind rasch kommuniziert.

Der Einsatz vorgefertigter Lehmbaustoffe und -bauteile vermindert nicht nur die Bauzeiten und entsprechenden Lohnkosten, er reduziert auch den Aufwand in der Mitarbeitereinschulung deutlich. Durch die Verwendung von trockenen Lehmprodukten wird eine Verarbeitung mit allseits bekannten Methoden und Geräten möglich, wodurch sich der Aufwand in der Bauteilherstellung nahezu auf das Maß konventioneller Bauweisen reduzieren lässt. Zeitintensive Einschulungen und eine mehrfache Herstellung von Probemischungen entfallen.

202 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.198

#### 4.3.4 Komplexität und Fehleranfälligkeit der Bauteile

Die Ausführung von Bauteilen aus Lehm beschränkt sich im Bausektor aktuell vor allem auf den Einfamilienhausbau, größere Projekte wie das Ricola Kräuterzentrum in Laufen<sup>203</sup> stellen in Europa nach wie vor Ausnahmen dar.

Obwohl sich seit einigen Jahren vermehrt Firmen auf die Lehmbauweise spezialisieren, liegt die Zahl an entsprechenden Anbietern immer noch deutlich unter der jener, die z.B. Bauweisen aus Stahlbeton oder Ziegel umsetzen. Gleichmaßen werden Lehmprodukte nur von wenigen Herstellern angeboten, auch wenn hier ein Wachstum festzustellen ist.

Aufgrund des derzeit noch eher überschaubaren Rahmens an Herstellern, Fachplanern und Baufirmen, die mit dem Lehmbau vertraut sind, stellt die Frage nach der Komplexität der Lehmbaufgabe einen wichtigen Faktor dar, der über die Etablierung dieser Bauweise im städtischen Raum entscheiden kann.

Je stärker sich die Verarbeitung der Lehmbaustoffe an herkömmlichen Methoden orientiert, umso leichter ist deren Einsatz für Planer und ausführendes Personal. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, unterscheiden sich viele Lehmbaustoffe in ihrer Handhabung nur geringfügig von konventionellen Produkten.

Viele Hersteller stellen zudem in den jeweiligen Produktdatenblättern genaue Anweisungen zur Verfügung, wie die Baustoffe zu verarbeiten und montieren sind. Die Verarbeitung von Lehmplatten erfolgt dabei beispielsweise nach den üblichen im Trockenbau gültigen Regeln. So werden die Platten mit entsprechenden Tellerkopfschrauben an einer Unterkonstruktion befestigt und mit herkömmlichen Sägen oder Cuttermessern zugeschnitten. Auch können Installationen wie hinter Gipskartonplatten geführt werden.<sup>204</sup>

Durch die Orientierung in der Produktion vorgefertigter Lehmprodukte an heute üblichen Baustoffen und Konstruktionen findet sich zu einem großen Teil konventioneller Bauprodukte ein vergleichbarer Lehmbaustoff, der in ähnlicher Weise eingesetzt und verarbeitet werden kann. Die Handhabung von vorgefertigten Lehmbaustoffen erschwert die meisten Bauaufgaben somit kaum.

Neben der Verarbeitung der Baustoffe selbst beeinflusst auch die Komplexität der daraus erstellten Bauteile, ob die Lehmbauweise in größeren Bauprojekten Anwendung finden kann.

Nachdem sich die Ausführung tragender Lehmbauteile, wie bereits mehrfach angeführt, als unwirtschaftlich darstellt, erscheint das Bauen mit Lehm im mehrgeschossigen Wohnbau speziell in Form einer Mischbauweise als sinnvoll – beispielsweise als Kombination tragender Holz- oder Stahlbetonelemente und ausfachender, raumabschließender Lehmbaustoffe.

Eine Anlehnung des Lehmbaus im urbanen Raum an den Holzbau erscheint dabei als besonders günstige Ausführungsform, da Lehm und Holz gut zusammenarbeiten und einfach miteinander verbunden werden können. Das Bauen mit Holz ist allseits bekannt – für die verschiedenen Bauteile besteht eine ausreichende Zahl standardisierter Ausführungsvarianten, Leistungsbeschreibungen und Fachplaner. Die Umsetzung erfolgt zudem anhand allgemein anerkannter Regeln der Technik. Der Aufbau auf diesem bereits vorhandenen Wissen erleichtert das Einarbeiten von Lehmbaustoffen in diese Bauweise. Auch die in dieser Arbeit entwickelten Bauteilaufbauten orientieren sich oftmals an klassischen Holzbauteilen.

203 vgl. o.A. *Ricola Kräuterzentrum*

204 vgl. LEVITA LEHM 2018

K_AW4		L_AW5	
Material	d [m]	Material	d [m]
Silikatputz o. Kh.	0,010	Kalkputz	0,025
HWL-Platte	0,050	Schilfdämmplatte od. Holzfaserdämmplatte	0,035
Mineralwolle zwischen TW Fichtenholz	0,240	Schilfdämmplatte od. Holzfaserdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240
OSB-Platte	0,018	Lehmstein schwer	0,115
Mineralwolle zw. Lattung	0,080	Lehmputz	0,030
Gipskartonplatte	0,0125	<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>
Kalk-Gips-Putz	0,010		
<b>Gesamt</b>	<b>0,421</b>		

Bauteilliste 40: Gegenüberstellung zweier Außenwandsysteme

Ein beispielhafter Vergleich einer konventionellen Holzständer-Außenwand mit einer Ausführungsvariante aus Holz und Lehm zeigt, dass viele Arbeitsschritte in beiden Bauweisen ähnlich durchgeführt werden können.

Sowohl für das Bauteil K\_AW4 als auch den Aufbau L\_AW5 wird ein Tragskelett aus Holzquerschnitten erstellt und mit einer Gefachdämmung verfüllt. Der äußere Bauteilabschluss erfolgt in beiden Fällen durch eine Beplankung mit einem harten Dämmstoff – dabei ist in beiden Außenwänden sowohl die Anwendung der in K\_AW4 gezeigten Holzwolle-Leichtbauplatte als auch der in L\_AW5 eingesetzten harten Holzfaserplatte denkbar.

Die beiden Außenwandsysteme unterscheiden sich lediglich in der Ausführung des inneren Bauteilabschlusses. Während dieser in der Variante K\_AW4 durch eine Beplankung mit Gipskartonplatten und einer dahinterliegenden, zusätzlichen Dämmebene erstellt wird, erfolgt der innere Raumabschluss im Bauteil L\_AW5 durch eine gemauerte Lehmsteinwand.

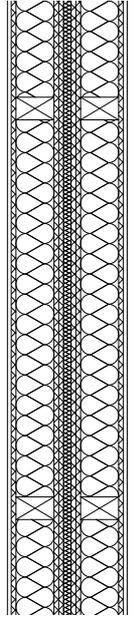
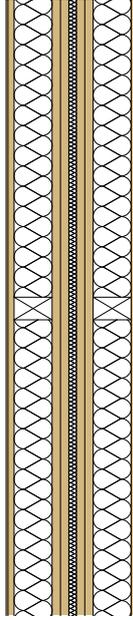
Die im Holzbau stets notwendige winddichte Ebene bildet im konventionellen Bauteil K\_AW4 eine OSB-Platte, die zwischen der Tragstruktur und der raumseitigen Dämmebene liegt. Die einzelnen Platten werden dabei in der Regel an den Fugenstößen mit entsprechenden Fugenbändern verklebt, um eine vollflächige Winddichtigkeit zu gewährleisten. Diese sind jedoch in ihrer Ausführung oft fehleranfällig und führen bei unsachgemäßer Handhabung häufig zu Leckagen. Die Lebensdauer und längerfristige Funktionsfähigkeit entsprechender Kunststoffbänder ist zudem im Bauwesen sehr umstritten. Ein nachträglicher Austausch defekter oder unsachgemäß aufgebrachtener Klebebänder erfordert außerdem einen hohen Zeitaufwand in der Suche nach der schadhafte Stelle sowie einen hohen Arbeitsaufwand bei der Freilegung der entsprechenden Bauteilschicht.

Die Herstellung der Winddichtigkeit wird im Gegensatz dazu im Lehmbauteil L\_AW5 durch den Lehminnenputz erzeugt. Dieser ist hinsichtlich entstehender Undichtigkeiten weniger fehleranfällig und kann zudem mit wesentlich geringerem Aufwand korrigiert werden. Lehmbaumstoffe gelten dabei ab einer Dichte von ca. 900kg/m<sup>3</sup> als winddicht, sofern sie vollflächig auf der darunterliegenden Konstruktion aufgebracht werden.<sup>205</sup> Die Funktionsfähigkeit dieser winddichten Ebene zeigt sich auch in der Vielzahl historischer Fachwerkhäuser aus Holzfachwerk, Lehmausfachung und innenliegendem Lehmputz.<sup>206</sup>

<sup>205</sup> vgl. VOLHARD 1983/2013, S.162

<sup>206</sup> vgl. ebenda, S.164

Die Anwendung von Lehmbaustoffen im Bereich hölzerner Außenwände kann die Ausführung solcher Bauteile somit sogar vereinfachen, da eine der häufigsten Fehlerquellen ohne allzu komplexe Maßnahmen beseitigt wird. Auch die Ausführung anderer Bauteilschichten aus Lehm erscheint in diesem Vergleich unproblematisch, da auch für sie keine übermäßig komplexen Ausführungsschritte oder spezialisiertes Wissen notwendig sind.

	<i>K_WTW3</i>			<i>L_WTW3</i>	
	Material	d [m]		Material	d [m]
	Kalk-Gips-Putz	0,010		Lehmputz	0,005
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehmplatte TP	0,016
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100		Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehm-Ausbauplatte	0,022
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehm-Ausbauplatte	0,022
	Mineralwolle	0,020		Glaswolle Akustikplatte	0,020
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehm-Ausbauplatte	0,022
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehm-Ausbauplatte	0,022
	Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100		Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100
	Gipskartonplatte	0,0125		Lehmplatte TP	0,016
	Kalk-Gips-Putz	0,010		Lehmputz	0,005
	<b>Gesamt</b>	<b>0,315</b>		<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>

Bauteilliste 41: Gegenüberstellung zweier Wohnungstrennwände

Auch eine Gegenüberstellung zweier Wohnungstrennwandsysteme aus dem konventionellen Holzbau und der Holz-Lehm-Mischbauweise zeigt, dass sich die Herstellung der Bauteile kaum unterscheidet.

Die in K\_WTW3 eingesetzten Gipskartonplatten zur Beplankung der Konstruktion werden im Aufbau L\_WTW3 durch vorgefertigte Lehm-Ausbauplatten ersetzt. Wie zuvor aufgezeigt, unterscheidet sich deren Verarbeitung nicht von der Montage konventioneller Trockenbauplatten. Somit liegen Zeitaufwand, notwendiges Material und Personal im gleichen Rahmen wie im Bereich bekannter Bauweisen.

Ein dritter, beispielhafter Vergleich einer konventionellen Holzbalkendecke und einer Ausführung mit Lehmbaustoffen zeigt ebenfalls, dass die Herstellung von Holz-Lehm-Bauteilen nur geringfügige Unterschiede zur herkömmlichen Holzbauweise aufweist. Die tragende Struktur wird in beiden Fällen von Fichtenholzbalken erzeugt, deren Zwischenräume mit Dämmstoff gefüllt werden.

K_GD3		L_GD3	
Material	d [m]	Material	d [m]
Parkettboden	0,010	Parkettboden	0,010
Zementestrich	0,050	Polsterholz zwischen Lehmestrich	0,050
Trennlage Kunststoff	0,0001	Rieselschutzpapier	0,0001
Mineralwolle TSD	0,030	TSD Holzfaserplatte	0,030
Schüttung lose	0,040	Lehmschüttung	0,040
Rieselschutzpapier	0,0001	Rieselschutzpapier	0,0001
OSB-Platte	0,018	Vollschalung Fichte	0,018
Mineralwolle zwischen TW Fichtenholz	0,100	Hanfdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,100
Vollschalung Fichte	0,200	Vollschalung Fichte	0,200
Gipskartonplatte	0,024	Lattung Fichte	0,024
Kalk-Gips-Putz	0,0125	Lehmplatte TP	0,016
<b>Gesamt</b>	<b>0,395</b>	Lehmputz	0,005
		<b>Gesamt</b>	<b>0,441</b>

Bauteilliste 42: Gegenüberstellung zweier Geschossdecken

Die Deckenuntersicht bildet im Fall der Decke K\_GD3 eine verputzte Gipskartonplatte, die an einer Schalung befestigt ist. Die Holz-Lehm-Decke L\_GD3 wird an der Deckenunterseite ebenfalls mit Plattenwerkstoffen beplankt, die zusätzlich angedachte Installationsebene ist dabei optional und im konventionellen Holzbau in der gleichen Ausführungsart denkbar.

Die Schichtreihenfolge des Fußbodenaufbaus wird in beiden Decken gleich ausgeführt, die Materialien weichen hier jedoch stärker voneinander ab. Auch hier werden im Wesentlichen aber ähnliche Arbeitsschritte verrichtet. Einzig im Bereich des Estrichs können etwas größere Unterschiede in der Herstellung festgestellt werden, da Lehmestrich ähnlich einer Schüttung eingebracht, anschließend aber schichtweise verdichtet wird. Herkömmlicher Zementestrich wird hingegen auf den vorbereiteten Untergrund aufgebracht, abgezogen und geglättet – das Verdichten entfällt. Während die vollständige Trocknungsdauer von Zementestrich bei durchschnittlich 28 Tagen<sup>207</sup> liegt, muss für einen mehrere Zentimeter dicken Lehmestrich mit etwas längeren Trocknungszeiten gerechnet werden.

Andere, in dieser Arbeit angeführte Holz-Lehm-Decken unterscheiden sich in ihrer Herstellung und Bauteilkomplexität ebenfalls nur geringfügig von dem zuvor besprochenen Beispiel. Die Geschossdecke L\_GD1 entspricht abgesehen vom Entfall der Lehmschüttung in ihrem Aufbau nahezu exakt dem Bauteil L\_GD3.

In den Deckensystemen L\_GD2 und L\_GD4 wird zudem die Gefachdämmung durch weitere Lehmbaumstoffe ersetzt. Die in Variante L\_GD2 eingesetzten Lehmsteine

207 Zementestrich ist in der Regel bereits nach wenigen Tagen begehbar. Die angegebene Trocknungsdauer bezieht sich auf jenen Zeitpunkt, ab dem weitere Bauteilschichten auf den Estrich aufgebracht werden können.

werden dabei lose auf einem Rieselschutz in den Balkenzwischenraum geschichtet. Der Zeitaufwand liegt voraussichtlich nur geringfügig über der Einbringdauer einer Gefachdämmung. Die in L\_GD4 angenommene Lehmschüttung wird einfach in den Hohlraum gefüllt und geglättet. Anders als in den anderen Deckensystemen kann es hier jedoch gegebenenfalls zu zusätzlichen Trocknungszeiten kommen.

Durch die vorangegangenen Gegenüberstellungen wird deutlich, dass sich das Bauen mit Holz und Lehm nur punktuell von herkömmlichen Holzbau-Konstruktionen unterscheidet. Die Schichtreihenfolge und Bauteilherstellung erfolgen im Wesentlichen nach denselben Prinzipien, das Bauen mit Lehm stellt somit nur einen geringfügigen Mehraufwand dar.

Wenngleich Holz und Lehm eine sinnvolle Baustoffkombination darstellen und gut miteinander harmonieren, kann diese Mischbauweise nicht in allen Wohnbauten im urbanen Raum gleichermaßen umgesetzt werden.

Der Einsatz von tragenden Lehmbauteilen ist nach Vorgabe des *Dachverband Lehm* – wie bereits in [3.2.1 Lehm als Tragstruktur](#) im Detail beschrieben – nur für maximal zwei Geschosse und Gebäude mit nicht mehr als zwei Wohneinheiten zulässig. Ebenso ist auch die Ausführung tragender Holzstrukturen nach aktueller Rechtslage in Österreich nur bis zur Gebäudeklasse 4 ohne zusätzliche Nachweise erlaubt.<sup>208</sup> Die Gebäudeklasse 5 sieht gemäß OIB-Richtlinie 2 für einige tragende bzw. brandabschnittsbildende Bauteile einen Feuerwiderstand von 90 Minuten sowie eine Ausführung in Baustoffen des Brandverhaltens A2 („kein Beitrag zum Brand“) vor.<sup>209</sup> Holz- und Holzwerkstoffe entsprechen allerdings ohne gesonderte Prüfung nur der Baustoffklasse D-s2, d0.<sup>210</sup>

Aufgrund der hohen Auflagen und rechtlichen Beschränkungen, die für den tragenden Holz- und Lehm-Geschossbau gelten, müssen für größere Bauvorhaben alternative Baustoffe in Betracht gezogen werden, die den Brandschutzbestimmungen eher entsprechen. Stahlbeton bietet an dieser Stelle den Vorteil, in seiner Höhe kaum Beschränkungen zu unterliegen.

Obwohl Mischbauweisen aus Lehm und Stahlbeton weit weniger gebräuchlich sind als eine Kombination von Lehmbaustoffen und Holz, ist deren Umsetzung durchaus möglich und bietet den Vorteil, auch in Gebäuden mit mehr als vier Geschossen realisierbar zu sein.

<i>K</i> <sub>AW1</sub>		<i>L</i> <sub>AW7 (STL) / <i>L</i><sub>AW8 (LST)</sub></sub>	
Material	d [m]	Material	d [m]
Zement-Putz	0,020	Kalkputz	0,025
EPS-Dämmplatte	0,200	Holzfaserdämmplatte	0,200
Stahlbeton	0,200	STL od. LST zwischen Stahlbetonstützen	0,200
Kalk-Gips-Putz	0,010	Lehmplatte TP	0,016
<b>Gesamt</b>	<b>0,430</b>	Lehmputz	0,005
		<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>

*Bauteilliste 43: Gegenüberstellung dreier Außenwandsysteme*

208 vgl. HOLZFORSCHUNG AUSTRIA 2014, S.17

209 vgl. OIB-Richtlinie 2 2019, S.22

210 ÖNORM EN 14081-1 2019, S.13

Ein Vergleich einer typischen Stahlbeton-Außenwand und zweier Außenwandsysteme aus tragendem Stahlbetonskelett und Lehmausfachung zeigt, dass auch eine Kombination dieser Baustoffe prinzipiell umsetzbar ist.

Die Aufbauten unterscheiden sich hauptsächlich in der Reduktion des massiven Stahlbetonelements von einer vollflächigen Wand auf den zur Lastabtragung notwendigen Stützenquerschnitt. Während die konventionelle Stahlbeton-Außenwand aus einem Element gefertigt wird, bestehen die Stahlbeton-Lehm-Außenwände aus einer Kombination aus Stützen und ausfachenden Lehmbaustoffen.

Für die Außenwand L\_AW7 entsteht dabei unter der Voraussetzung, dass sowohl die Stahlbetonstützen als auch die Stampflehmelemente vorgefertigt werden, nur ein sehr geringer zusätzlicher Arbeitsaufwand, da die Bauteile mit demselben Kran in Position gehoben werden. Der Zeitaufwand zur Herstellung des Wandaufbaus L\_AW8 erhöht sich hingegen durch die Notwendigkeit, die Lehmausfachung vor Ort auszumauern, etwas deutlicher.

Die größte Schwierigkeit in der Ausführung von Stahlbeton-Lehm-Hybridsystemen besteht in der Verbindung der beiden Materialien. Während Lehm an Holzbaustoffen aufgrund der rauen Oberfläche nahezu natürlich haftet, muss die Verbindung von Lehmbaustoffen mit Stahlbeton etwas genauer geplant werden. Für eine kraftschlüssige Verbindung sind Schalöl und Zementleim von der Betonoberfläche zu entfernen. Ein Spritzbewurf aus Zement und grobkörnigem Sand erzeugt anschließend einen ausreichend rauen Untergrund, um die Haftung des Lehms zu gewährleisten (vgl. [3.3.1 Tragende Baustoffe](#)). Gerade im Bereich vorgefertigter Lehmelemente, die nicht erst am Beton trocknen, erscheinen zudem zusätzliche mechanische Verbindungsmittel als sinnvoll.

Der Arbeits- und Zeitaufwand erhöht sich somit im Bereich einer Stahlbeton-Lehm-Mischbauweise etwas stärker als bei einer Kombination von Lehm und Holz. Dennoch zeigt sich auch hier, dass sich die Bauteile in ihrem Aufbau nicht übermäßig von konventionellen Stahlbetonwänden unterscheiden und in ähnlicher Weise hergestellt werden können.

Neben Überlegungen zur Komplexität der Bauteilaufbauten beeinflusst auch ihre generelle Fehleranfälligkeit in der Umsetzung die Wirtschaftlichkeit einer Bauweise. Je eher eine Konstruktion Fehler in der Ausführung verzeiht und je einfacher diese zu beheben sind, umso weniger zusätzliche Kosten entstehen durch später anfallende Sanierungen.

Das Bauen mit Lehm bietet dabei den Vorteil, dass das Material rein durch die Zugabe von Wasser immer wieder formbar wird, wodurch einerseits Fehler leicht ausgebessert werden können, andererseits aber auch kaum Verschnitte bzw. Baurestmassen anfallen. Übrig gebliebenes Material kann nahezu immer weiterverwendet werden.

Mit Lehm zu bauen bedeutet dabei trotzdem nicht, dass diese Bauweise völlig unbeschwert umgesetzt werden kann und dabei nicht mit Ausführungsmängeln zu rechnen ist. Viele Fehlerquellen können allerdings bereits bei der Planung berücksichtigt und einer falschen Ausführung somit vorgebeugt werden.

Eine der wohl bekanntesten Schwachstellen des Lehmbaus stellt seine vom Wassergehalt des Lehmbaustoffes abhängige Festigkeit dar. Lehm muss daher sowohl während der Gebäudeherstellung als auch während der Nutzung ausreichend vor zu großer Feuchteinwirkung geschützt werden.

Dies bedeutet beispielsweise die Planung entsprechender Horizontalsperren im Sockelbereich sowie einer zusätzlichen Materiallage zwischen dieser Sperrschicht

und der aufgehenden Lehmwand.<sup>211</sup> Bewitterte Lehmbauteile müssen zudem durch ausreichend dimensionierte Dachüberstände oder entsprechende Oberflächenbeschichtungen geschützt werden. Diese Schutzmaßnahmen sind ausreichend früh zu ergreifen, um Lehmbauteile bereits während des Baustellenbetriebs trocken zu halten.

Eine umfassende Planung der Trocknungszeiten und -möglichkeit von Lehmbaustoffen stellt eine weitere wichtige Maßnahme dar, um Lehmbauteile vor möglichen Schäden zu schützen. Feucht eingebaute Lehmbaustoffe müssen möglichst rasch austrocknen, um dem Entstehen von Schimmel und der Verrottung organischer Bestandteile vorzubeugen. Neben dem Einsatz von Trocknungsgeräten verbessert auch ein entsprechender Bauzeitplan die Trocknungsmöglichkeit dieses Baustoffes. Durch das Vermeiden zu dicker Bauteile, eine möglichst beidseitige Bauteilbelüftung und ein Aufbringen weiterer Bauteilschichten erst nach vollständiger Trocknung kann Schäden durch zu hohe Feuchtigkeit entgegengewirkt werden.<sup>212</sup>

Eine weitere häufige Fehlerquelle im Lehmbau stellen die Lehmmischungen selbst dar, wenn diese nicht von entsprechend geschultem Personal angesetzt werden. Verunreinigte Ausgangsstoffe, ein zu hoher Sandanteil, ungeeignete Zuschläge sowie eine unverhältnismäßige Menge Anmachwasser können die Eigenschaften einer Lehmmischung beispielsweise ungünstig beeinflussen.<sup>213</sup>

Durch die Beachtung dieser und weiterer baustoffspezifischer Eigenschaften kann eine Vielzahl möglicher Bauschäden verhindert werden. Die Verarbeitung der Lehmbaustoffe selbst verzeiht außerdem viele Fehler und erlaubt eine Ausbesserung im Bauteil oft ohne großen Arbeitsaufwand.

Wie die vorangegangenen Vergleiche zeigen, erweist sich die Integration von Lehmbaustoffen in herkömmliche Bauweisen zudem als relativ unproblematisch, der vereinzelt zusätzlich benötigte Arbeits- und Zeitaufwand ist unter Berücksichtigung der ökologischen Vorteile des Baustoffes durchaus vertretbar.

#### **4.3.5 Rechtliche Komplikationen – Lehmbaunorm**

Wenngleich das Interesse am Bauen mit Lehm seit der Energiekrise der 1970er Jahre stetig gestiegen ist, baut diese Bauweise in Österreich bis heute auf keinen normativen Regelungen und Maßnahmen der Qualitätssicherung auf.

Anders als beispielsweise in Deutschland lagen in der jüngeren Geschichte Österreichs nie umfassende Normen vor, die Lehmbaustoffe und -bauteile klassifizieren und in den Bauprozess eingliedern. Historische Beschlüsse über das Bauen mit Lehm beschränkten sich meist auf Verordnungen, einfache Gebäude in Lehmbauweise auszuführen, um andere Ressourcen für öffentliche Bauten oder militärische Zwecke nutzen zu können.<sup>214</sup> Selbst in der Zwischen- und Nachkriegszeit des 20. Jahrhunderts erfolgte die Ausführung von Lehmbauten meist ohne bautechnische Regelungen, obwohl solche in Deutschland zumindest durch die Lehmbauordnung 1951 bereits vorlagen.<sup>215</sup>

211 vgl. ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.147

212 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.200

213 vgl. ebenda, S.200

214 vgl. BLASCHEK 2015, S.106

215 vgl. ebenda, S.109

Die Normung von Bauprodukten und die Festlegung allgemein gültiger Regeln der Technik zur Ausführung von Bautechniken ist zwar nicht immer für jeden Baustoff und jedes Baudetail zwingend notwendig, generell bieten verbindliche Richtlinien jedoch sowohl in der Planung als auch der Umsetzung eine bau- und versicherungsrechtliche Sicherheit, die im heutigen Bauwesen nahezu unverzichtbar ist.<sup>216</sup>

Lehmbaustoffe gelten in Österreich derzeit als „nicht geregelte Bauprodukte“ – für sie existieren weder Umsetzungsvorschriften der Europäischen Union noch nationale Regelungen über deren Einbau.

Geregelte Bauprodukte werden in der Baustoffliste ÖA, die das Österreichische Institut für Bautechnik (OIB) erstellt, angeführt. Sie entsprechen vorhandenen technischen Regelwerken oder weichen nur geringfügig von diesen ab. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich nicht geregelte Bauprodukte in hohem Maße von technischen Regelwerken oder sind in diesen erst gar nicht verankert. Die Verwendung von Baustoffen dieser Klassifizierung bedarf eines Nachweises in besonderen Verfahren durch akkreditierte Prüfanstalten. Für den Einsatz eines nicht geregelten Bauprodukts kann aber bei einer Verwendung im Einzelfall anstelle eines umfassenden Nachweisverfahrens auch eine Bewilligung durch die Baubehörde erwirkt werden.<sup>217</sup>

Für die Lehmbauweise im österreichischen Bausektor bedeutet dies einen arbeitsintensiven Genehmigungsprozess, der zusätzlich für die Planer mit hohem Eigenrisiko behaftet ist. ÖNORMEN sind meist Grundlage von Leistungsbeschreibungen und erlauben Festlegungen zur Bauausführung. Aufgrund des Fehlens verbindlicher Regelwerke und der somit unregelmäßigen bauaufsichtlichen Praxis liegt derzeit hingegen keine Sicherheit für Planer wie Ausführer vor und auch die Qualitätssicherung der Produkte ist nicht gewährleistet. Gleichmaßen erweist sich auch die Feststellung von Ausführungsmängeln auf Basis einheitlicher Leistungskriterien als ausgesprochen schwierig.

Um den Lehm- über den Selbstbau-Sektor hinaus weiterzuentwickeln und im Bauwesen zu etablieren, bedarf es daher der Schaffung verbindlicher Regelwerke. Deutschland hat diesen Entwicklungsschritt bereits teilweise vollzogen. Die vom *Dachverband Lehm* herausgegebenen *Lehmregeln*<sup>218</sup> gelten in den meisten Bundesländern bereits als allgemein anerkannte Regeln der Technik, die bei der Planung und Ausführung von Gebäuden zwingend zu berücksichtigen sind. Seit ihrer Ersterscheinung 1999 hat sich die Rechtssicherheit im Bereich des Lehmbaus deutlich verbessert und Baugenehmigungsprozesse konnten wesentlich einfacher durchgeführt werden.<sup>219</sup> Zusätzlich zu den *Lehmregeln* wurden in den letzten Jahren zudem eigene DIN-Normen für verschiedene Lehmstoffe wie Lehmplatten, Lehmsteine und Lehmputz beschlossen. Die baurechtliche Verankerung des Lehmbaus in deutschen Regelwerken ermöglichte letztlich die Entwicklung dieser Bauweise zu einer zwar kleinen, aber dennoch eigenständigen Branche des Bauwesens.<sup>220</sup>

Ein Verweis auf deutsche Regelwerke und Normen ist bei der Anwendung von Lehmstoffen auch in österreichischen Bauvorhaben denkbar und kann sich positiv auf den Genehmigungsprozess auswirken, jedoch besteht hier kein Rechtsanspruch

216 vgl. VOLHARD 1983/2013, S.195f.

217 o.A.: *Bauproduktekennzeichnung, Nationale Regelung*

218 DACHVERBAND LEHM e.V. 1999

219 vgl. SCHROEDER 2010/2019, S.311

220 vgl. ebenda, S.311

auf deren Anwendbarkeit. Es liegt somit im Ermessen der zuständigen Baubehörde, ob ein Verweis auf deutsche Normen und Richtlinien als ausreichend angesehen wird. Die Übernahme der deutschen Normen sowie der *Lehmbauregeln* in österreichische Normen oder die eigenständige Entwicklung solcher erscheint daher als unabdingbare Notwendigkeit zur Etablierung des Lehmbaus im österreichischen Bausektor. Die Einführung einer Norm ist aber in der Regel davon abhängig, ob eine entsprechende Nachfrage am Markt und somit wirtschaftliche Notwendigkeit hierfür besteht. Dies ist insofern problematisch, da das Bauen mit Lehm derzeit mit vielen Unsicherheiten seitens der Planer und Ausführenden behaftet ist, was sich wiederum ungünstig auf die Nachfrage auswirkt. Die Einführung österreichischer Lehmbauregeln oder entsprechender ÖNORMEN erscheint als das geeignetste Mittel, die Planungssicherheit und dadurch auch den Willen, den Baustoff einzusetzen, zu erhöhen. Nachfrage und gesetzliche Regelung gehen hier also Hand in Hand – ohne das Bestreben des Gesetzgebers und der Prüfinstitute, nachhaltige Bauweisen wie den Lehmbau in Österreich voranzutreiben, wird vermutlich auch die Nachfrage nach entsprechenden Produkten weiter auf eine kleine Nische beschränkt bleiben.

Ohne die Verankerung des Lehmbaus in anerkannten Regeln der Technik erscheint die flächendeckende Verbreitung dieser Bauweise schwierig. Während für das Bauen mit Baustoffen wie Beton, Ziegel oder Holz entsprechende Normen vorliegen, aus denen Leistungsbeschreibungen, Qualitätsansprüche und Einheitspreise abgeleitet werden können, bewegen sich Planer bei einem Einsatz von Lehmstoffen auf sehr ungesichertem Boden.

Es ist aber zumindest davon auszugehen, dass ein Verzicht auf die Ausführung tragender Lehmteile deren Genehmigung etwas vereinfacht. Durch ein Traggerüst aus Baustoffen wie Holz oder Beton, die bereits ausreichend im Bauwesen verankert sind, entfällt beispielsweise ein umfassender Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis. Andere Belege wie jene über auftretendes Kondensat, ausreichendes Wärmedämm- oder Schalldämmvermögen erweisen sich meist als weniger kritisch.

Die hohe Beliebtheit von Lehmputz im österreichischen Raum zeigt, dass die Anwendung nicht tragender Lehmstoffe sehr wohl ohne rechtliche Komplikationen umsetzbar ist. Dennoch gilt für sie weiterhin ein hohes Haftungsrisiko für den Planer, da dieser sich hier auf keine österreichischen Richtlinien berufen kann.

Das Bauen mit Lehm ist somit in Wien bereits heute prinzipiell möglich, jedoch stärker risikobehaftet als die Umsetzung etablierter Bauweisen. Es bedarf daher dringend rechtlicher Maßnahmen, um Architekturschaffenden die notwendige Sicherheit zu geben, um den Baustoff mit gutem Gewissen einsetzen zu können.

# Eine Perspektive für den Lehmbau

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Bauen mit Lehm begleitet den Menschen seit Jahrhunderten. Dass der Baustoff mit dem Beginn der Industrialisierung laufend zurückgedrängt und als minderwertig eingestuft wurde, ist nicht nur aus der Perspektive der Bautradition schade, sondern darf auch im Hinblick auf die seit Jahrzehnten wachsende Klimabedrohung nicht länger wortlos hingenommen werden.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Vergleiche verschiedener Lehmbauteile mit einigen bis heute hoch gelobten – obwohl energie- und ressourcenintensiv hergestellten – Konstruktionen aus Stahlbeton und Ziegel zeigen, dass Lehm keineswegs als veralteter oder gar minderwertiger Baustoff anzusehen ist.

Durch eine materialgerechte Umsetzung in den Bauteilen können Lösungen entwickelt werden, deren bauphysikalische und ökologische Eigenschaften mindestens gleichwertig zu aktuell üblichen Bauweisen anzusehen sind.

So zeigt beispielsweise der direkte Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile, dass bei einheitlicher Dimensionierung der Wärmedämmstoffe im Lehmbau ebenso gute Ergebnisse erzielbar sind wie in Konstruktionen aus Stahlbeton, Ziegel oder Holz. Lehm selbst weist dabei je nach Zusammensetzung oft sogar eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf als konventionelle Baustoffe. Durch den Einsatz von Produkten aus Leichtlehm ist es vielfach möglich, das notwendige Maß an Wärmedämmstoffen in einer Konstruktion deutlich zu reduzieren.

Gleichermaßen kann durch den Einsatz von Lehmbaustoffen auch die Wärmeträgheit und das Wärmespeichervermögen von Bauteilen deutlich verbessert werden. In Anbetracht der zunehmenden Zahl von Tropennächten und überdurchschnittlich warmen Sommertagen im städtischen Raum muss Eigenschaften wie diesen zukünftig deutlich mehr Beachtung geschenkt werden. Es darf nicht das erklärte Ziel der Architektur sein, auf die steigenden Temperaturen in Städten schlicht mit der Installation von Klimaanlage zu reagieren. Es bedarf hier ökologisch verträglicherer Lösungen, die dem Klimawandel entgegenwirken, anstatt ihn weiter voranzutreiben. Die hohe Wärmeträgheit von Lehm stellt dabei ein geeignetes Mittel dar, einen übermäßigen Temperaturanstieg in städtischen Wohnungen abzufedern.

Wie die detaillierte Analyse über die Eignung im Niedrig-, Niedrigst- und Passivhaus-Sektor anhand der ermittelten U-Werte gezeigt hat, muss sich der Baustoff Lehm auch hier gegenüber herkömmlichen Materialien nicht geschlagen geben. Hinsichtlich der Energieeffizienz der Bauteile kann Leichtlehm an dieser Stelle erneut einen positiven Effekt erzielen, allerdings muss für diese Bewertung den eingesetzten Wärmedämmstoffen mehr Planungsleistung eingeräumt werden, da sie die thermische Performance letztlich doch in höherem Maße beeinflussen.

Neben sehr guten thermischen Eigenschaften erweist sich der Baustoff Lehm auch hinsichtlich seiner schalltechnischen Charakteristika als äußerst vorteilhaft. Aufgrund seiner geringen Steifigkeit und offenporigen Struktur wirkt das Material besonders schalldämmend.

Wie der Versuch, das Schalldämm-Maß sowie den Norm-Trittschallpegel der vorgestellten Lehmbauteile zu bestimmen, gezeigt hat, kämpft der Baustoff hier noch mit fehlenden Nachweisen durch akkreditierte Prüfanstalten. Lehm ist aufgrund dessen an dieser Stelle klar im Nachteil gegenüber etablierten Konstruktionen,

für die derartige Prüfzeugnisse bereits in ausreichender Zahl vorliegen. Anhand der mit Unterstützung versierter Bauphysiker durchgeführten Abschätzung des voraussichtlichen Schalldämm-Potentials der Aufbauten zeigt sich dennoch, dass Konstruktionen aus Lehmbaustoffen voraussichtlich sehr gute Werte erzielen. Um die Bauteile auch in konkreten Bauwerken umsetzen zu können, bedarf es trotzdem weiterer Forschungsarbeit, um Bauherren wie Baubehörden verbindliche Nachweise vorlegen zu können.

Im Bereich des Brandschutzes steht der Lehmbau ebenso vor dem Problem, über keine genügende Zahl von Nachweisen zu verfügen. Brandtests haben zwar bislang gezeigt, dass Lehmbaustoffe in der Regel keinen Beitrag zum Brand leisten und andere Baustoffe sogar vor einer Entzündung schützen können, nichtsdestoweniger existiert aktuell keine in Normen verankerte Einordnung des Baustoffes in eine Baustoffklasse. Gleichmaßen fehlen Bewertungen des Feuerwiderstands für Lehmteile.

Ohne entsprechende Prüfzeugnisse des Schall- und Brandschutzes besteht für Lehmbaustoffe ein erheblicher Wettbewerbsnachteil, da diesbezügliche Anforderungen in Ausschreibungen nur unter erheblichem Aufwand nachweisbar sind.

Das Ausräumen dieser Hürden ist von großer Bedeutung, erweist sich der Baustoff doch als besonders umweltverträglich und nutzerfreundlich. Lehm vermag durch seine Diffusionsoffenheit und Offenporigkeit die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen nachweislich positiv zu beeinflussen, wie die Gegenüberstellungen mit konventionellen Baustoffen gezeigt haben. Gleichsam wirken Lehmbaustoffe geruchsbindend, sondern keine Schadstoffe ab und führen anders als eine Vielzahl gängiger Bauprodukte bei direktem Hautkontakt zu keinen Reizungen während der Verarbeitung.

Auch die Ökobilanz von Lehmprodukten und -bauteilen bekräftigt die Forderung, den Lehmbau wieder verstärkt zu forcieren. Im Hinblick auf den stetig wachsenden Beitrag der Bauwirtschaft zur Verursachung von Treibhausgasemissionen sowie der zunehmenden Menge von Abfallmassen im Bauwesen ist es unumgänglich, den Aspekt der Nachhaltigkeit zukünftig stärker in den Planungsprozess zu integrieren und Maßnahmen zu setzen, diesen auch wirtschaftlich abzubilden.

Wie die Bilanzierung der in dieser Arbeit behandelten Bauteilaufbauten mithilfe der Berechnungsmethode OI<sub>3</sub> zeigen konnte, weisen Lehmbaustoffe eine nahezu unschlagbar geringe Umweltwirkung auf. Die Herstellung von Lehmprodukten erfolgt unter minimalem Energieeinsatz, der selbst bei Hinzufügen porosierter Leichtzuschläge nur geringfügig wächst. Gleichsam erweist sich auch das Recycling von Lehmbaustoffen als äußerst günstig, da die erneute Aufbereitung des Baustoffes nur wenig Aufwand erfordert.

In Kombination mit anderen, ökologisch unbedenklichen Materialien erreichen Lehmteile OI<sub>3, KON</sub>-Bewertungen, die von konventionellen Konstruktionen kaum zu erreichen und selbst klassischen Holz-Aufbauten meist überlegen sind. Die Feststellung der ungünstigen  $\Delta$ OI<sub>3</sub>-Beurteilung von Holzfaserplatten verdeutlicht dabei die Wichtigkeit, Ökobilanzierungen bereits früh in den Planungsprozess zu integrieren, anstatt sich auf allgemeine Aussagen über die Nachhaltigkeit von Baustoffen zu verlassen. Die überraschend hohe Punktebewertung dieses Materials hat auch in den hier gezeigten Vergleichen vielfach zu unverhältnismäßig schlechten Gesamtbeurteilungen geführt. Durch die Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher Dämmstoffe in derselben Konstruktion konnte gezeigt werden, wie drastisch sich einzelne ökologische Schwergewichte auf die Umweltverträglichkeit eines Bauteils auswirken können. Für das Bauen mit Lehm bedeutet dies wie für andere Bauweisen, dass Nachhaltigkeit nur durch das Zusammenspiel mehrerer, ökologisch ähnlich

unbedenklicher Stoffe realisierbar ist. Die Bewertung der Entsorgungseinstufung der Bauteile verdeutlicht zudem, dass Lehmbaustoffe das Potential haben, zukünftig anfallende Bauschuttmassen drastisch zu reduzieren und so Ressourcen und Flächen zu schonen. Lehmbauteile können oft ohne dauerhaft verklebte Verbindungen ausgeführt werden, weisen meist ein geringeres Maß an nicht wiederverwendbaren Stoffen auf und erlauben unter Einsatz von Leichtlehmprodukten zusätzlich eine Reduktion der Wärmedämmstoffe, deren Entsorgungseinstufung häufig besonders ungünstig ist.

Lehm stellt somit einen ressourcenschonenden und energiearm hergestellten Baustoff dar, mit dem sich nachhaltige Konstruktionen ohne Verzicht auf eine gute bauphysikalische Performance herstellen lassen.

Die Bauwirtschaft wird aber vor allem vom Kapitalmarkt beeinflusst – Produkte aus Lehm werden langfristig nur dann flächendeckend im Bausektor Fuß fassen, wenn sie auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit mit anderen Baustoffen konkurrieren können. Dies betrifft sowohl die Herstellungskosten und Bauzeiten der Lehmbauteile als auch ihre Komplexität und rechtliche Verankerung.

Wie in den vorangegangenen Vergleichen bereits dargelegt wurde, besteht vor allem im Bereich der Ökonomie noch einiger Forschungsbedarf, um dem Lehm das notwendige Rüstzeug zu geben, seine Stärken auf diesem Gebiet auszuspielen. Doch auch hier können zumindest stellenweise bereits Erfolge verzeichnet werden. Durch die Entwicklung vorgefertigter Lehmbauteile und Trockenbaustoffe ist es heute möglich, die im traditionellen Lehmbau langen Herstellungszeiten deutlich zu reduzieren. Da viele Lehmprodukte in ihrer Herstellung und Handhabung zudem an konventionelle Bauerzeugnisse angelehnt sind, besteht hier meist nur ein geringer Mehraufwand im Einbau.

Hinsichtlich des Kostengefüges ist festzustellen, dass die reinen Materialkosten von Lehmbaustoffen oft nur geringfügig über vergleichbaren konventionellen Produkten liegen. Die Datenlage auf diesem Gebiet ist aber derzeit noch sehr gering – entsprechende Einheitspreise, wie sie für Baustoffe wie Beton oder Ziegel definiert werden – liegen nicht vor. Diese wären jedoch eine wichtige Grundlage, um die Planungssicherheit zu erhöhen und das Kostengefüge im Lehmbau greifbar zu machen. Hierzu müssen zukünftig auch Faktoren wie Sanierungs- und Entsorgungskosten berücksichtigt werden, um einen ganzheitlichen Kostenvergleich über den gesamten Lebenszyklus der Baustoffe durchführen zu können.

Das mit Abstand größte Hindernis für den Lehmbau stellen indessen nicht fehlende Richtpreise dar, sondern es besteht in der fehlenden Verankerung des Baustoffes Lehm in einschlägigen Normen und Regelwerken.

Ein Blick nach Deutschland, wo mittlerweile zumindest für einige Lehmbaustoffe entsprechende DIN-Normen vorliegen und mit den *Lehmbauregeln* des *Dachverband Lehm* grundsätzliche Richtlinien festgelegt wurden, zeigt, dass das Schaffen einer gewissen Planungssicherheit für Architekturschaffende und Händler die Wettbewerbsfähigkeit von Baustoffen deutlich verbessert. Der Lehmbau konnte sich aufgrund dieser rechtlichen Verankerung in Deutschland deutlich weiterentwickeln und nimmt einen wachsenden Anteil im Bausektor ein.

Wenngleich der Verweis auf deutsche Normen und Regelwerke für österreichische Bauvorhaben möglich ist, bieten sie hier keine Rechtssicherheit, da sie in Österreich nicht verbindlich anzuwenden sind. Wie bereits im entsprechenden Kapitel erläutert, steht der Lehmbau dabei vor dem Problem, dass die Entwicklung von Normen meist nur bei entsprechender Nachfrage vorangetrieben wird. Ebendiese Nachfrage

ist aktuell aufgrund des hohen Risikos für Planer und Bauunternehmer aber sehr begrenzt, da es kaum Möglichkeiten gibt, entsprechende Qualitätsmerkmale auf Basis normativer Leistungsbeschreibungen einzufordern.

Das Festlegen von Qualitätsstandards und die Etablierung verbindlicher Ausführungsregeln ist die wohl bedeutendste Maßnahme, die es zu treffen gilt, um das Bauen mit Lehm im Wiener Wohnbau wie in anderen Großprojekten durchzusetzen. Andernfalls wird sich der Baustoff auch weiterhin gegenüber Stahlbeton, Ziegel und Co. in einem deutlichen Wettbewerbsnachteil sehen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Umsetzung von Lehmbauteilen im mehrgeschossigen Wohnbau ohne umfassenden Mehraufwand möglich ist. Der Baustoff Lehm kann der Stadt und seinen Bewohnern einen erhöhten Nutzerkomfort bei gleichzeitig verbesserter Nachhaltigkeit bieten.

Die Zukunft des städtischen Lehmbaus hängt letztlich aber vom Willen des Gesetzgebers und der Prüfinstitute ab, diese Bauweise auf eine rechtlich fundierte Basis zu stellen. Auch Anreize in Wettbewerben und die Aufwertung ökologischer Kriterien in diesen können die derzeitige Situation der Lehmbauweise deutlich verbessern.

Andernfalls werden sich Planer weiterhin gezwungen sehen, auf andere Baustoffe zurückzugreifen oder einen deutlich höheren Aufwand im Genehmigungsprozess in Kauf zu nehmen.

Das Bauen mit Lehm braucht heute noch viel Risikobereitschaft. Dies gilt es zu ändern.

# Bibliographie

## Literatur

**BLASCHEK**, Jasmine Alia: *Ausgerechnet Lehm, Praktische Perspektiven für den Lehmbau in Österreich*, Wien (Diplomarbeit, Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege, Technische Universität Wien) **2015**

**BRUCKNER**, Heinrich / **SCHNEIDER**, Ulrich / **SCHWIMANN**, Mathias: *Lehmbau für Architekten und Ingenieure, Konstruktion, Baustoffe und Bauverfahren, Prüfungen und Normen, Rechenwerte*, Düsseldorf (Werner-Verlag GmbH) **1996**

**DACHVERBAND LEHM e.V.** (Hg.): *Lehmbau Regeln, Begriffe – Baustoffe – Bauteile*, Wiesbaden (Vieweg und Teubner / GWV Fachverlage GmbH) **1999/2009**

**DEHN**, Frank / **KÖNIG**, Gert / **MARZAHN**, Gero: *Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen*, Berlin (Ernst & Sohn) **2003**

**FROMME**, Irmela: „Anstriche auf Lehmputzen“ in: PILZ, Achim (Hg.): *Lehm im Innenraum, Eigenschaften, Systeme, Gestaltung*, Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag) **2010**

**HUBER**, Anne-Louise / **KLEESPIES**, Thomas / **SCHMIDT**, Petra: *Neues Bauen mit Lehm, Konstruktionen und gebaute Objekte*, Staufen bei Freiburg (Ökobuch Verlag) **1997**

**MINKE**, Gernot: *Das neue Lehmbau-Handbuch, Baustoffkunde – Konstruktionen – Lehmarchitektur*, Staufen bei Freiburg (Ökobuch Verlag) 1994/2001

**OBEREDER**, Nina Maria: *Vergleich der Ökobilanzen von verschiedenen Bauweisen am Beispiel Wohnhausanlage Amselgasse, Lasseer*, Wien (Diplomarbeit, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien), **2013**

**ROEHLEN**, Ulrich / **ZIEGERT**, Christof: *Lehmbau-Praxis, Planung und Ausführung*, Berlin (Bauwerk Verlag GmbH) **2010**

**SCHOENBURG**, Kurt: *Lehmbauarbeiten*, Berlin / Wien / Zürich (Beuth Verlag) **2008/2017**

**SCHROEDER**, Horst: *Lehmbau, mit Lehm ökologisch planen und bauen*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag) **2010**

**SCHROEDER**, Horst: *Lehmbau, mit Lehm ökologisch planen und bauen*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag) **2010/2019**

**VOLHARD**, Franz: *Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm*, Wien (Springer Verlag) **1983/2013**

## Gesetzestexte, Richtlinien, Normen

**AWG:** Abfallwirtschaftsgesetz 2002 BGBl 102/2002 idF BGBl 104/2019

**wr BauO:** Wiener Bauordnung LGBI11/1930 idF LGBI 71/2018

**ÖNORM B8110-3:2012** 03 15, *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung*

**ÖNORM B8115-2:2006** 12 01, *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz*

**ÖNORM EN 13501-1:2020** 01 15: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*

**ÖNORM EN 14081-1:2019** 11 1: *Holzbauwerke, Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

**OIB-Richtlinie 2:** *Brandschutz*, Ausgabe 04/2019

**OIB-Richtlinie 5:** *Schallschutz*, Ausgabe 04/2019

**OIB-Richtlinie 6:** *Energieeinsparung und Wärmeschutz*, Ausgabe 04/2019

**Richtlinie 2010/31/EU** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)

## Baustoffkataloge, Datenbanken

**BAUBOOK Datenbank**, aufgerufen am: 25.10.2019

<https://www.baubook.info/zentrale/?SW=5&SuchID=357645&LU=1823781611&qJ=9&LP=2qn8y>

**DATAHOLZ** Katalog bauphysikalischer und ökologisch geprüfter Holzbauteile, aufgerufen am: 10.12.2019

<https://www.dataholz.eu>

**IBO Passivhaus Bauteilkatalog**, ökologisch bewertete Konstruktionen, aufgerufen am: 10.12.2019

[https://www.baubook.at/phbtk/index\\_BTR.php?SW=19](https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19)

**LIGNUMDATA** Bauteilkatalog, aufgerufen am: 31.01.2020

<https://lignumdata.ch>

**Stoffwertkatalog IB Rauch**, aufgerufen am: 25.10.2019

<https://www.ib-rauch.de/okbau/stoffwert/suchen01.php?start=2&end=1&begriff=Lehm&FileName=stoffwert.txt>

## Preislisten

**AOV:** Agentur für die Verfahren und die Aufsicht im Bereich öffentliche Bau-, Dienstleistungs- und Lieferaufträge: *Richtpreisverzeichnis für Hochbauarbeiten*, deutsche Fassung, Online-Ausgabe **2020**

aufgerufen am: 28.03.2020

[http://www.provinz.bz.it/arbeit-wirtschaft/ausschreibungen/downloads/HBED20\\_Hochbauarbeiten\\_DE\\_20191220.pdf](http://www.provinz.bz.it/arbeit-wirtschaft/ausschreibungen/downloads/HBED20_Hochbauarbeiten_DE_20191220.pdf)

**ASAMER:** Beton, Preisliste 2019

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.asamer.at/images/pdf/preislisten/Betonpreisliste\\_2019.pdf](https://www.asamer.at/images/pdf/preislisten/Betonpreisliste_2019.pdf)

**COMELLI:** Ziegel, Preisliste 2020

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/107113\\_Comelli-Preisliste-2020.pdf](https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/107113_Comelli-Preisliste-2020.pdf)

**FERMACELL:** Gipsplatten, Preisliste 2020

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/250305\\_Fermacell\\_Preisliste\\_Oesterreich\\_2020.pdf](https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/250305_Fermacell_Preisliste_Oesterreich_2020.pdf)

**KNAUF:** Gipsplatten, Preisliste 2018

aufgerufen am: 28.03.2020

<https://katalog.machacek.at/images/downloads/Knauf%20Lieferprogramm%20Preisliste%20ab%2001.01.2018.pdf>

**NATURBAUHOF:** Lehmplatten

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.naturbauhof.de/lad\\_preis\\_lehm\\_platte.php](https://www.naturbauhof.de/lad_preis_lehm_platte.php)

**NATURBAUHOF:** Lehmsteine

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.naturbauhof.de/lad\\_preis\\_lehm\\_stein.php](https://www.naturbauhof.de/lad_preis_lehm_stein.php)

**NATURBAUHOF:** Stampflehm

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.naturbauhof.de/lad\\_preis\\_lehm\\_baulehm.php#stampflehm](https://www.naturbauhof.de/lad_preis_lehm_baulehm.php#stampflehm)

**PROFIBAUSTOFFE:** Beton, Preisliste 2019

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/124383\\_Profibaustoffe\\_Preisliste\\_2019.pdf](https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/124383_Profibaustoffe_Preisliste_2019.pdf)

**WIENERBERGER:** Ziegel, Preisliste 2019

aufgerufen am: 28.03.2020

[https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/350001\\_Wienerberger\\_Preisliste\\_2019\\_ab\\_20190301.pdf](https://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/350001_Wienerberger_Preisliste_2019_ab_20190301.pdf)

## Online-Ressourcen

**ALBRECHT et.al.:** ALBRECHT, Stefan / LINDNER, Jan Paul / MAKISHI COLODEL, Cecilia / WITTSTOCK, Bastian: „Gebäude aus Lebenszyklusperspektive, Ökobilanzen im Bauwesen“, Sonderdruck aus: *Bauphysik 31* (2009), Heft 1, Stuttgart (Fraunhofer-Institut für Bauphysik), Online Ausgabe, S.5

aufgerufen am: 16.03.2020

[http://www.hausplan.de/sites/default/files/sd\\_bp0109\\_web\\_tcm45-30733.pdf](http://www.hausplan.de/sites/default/files/sd_bp0109_web_tcm45-30733.pdf)

**AUSTROTHERM:** *Behaglichkeit durch Wärmedämmung*, Wopfing 05/2010, S.7

aufgerufen am: 13.02.2020

<http://en.austrotherm.com/upload/folder/bauphysik.pdf>

**BOKU Wien / TU Graz:** *Ökologisches Baustoffkonzept, Bewertungsmethodik, Zertifizierung, Anwendungsgebiete, Demonstrationsgebäude*, Skriptum der LVA „Integrierte und nachhaltige Hochbauplanung“

aufgerufen am: 04.03.2020

[https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz\\_pdf/skriptum\\_hochbauplanung\\_1.4\\_oekologisches\\_baustoffkonzept.pdf](https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/skriptum_hochbauplanung_1.4_oekologisches_baustoffkonzept.pdf)

**BREUSS, Andreas:** *Massive Lehmbauweise im verdichteten Flachbau unter Berücksichtigung der regionalen Wertschöpfung*, Endbericht Impulsprogramm für mehr Wohnqualität, Wien 2011

aufgerufen am: 15.10.2019

<http://www.noee.gv.at/noee/Wohnen-Leben/2217.pdf>

**CLAYTEC e.K. 2018a:** Arbeitsblatt *Fachwerksanierung*, Viersen 04/2018

aufgerufen am: 22.08.2019

[https://www.claytec.de/Arbeitsblätter/3\\_Arbeitsblatt-Fachwerksanierung/Arbeitsblatt\\_Fachwerk.pdf](https://www.claytec.de/Arbeitsblätter/3_Arbeitsblatt-Fachwerksanierung/Arbeitsblatt_Fachwerk.pdf)

**CLAYTEC e.K. 2018b:** Arbeitsblatt *Lehmputze*, Viersen 07/2018

aufgerufen am: 23.08.2019

[https://www.claytec.de/Arbeitsblätter/3\\_Arbeitsblatt-Lehmputze/Arbeitsblatt\\_Lehmputze.pdf](https://www.claytec.de/Arbeitsblätter/3_Arbeitsblatt-Lehmputze/Arbeitsblatt_Lehmputze.pdf)

**CLAYTEC e.K. 2012:** Arbeitsblatt *Stampflehmwände und -böden*, Viersen 07/2012

aufgerufen am: 06.08.2019

[https://www.claytec.de/fileadmin/user\\_upload/pdf\\_techniken/1-1\\_stampflehmwaende\\_und-boeden.pdf](https://www.claytec.de/fileadmin/user_upload/pdf_techniken/1-1_stampflehmwaende_und-boeden.pdf)

**HOLZFORSCHUNG AUSTRIA** (Hrsg.): *Holzrahmenbauweise im Geschossbau, Fokus Bauphysik*, Planungsbroschüre, Online-Ausgabe 05/2014

aufgerufen am: 01.04.2020

[https://www.knauf.at/epim/EBOOK\\_KNAUF\\_HOLZRAHMENBAU.PDF](https://www.knauf.at/epim/EBOOK_KNAUF_HOLZRAHMENBAU.PDF)

**IBO:** Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO): *Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen (Endbericht)*, Anhang 17 – Baustoffkennwerte, Online Ausgabe 2009

aufgerufen am: 16.03.2020

[https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/forschung/NachhaltigMassiv\\_AP3Nutzungsdauer\\_Endbericht\\_20091022-1\\_AnhTabelle.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/forschung/NachhaltigMassiv_AP3Nutzungsdauer_Endbericht_20091022-1_AnhTabelle.pdf)

**IBO:** Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO): *IBO-Richtwerte für Baumaterialien, Wesentliche methodische Annahmen für die IBO-Richtwerte 2017*, Online-Ausgabe 09/2017

aufgerufen am: 02.03.2020

[https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017\\_Methode\\_v31\\_20170929.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017_Methode_v31_20170929.pdf)

**IBO 2018a:** Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO): *Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude*, Version 4.0, Online-Ausgabe 10/2018

aufgerufen am: 04.03.2020

[https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI3\\_Berechnungsleitfaden\\_V4.0\\_20181025.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI3_Berechnungsleitfaden_V4.0_20181025.pdf)

**IBO 2018b:** Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO): *Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators  $EI_{KON}$  von Bauteilen und des Entsorgungsindikators  $EI_{10}$  auf Gebäudeebene*, Version 2.0, Online-Ausgabe 01/2018

aufgerufen am: 16.03.2020

[https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/EI10\\_Berechnungsleitfaden\\_V2.01\\_2018.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/EI10_Berechnungsleitfaden_V2.01_2018.pdf)

**IBO:** Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO): *Oekoindex 3, Einführende Information*, Online-Ausgabe

aufgerufen am: 04.03.2020

[http://www.baubook.at/m/Daten/Bilder/Infos/k4\\_OI3\\_Einfuehrung.pdf](http://www.baubook.at/m/Daten/Bilder/Infos/k4_OI3_Einfuehrung.pdf)

**Informationsdienst Holz:** *Holzbau Handbuch Reihe 3 / Teil 3 / Folge 1, Grundlagen des Schallschutzes*, Online Ausgabe

aufgerufen am: 05.01.2020

<http://www.meta-wissen-holzbau.at/technik/schallschutz/Allgemein/Grundlagen%20des%20Schallschutzes.pdf>

**KUENZ, Lothar:** *Schallschutz im Holzbau*

aufgerufen am: 05.01.2020

<http://www.meta-wissen-holzbau.at/technik/schallschutz/Allgemein/Vortragsmanuskript%20Schallschutz%20im%20Holzbau%2004.08.pdf>

**LAND OBERÖSTERREICH:** *Das Niedrigstenergiehaus*

aufgerufen am: 21.02.2020

[https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/ESV\\_Niedrigstenergiehaus.pdf](https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/ESV_Niedrigstenergiehaus.pdf)

**LAND OBERÖSTERREICH:** *Schallschutz im Wohnbau*, Ausgabe 09/2017

aufgerufen am: 22.01.2020

[https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/U\\_schallschutzimWohnbau.pdf](https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/U_schallschutzimWohnbau.pdf)

**LEVITA LEHM:** Technisches Merkblatt *Lehmfarbe für innen*, Malching 11/2017

aufgerufen am: 23.08.2019

[https://lehm.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/TechnDatenbl\\_Lehmfarbe.pdf](https://lehm.com/fileadmin/user_upload/downloads/TechnDatenbl_Lehmfarbe.pdf)

**LEVITA LEHM:** Technisches Datenblatt *Lehmplatte L16 / L22*, Malching 04/2018

aufgerufen am: 01.04.2020

[https://lehm.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/TechnDatenbl\\_L16\\_L22.pdf](https://lehm.com/fileadmin/user_upload/downloads/TechnDatenbl_L16_L22.pdf)

**LIPP, Bernhard: Ökobilanz und Ökoindikatoren, Kommentar**  
aufgerufen am: 04.03.2020  
<http://www.nachhaltiges-bauen.jetzt/oekobilanz-und-oeko-indikatoren/>

**LIPP, Bernhard: Nachhaltigkeit massiv, AP06, OI3 Erweiterungen: Bilanzgrenzen, Kennzahlen und Nutzungsdauer, Online-Ausgabe 09/2009**  
aufgerufen am: 04.03.2020  
[http://www.nachhaltigkeit-massiv.at/wp-content/uploads/images-nachhaltigkeit-massiv/AP06\\_IBO\\_LIPP\\_OI3Erweiterung\\_Endbericht.pdf](http://www.nachhaltigkeit-massiv.at/wp-content/uploads/images-nachhaltigkeit-massiv/AP06_IBO_LIPP_OI3Erweiterung_Endbericht.pdf)

**o.A.: Bauproduktekennzeichnung, Nationale Regelung**  
aufgerufen am: 03.04.2020  
<https://www.meta-wissen-holzbau.at/technik/bauproduktekennzeichnung/Wiki/Nationale%20Regelung.aspx>

**o.A.: Das Niedrigenergiehaus**  
aufgerufen am: 21.02.2020  
<https://www.waerme-plus.de/bauratgeber/das-niedrigenergiehaus>

**o.A.: Energiekennzahl**  
aufgerufen am: 24.02.2020  
<https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/einfuehrung/energiekennzahl-725508>

**o.A.: EI Entsorgungsindikator**  
aufgerufen am: 18.03.2020  
<https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/ei-entsorgungsindikator/>

**o.A.: Lehmfarbe**  
aufgerufen am: 23.08.2019  
<https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturfarben-putze/lehmfarbe.html>

**o.A.: Lehmhaus Rauch**  
aufgerufen am: 23.01.2020  
<https://www.architonic.com/de/project/boltshauser-architekten-lehmhaus-rauch/5100620>

**o.A.: Naturton Lehmfarben, Verarbeitungs- und Gebrauchsanweisung**  
aufgerufen am: 23.08.2019  
<https://www.lehmfarben.at/anwendung/>

**o.A.: Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Niedrigstenergiehaus?**  
aufgerufen am: 24.02.2020  
<https://www.wohnet.at/bauen/bauvorbereitung/energiesparhaus-17180>

**o.A.: Ökobilanzen**  
aufgerufen am: 05.03.2020  
<https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekobilanzen/>

**o.A.: Oekoindex OI3, Das Instrument zur ökologischen Optimierung von Gebäuden**  
aufgerufen am: 04.03.2020  
<https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/oekoindex-oi3/>

**o.A.: Ricola Kräuterzentrum**

aufgerufen am: 01.04.2020

<https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?plD=87>

**o.A.: Umweltproduktdeklarationen EPD**

aufgerufen am: 16.03.2020

<https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/umweltproduktdeklarationen-epd/>

**o.A.: Versauerungspotential**

aufgerufen am: 04.03.2020

<https://caala.de/lexikon/ap>

**o.A.: Vorgefertigte Elemente aus Stampflehm**

aufgerufen am: 06.08.2019

<https://www.baunetzwissen.de/gesund-bauen/tipps/news-produkte/vorgefertige-bauteile-aus-stampflehm-3341965>

**o.A.: Wände, Fenster und Decken im Passivhaus**

aufgerufen am: 21.02.2020

<https://www.energiesparhaus.at/gebaeudehuelle/passivhaus/bauteile.htm>

**o.A.: Wirksame Wärmespeicherfähigkeit**

aufgerufen am: 26.02.2020

<https://www.bauwion.de/begriffe/wirksame-waermespeicherfaehigkeit>

**o.A.: Wie die EU vom österreichischen Entsorgungsindikator profitieren kann**

aufgerufen am: 18.03.2020

<https://www.ibo.at/meldungen/detail/data/wie-die-eu-vom-oesterreichischen-entsorgungsindikator-profitieren-kann/>

**PASCHOTTA, Rüdiger: CO<sub>2</sub>-Äquivalente**

aufgerufen am: 03.03.2020

[https://www.energie-lexikon.info/co2\\_aequivalente.html](https://www.energie-lexikon.info/co2_aequivalente.html)

**RAUCH, Peter: Der Feuchtegehalt in Baustoffen, 03/2006**

aufgerufen am: 28.02.2020

<https://www.ib-rauch.de/bautens/formel/feuchtgehalt.html>

**Umweltbundesamt: Klimaschutzbericht, Wien 2019**

aufgerufen am: 09.05.2020

<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0702.pdf>

## Bauteilreferenzen: konventionelle Bauteile

Folgende Bauteilaufbauten wurden als Grundlage für die in Kapitel 1 gezeigten Aufbauten herangezogen:

### Außenwandsysteme

- AW1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99077,99078&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat2](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99077,99078&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat2)
- AW2 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99085,99086&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat2](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99085,99086&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat2)
- AW3 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99089,99090&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat2](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99089,99090&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat2)
- AW4 aufgerufen am: 22.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/aussenwand/variante/kz/awropi05a/nr/6.htm>

### Innenwandsysteme

- IW1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99159,99160&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat5](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99159,99160&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat5)
- IW2 *basiert auf IW1*
- IW3 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/phbtk/index\\_BTR.php?SW=19](https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19)
- WTW1 *basiert auf WTW2*
- WTW2 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/phbtk/index\\_BTR.php?SW=19](https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19)
- WTW3 aufgerufen am: 22.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/trennwand/variante/kz/twrxxo03a/nr/3.htm>
- WTW4 aufgerufen am: 22.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/trennwand/variante/kz/twrxxo07a/nr/6.htm>

### Geschossdecken

- GD1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/phbtk/index\\_BTR.php?URL\\_RECHTS=https%3A%2F%2Fwww.baubook.at%2FBTR%2FPHBK%2FBauteilKategorien.php%3FBTKat%3D3%26SBT%3D99183%2C99184%26SW%3D19](https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?URL_RECHTS=https%3A%2F%2Fwww.baubook.at%2FBTR%2FPHBK%2FBauteilKategorien.php%3FBTKat%3D3%26SBT%3D99183%2C99184%26SW%3D19)
- GD2 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99185,99186&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat3](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99185,99186&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat3)
- GD3 aufgerufen am: 22.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/geschossdecke/variante/kz/gdrnxa07a/nr/1.htm>
- GD4 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/phbtk/index\\_BTR.php?SW=19](https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19)

## **Dächer**

- SD1 aufgerufen am: 22.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/daecher/variante/kz/sdrhzi01a/nr/2.htm>
- FD1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99112,99113&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat4](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99112,99113&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat4)
- FD2 *basiert auf FD1*

## **erdberührte Bauteile**

- KAW1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99125,99126&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat1](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99125,99126&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat1)
- KAW2 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99129,99130&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat1](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99129,99130&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat1)
- F1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99145,99146&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat0](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99145,99146&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat0)
- EGD1 aufgerufen am: 10.01.2020  
[https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win\\_E\\_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99195,99196&Frame=y&backTo=BauteilKategorien\\_BTKat3](https://www.baubook.at/BTR/PHP/Win_E_Ausdruck.php?SW=19&SBT=99195,99196&Frame=y&backTo=BauteilKategorien_BTKat3)
- EGD2 *basiert auf EGD1*

## Bauteilreferenzen: Lehmbauteile

Folgende Referenzbeispiele wurden zur Abschätzung des Schallschutzes der gezeigten Lehmbauteile herangezogen:

### Außenwandsysteme

AW6 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/aussenwand/variante/kz/awropo21a/nr/6/con/nuDataholz/act/bauteilVarianteDatenblatt/la/de/doc.pdf>

### Innenwandsysteme

WTW3 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/trennwand/variante/kz/twrxxo03a/nr/3.htm>

### Geschossdecken

GD1 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/geschossdecke/variante/kz/gdrnxa04a/nr/1.htm>  
GD2/4/5 aufgerufen am: 10.01.2020  
<https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&type=single&uuid=C448FA3B-D21A-471F-4672F643EE4ECA12&bauteilgruppe=decke>  
GD3 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/geschossdecke/variante/kz/gdrnxa08b/nr/1.htm>  
GD6 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/geschossdecke/variante/kz/gdmnxa02/nr/3.htm>

### Dächer

SD1 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/daecher/variante/kz/sdrhzi06a/nr/3.htm>  
FD1 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/flachdach-flachgeneigtes-dach/variante/kz/fdrhbi08b/nr/3.htm>  
FD2 aufgerufen am: 31.01.2020  
<https://www.dataholz.eu/bauteile/flachdach-flachgeneigtes-dach/variante/kz/fdmnko01/nr/1.htm>

Die in Kapitel 3 vorgestellte Kelleraußenwand beruht auf folgendem gebauten Beispiel:

### erdberührte Bauteile

KAW1 aufgerufen am: 10.01.2020  
<https://www.architonic.com/de/project/boltshauser-architekten-lehmhaus-rauch/5100620#&gid=null&pid=35>

## Abbildungsnachweis

<b>Abb.1:</b> <i>U-Werte der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Abb.2:</b> <i>U-Werte der Außenwandsysteme bei einheitlicher Dämmstärke</i>	Autorin
<b>Abb.3:</b> <i>U-Werte einiger Außenwandsysteme ohne WD</i>	Autorin
<b>Abb.4:</b> <i>U-Werte der Dachaufbauten</i>	Autorin
<b>Abb.5:</b> <i>U-Werte der Flachdachaufbauten ohne WD</i>	Autorin
<b>Abb.6:</b> <i>U-Werte der Kelleraußenwände</i>	Autorin
<b>Abb.7:</b> <i>U-Werte der Kelleraußenwände bei einheitlicher Dämmstärke</i>	Autorin
<b>Abb.8:</b> <i>Wärmeträgheit einiger Baustoffe (d=20cm)</i>	Autorin
<b>Abb.9:</b> <i>Energieeffizienzklassen nach Heizwärmebedarf</i>	Autorin, gem. EA
<b>Abb.10:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards (AW)</i>	Autorin
<b>Abb.11:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigenergie-Standards (Dach)</i>	Autorin
<b>Abb.12:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigstenergie-Standards (AW)</i>	Autorin
<b>Abb.13:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Niedrigstenergie-Standards (Dach)</i>	Autorin
<b>Abb.14:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Passivhaus-Standards (AW)</i>	Autorin
<b>Abb.15:</b> <i>benötigtes Maß an Wärmedämmung zur Erfüllung des Passivhaus-Standards (Dach)</i>	Autorin
<b>Abb.16:</b> <i>bewertetes Schalldämm-Maß der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Abb.17:</b> <i>bewertetes Schalldämm-Maß der Geschossdecken</i>	Autorin
<b>Abb.18:</b> <i>Norm-Trittschallpegel der Geschossdecken</i>	Autorin
<b>Abb.19:</b> <i>bewertetes Schalldämm-Maß der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Abb.20:</b> <i>bewertetes Schalldämm-Maß der Dachaufbauten</i>	Autorin
<b>Abb.21:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Abb.22:</b> <i><math>\Delta OI3</math>-Punktebewertung einiger Baustoffe (d = 20cm)</i>	Autorin
<b>Abb.23:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Scheidewände</i>	Autorin
<b>Abb.24:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Abb.25:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Geschossdecken</i>	Autorin
<b>Abb.26:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Dachaufbauten</i>	Autorin
<b>Abb.27:</b> <i><math>OI3_{KON}</math>-Bewertung der Kelleraußenwände</i>	Autorin
<b>Abb.28:</b> <i>Stoffkreislauf des Baustoffs Lehm</i>	SCHROEDER 2010/19, S.27
<b>Abb.29:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Abb.30:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Scheidewände</i>	Autorin
<b>Abb.31:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Abb.32:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Geschossdecken</i>	Autorin
<b>Abb.33:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Dachaufbauten</i>	Autorin
<b>Abb.34:</b> <i><math>EI_{KON}</math>-Bewertung der Kelleraußenwände</i>	Autorin
<b>Abb.35:</b> <i>empfohlene Einbauzeiten einiger Lehmabaustoffe</i>	VOLHARD 1983/13, S.189
<b>Abb.36:</b> <i>Bauteildicken der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Abb.37:</b> <i>Bauteildicken der Scheidewände</i>	Autorin
<b>Abb.38:</b> <i>Bauteildicken der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Abb.39:</b> <i>Bauteildicken der Geschossdecken</i>	Autorin
<b>Abb.40:</b> <i>Bauteildicken der Steildächer</i>	Autorin
<b>Abb.41:</b> <i>Bauteildicken der Flachdächer</i>	Autorin

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	<i>Mindest erforderliche Schalldämmung von Außenbauteilen</i>	OIB-RL 5 2019
<b>Tabelle 2:</b>	<i>Mindest erforderliche Luftschalldämmung zwischen Räumen in Wohnbauten</i>	OIB-RL 5 2019
<b>Tabelle 3:</b>	<i>mindest erforderliches bewertetes Schalldämm-Maß einiger Bauteilgruppen</i>	Autorin, gem. Archiphysik
<b>Tabelle 4:</b>	<i><math>L'_{nT,w}</math>-Grenzwerte für Wohnbauten</i>	OIB-RL 5 2019
<b>Tabelle 5:</b>	<i>maximal zulässiger U-Wert unterschiedlicher Bauteile</i>	OIB-RL 6 2019
<b>Tabelle 6:</b>	<i>Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen</i>	OIB-RL 2 2019
<b>Tabelle 7:</b>	<i>Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen</i>	OIB-RL 2 2019
<b>Tabelle 8:</b>	<i>zulässige Gebäudehöhen in Wien</i>	§75 Abs 2 wr BauO
<b>Tabelle 9:</b>	<i>Bauprodukte und Hersteller</i>	Autorin
<b>Tabelle 10:</b>	<i>gewählte Achsabstände und Querschnitte</i>	Autorin
<b>Tabelle 11:</b>	<i>U-Werte der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 12:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 13:</b>	<i>U-Werte der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Tabelle 14:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Tabelle 15:</b>	<i>U-Werte der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 16:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 17:</b>	<i>voraussichtlicher Trittschallschutz der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 18:</b>	<i>U-Werte der Dachsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 19:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Dachsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 20:</b>	<i>U-Werte der Keller-Außenwände</i>	Autorin
<b>Tabelle 21:</b>	<i>U-Wert des Fundaments</i>	Autorin
<b>Tabelle 22:</b>	<i>U-Werte der Erdgeschossdecken</i>	Autorin
<b>Tabelle 23:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Erdgeschossdecken</i>	Autorin
<b>Tabelle 24:</b>	<i>voraussichtlicher Trittschallschutz der Erdgeschossdecken</i>	Autorin
<b>Tabelle 25:</b>	<i>häufige Zuschlagstoffe</i>	SCHROEDER 2010, S.94
<b>Tabelle 26:</b>	<i>häufige Zusatzstoffe</i>	SCHROEDER 2010, S.94
<b>Tabelle 27:</b>	<i>übliche Rohdichten von Lehmbaustoffen</i>	SCHROEDER 2010, S.134
<b>Tabelle 28:</b>	<i>Brandverhalten von Lehm mit organischen Zuschlägen</i>	SCHROEDER 2010, S.278
<b>Tabelle 29:</b>	<i>Anwendungsklassen von Lehmsteinen</i>	DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.35
<b>Tabelle 30:</b>	<i>gängige Steinformate von Lehmsteinen</i>	SCHROEDER 2010, S.125
<b>Tabelle 31:</b>	<i>Richtwerte üblicher Festigkeitseigenschaften tragender Baustoffe</i>	Autorin

<b>Tabelle 32:</b>	<i>Mindestwandstärken tragender Lehmbauteile</i>	DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, S.50
<b>Tabelle 33:</b>	<i>Rohdichte und spezifische Wärmekapazität von Lehm und Beton</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 34:</b>	<i>übliche Putzuntergründe und ihre Eignung für Lehmputze</i>	ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.45-48
<b>Tabelle 35:</b>	<i>Richtwerte einiger bauphysikalischer Eigenschaften unterschiedlicher Dämmstoffe</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 36:</b>	<i>mögliche Einsatzgebiete einiger Dämmstoffe</i>	Autorin
<b>Tabelle 37:</b>	<i>Öko-Indikatoren einiger Baustoffe</i>	Autorin, gem. Baubook
<b>Tabelle 38:</b>	<i>Bauprodukte und Hersteller</i>	Autorin
<b>Tabelle 39:</b>	<i>gewählte Achsabstände und Querschnitte</i>	Autorin
<b>Tabelle 40:</b>	<i>U-Werte der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 41:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 42:</b>	<i>U-Werte der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Tabelle 43:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Wohnungstrennwände</i>	Autorin
<b>Tabelle 44:</b>	<i>U-Werte der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 45:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 46:</b>	<i>voraussichtlicher Trittschallschutz der Deckensysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 47:</b>	<i>U-Werte der Steildächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 48:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Steildächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 49:</b>	<i>U-Werte der Flachdächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 50:</b>	<i>voraussichtliches Schalldämmvermögen der Flachdächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 51:</b>	<i>bauphysikalische Kennwerte der vorgestellten Bauteilaufbauten</i>	Autorin
<b>Tabelle 52:</b>	<i>Wärmeleitfähigkeit einiger Wärmedämmstoffe</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 53:</b>	<i>Wärmeleitfähigkeit einiger Baustoffe</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 54:</b>	<i>Baustoffkennwerte</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 55:</b>	<i>Speicherwirksame Masse der Außenwandsysteme</i>	Autorin
<b>Tabelle 56:</b>	<i>Speicherwirksame Masse der Dächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 57:</b>	<i>empfohlene U-Werte für Außenwände und Dächer</i>	Autorin
<b>Tabelle 58:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 59:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 60:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 61:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 62:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 63:</b>	<i>notwendige Schichtdicke der Wärmedämmung zur Erreichung von <math>U &lt; 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></i>	Autorin
<b>Tabelle 64:</b>	<i>voraussichtliche Feuerwiderstandsklasse von Lehmbauteilen</i>	DACHVERBAND LEHM e.V. 1999/2009, 98f.

<b>Tabelle 65:</b>	<i>Wasserdampfdiffusionswiderstände einiger Baustoffe</i>	Autorin, gem. Hersteller
<b>Tabelle 66:</b>	<i>volumenbezogener Feuchtegehalt einiger Baustoffe</i>	VOLHARD 1983/2013, S.214 sowie RAUCH 2006
<b>Tabelle 67:</b>	<i>Öko-Indikatoren und ihre Bedeutung</i>	IBO 2017, S.6f.
<b>Tabelle 68:</b>	<i>Öko-Indikatoren einiger Baustoffe</i>	Autorin, gem. Baubook
<b>Tabelle 69:</b>	<i>ΔOI3-Bewertung der Lehmwand L_AW7 bei unterschiedlichem Dämmstoff</i>	Autorin
<b>Tabelle 70:</b>	<i>ΔOI3-Bewertung der Lehmwand L_AW8 bei unterschiedlichem Dämmstoff</i>	Autorin
<b>Tabelle 71:</b>	<i>ΔOI3-Bewertung eines Holz- und Stahlprofils im direkten Vergleich</i>	Autorin
<b>Tabelle 72:</b>	<i>ΔOI3-Bewertung des Steildachs L_SD1 bei unterschiedlichem Dämmstoff</i>	Autorin
<b>Tabelle 73:</b>	<i>Überblick über einige Kriterien zur Entsorgungseinstufung</i>	IBO 2018b, S.5
<b>Tabelle 74:</b>	<i>Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential einiger Baustoffe</i>	Autorin, gem. IBO/Baubook
<b>Tabelle 75:</b>	<i>Herstellungsdauer einiger Lehmbauarbeiten</i>	VOLHARD 1983/2013, S.193 sowie ROEHLEN / ZIEGERT 2010, S.276
<b>Tabelle 76:</b>	<i>Herstellerpreise von Lehmsteinen und Ziegeln</i>	Autorin, gem. Preislisten
<b>Tabelle 77:</b>	<i>Herstellerpreise von Stampflehm und Beton</i>	Autorin, gem. Preislisten
<b>Tabelle 78:</b>	<i>Herstellerpreise einiger Putzsysteme</i>	Autorin, gem. Preislisten
<b>Tabelle 79:</b>	<i>Herstellerpreise einiger Trockenbauplatten</i>	Autorin, gem. Preislisten

# Anhang

## Bauteillisten: konventionelle Bauteile

### Außenwandsysteme

<i>K_AW1: Stahlbetonwand</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Zement-Putz	0,020	2000	1,000	1,13	40,0	30	0,020
EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1,45	3,4	1	5,000
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,430</b>				<b>536,4</b>		<b>5,121</b>
<b>U = 0,189 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 62 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Zement-Putz	0,020	70	2	5	11,4	PENRT 1567 MJ/m <sup>2</sup>	
EPS-Dämmplatte	0,200	50	5	4	40,7	GWP Summe100 116 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Stahlbeton	0,200	100	2	2	60,5	AP 0,318 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,430</b>				<b>113,8</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 77 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 2,3 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>K_AW2: Ziegelmauerwerk, Außendämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Zement-Putz	0,020	2000	1,000	1,13	40,0	30	0,020
EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1,45	3,4	1	5,000
Vollziegel	0,250	740	0,195	1,00	185,0	5	1,282
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,480</b>				<b>241,4</b>		<b>6,316</b>
<b>U = 0,154 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 51 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Zement-Putz	0,020	70	2	5	11,4	PENRT 1549 MJ/m <sup>2</sup>	
EPS-Dämmplatte	0,200	50	5	4	40,7	GWP Summe100 87 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollziegel	0,250	100	2	2	39,9	AP 0,203 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,480</b>				<b>93,3</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 56 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 2,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>K_AW3: Ziegelmauerwerk, Kerndämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Zement-Putz	0,020	2000	1,000	1,13	40,0	30	0,020
Vollziegel	0,250	740	0,195	1,00	185,0	5	1,282
Mineralwolle	0,200	16	0,040	1,03	3,2	1	5,000
Vollziegel n.t.	0,120	820	0,307	1,00	98,4	5	0,391
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,600</b>				<b>339,6</b>		<b>6,707</b>
<b>U = 0,145 W/(m<sup>2</sup>K)</b>							<b>R<sub>w</sub> ca. 56 dB</b>
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Zement-Putz	0,020	70	2	5	11,4	PENRT 1496 MJ/m <sup>2</sup>	
Vollziegel	0,250	100	2	2	39,9	GWP Summe100 100 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Mineralwolle	0,200	50	4	3	25,6	AP 0,305 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollziegel n.t.	0,120	100	2	2	29,1		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,600</b>				<b>107,3</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 70 Pkt./m<sup>2</sup></b>						<b>EI<sub>KON</sub> = 1,7 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>K_AW4: Holzständerwand</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Silikatputz o.Kh.	0,010	1800	0,800	1,10	18,0	20	0,013
HWL-Platte	0,050	370	0,090	2,00	18,5	5	0,556
Mineralwolle zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	16 425	0,040 0,110	1,03 1,60		1 50	
OSB-Platte	0,018	600	0,130	2,10	10,8	200	0,138
Mineralwolle zw. Lattung	0,080 0,080	16 425	0,040 0,110	1,03 1,60		1 50	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,421</b>				<b>82,9</b>		
<b>R'<sub>T</sub> = 8,453; R''<sub>T</sub> = 8,183; R<sub>T</sub> = 8,318; U = 0,120 W/(m<sup>2</sup>K)</b>							<b>R<sub>w</sub> ca. 54 dB</b>
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Silikatputz o.Kh.	0,010	50	2	5	10,9	PENRT 1039 MJ/m <sup>2</sup>	
HWL-Platte	0,050	50	3	4	9,8	GWP Summe100 24 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Mineralwolle zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	50 100	4 1	3 1	28,8 -0,6	AP 0,286 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
OSB-Platte	0,018	60	3	3	10,9		
Mineralwolle zw. Lattung	0,080 0,080	50 100	4 1	3 1	9,7 -0,2		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,421</b>				<b>76,8</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 40 Pkt./m<sup>2</sup></b>						<b>EI<sub>KON</sub> = 2,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

## Innenwandsysteme

<i>K_IW1: Metallständerwand</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	für IW nicht relevant	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10		
Mineralwolle zw. Metallprofil	0,075 0,075	16 7800	0,040 50,000	1,03 0,45		1 100.000		
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10		
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10		
<b>Gesamt</b>	<b>0,120</b>				<b>47,2</b>			
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	PENRT 981 MJ/m <sup>2</sup>		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6,0	GWP Summe100 62 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Mineralwolle zw. Metallprofil	0,075 0,075	50 100	4 2	3 1	9,6 57,6	AP 0,291 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6,0			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3			
<b>Gesamt</b>	<b>0,120</b>				<b>81,8</b>			
							<b>OI3<sub>KON</sub> = 45 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,7 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>K_IW2: Holzständerwand</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	für IW nicht relevant	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10		
Mineralwolle zw. TW Fichte	0,080 0,080	16 425	0,040 0,110	1,03 1,60		1 50		
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10		
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10		
<b>Gesamt</b>	<b>0,125</b>				<b>48,9</b>			
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	PENRT 345 MJ/m <sup>2</sup>		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6,0	GWP Summe100 16 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Mineralwolle zw. TW Fichte	0,080 0,080	50 100	4 1	3 1	9,6 - 0,2	AP 0,075 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6,0			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3			
<b>Gesamt</b>	<b>0,125</b>				<b>24,2</b>			
							<b>OI3<sub>KON</sub> = -12 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,7 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>K_IW3: Ziegelmauerwerk</i>																																										
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]																																			
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	für IW nicht relevant																																			
Vollziegel n.t.	0,120	820	0,307	1,00	98,4	5																																				
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10																																				
<b>Gesamt</b>	<b>0,140</b>				<b>124,4</b>																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>d [m]</th> <th>ND.</th> <th>EE.</th> <th>VP.</th> <th>OI3 [Pkt./m<sup>2</sup>]</th> <th>PENRT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kalk-Gips-Putz</td> <td>0,010</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>1,3</td> <td>360 MJ/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Vollziegel n.t.</td> <td>0,120</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>29,1</td> <td>GWP Summe 100 28 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Kalk-Gips-Putz</td> <td>0,010</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>1,3</td> <td>AP</td> </tr> <tr> <td><b>Gesamt</b></td> <td><b>0,140</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td><b>31,8</b></td> <td>0,113 kg SO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>								Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	360 MJ/m <sup>2</sup>	Vollziegel n.t.	0,120	100	2	2	29,1	GWP Summe 100 28 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	AP	<b>Gesamt</b>	<b>0,140</b>				<b>31,8</b>	0,113 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT																																				
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	360 MJ/m <sup>2</sup>																																				
Vollziegel n.t.	0,120	100	2	2	29,1	GWP Summe 100 28 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>																																				
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	AP																																				
<b>Gesamt</b>	<b>0,140</b>				<b>31,8</b>	0,113 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>																																				
<b>OI3<sub>KON</sub> = -4 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,2 Pkt./m<sup>2</sup></b>																																										

<i>K_WTW1: Stahlbetonwand</i>																																																								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]																																																	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014																																																	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050																																																	
Mineralfaserplatte	0,040	50	0,040	1,03	2,0	1	1,000																																																	
Stahlbeton	0,170	2400	2,300	1,11	408,0	100	0,074																																																	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014																																																	
<b>Gesamt</b>	<b>0,243</b>				<b>446,0</b>		<b>1,152</b>																																																	
<b>U = 0,708 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 62 dB</b>																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>d [m]</th> <th>ND.</th> <th>EE.</th> <th>VP.</th> <th>OI3 [Pkt./m<sup>2</sup>]</th> <th>PENRT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kalk-Gips-Putz</td> <td>0,010</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>1,3</td> <td>805 MJ/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Gipskartonplatte</td> <td>0,0125</td> <td>60</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>GWP Summe 100 72 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Mineralfaserplatte</td> <td>0,040</td> <td>50</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3,5</td> <td>AP</td> </tr> <tr> <td>Stahlbeton</td> <td>0,170</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>51,4</td> <td>0,185 kg SO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Kalk-Gips-Putz</td> <td>0,010</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>1,3</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Gesamt</b></td> <td><b>0,243</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td><b>63,5</b></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	805 MJ/m <sup>2</sup>	Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	GWP Summe 100 72 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	Mineralfaserplatte	0,040	50	2	3	3,5	AP	Stahlbeton	0,170	100	2	2	51,4	0,185 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		<b>Gesamt</b>	<b>0,243</b>				<b>63,5</b>	
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT																																																		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	805 MJ/m <sup>2</sup>																																																		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	GWP Summe 100 72 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>																																																		
Mineralfaserplatte	0,040	50	2	3	3,5	AP																																																		
Stahlbeton	0,170	100	2	2	51,4	0,185 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>																																																		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3																																																			
<b>Gesamt</b>	<b>0,243</b>				<b>63,5</b>																																																			
<b>OI3<sub>KON</sub> = 27 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>																																																								

<i>K_WTW2: Ziegelmauerwerk</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Mineralfaserplatte	0,060	50	0,040	1,03	3,0	1	1,500
Vollziegel	0,250	740	0,195	1,00	185,0	5	1,282
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,343</b>				<b>224,0</b>		<b>2,860</b>
<b>U = 0,321 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 59 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	PENRT 818 MJ/m <sup>2</sup> GWP Summe100 62 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> AP 0,233 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6		
Mineralfaserplatte	0,060	50	2	3	5,2		
Vollziegel	0,250	100	2	2	54,8		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,343</b>				<b>68,7</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 32 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,6 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>K_WTW3: Holzständerwand, GK</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 425	0,040 0,110	2,00 1,60		1 50	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Mineralwolle	0,020	16	0,040	1,03	0,3	1	0,500
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 425	0,040 0,110	2,00 1,60		1 50	
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,315</b>				<b>100,8</b>		
<b>R'<sub>T</sub> = 5,713; R''<sub>T</sub> = 5,613; R<sub>T</sub> = 5,663; U = 0,177 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 58 dB</b>							

K_WTW3: Holzständerwand, GK						
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	PENRT 790 MJ/m <sup>2</sup>  GWP Summe100 23 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>  AP 0,175 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	6,4 - 0,2	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Mineralwolle	0,020	50	4	3	2,6	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	6,4 - 0,2	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	
<b>Gesamt</b>	<b>0,315</b>				<b>53,5</b>	

**OI<sub>KON</sub> = 17 Pkt./m<sup>2</sup>**  
**EI<sub>KON</sub> = 1,5 Pkt./m<sup>2</sup>**

K_WTW4: Holzständerwand, GK, OSB							
Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	μ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
OSB-Platte	0,015	600	0,130	1,70	9,0	200	0,115
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 425	0,040 0,110	2,00 1,60		1 50	
OSB-Platte	0,015	600	0,130	1,70	9,0	200	0,115
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Mineralwolle	0,020	16	0,040	1,03	0,3	1	0,500
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
OSB-Platte	0,015	600	0,130	1,70	9,0	200	0,115
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 425	0,040 0,110	2,00 1,60		1 50	
OSB-Platte	0,015	600	0,130	1,70	9,0	200	0,115
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10,0	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				<b>116,8</b>		

**R<sub>T</sub>' = 6,092; R<sub>T</sub>" = 5,975; R<sub>T</sub> = 6,034; U = 0,166 W/(m<sup>2</sup>K)**  
**R<sub>w</sub> ca. 59 dB**

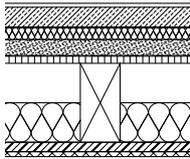
K_WTW4: Holzständerwand, GK, OSB						
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	PENRT 1213 MJ/m <sup>2</sup>  GWP Summe100 -13 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>  AP 0,296 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
OSB-Platte	0,015	60	3	3	9,1	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	6,4 - 0,2	
OSB-Platte	0,015	60	3	3	9,1	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Mineralwolle	0,020	50	4	3	2,6	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
OSB-Platte	0,015	60	3	3	9,1	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	6,4 - 0,2	
OSB-Platte	0,015	60	3	3	9,1	
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6	
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3	
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				<b>77,7</b>	
						OI3 <sub>KON</sub> = 41 Pkt./m <sup>2</sup> EI <sub>KON</sub> = 1,6 Pkt./m <sup>2</sup>

### Geschossdecken

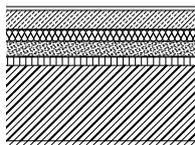
K_GD1: Stahlbetondecke									
Material	d [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	μ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]		
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.	U = 0,836 W/(m <sup>2</sup> K) R <sub>w</sub> ca. 66 dB L <sub>n,w</sub> ca. 37 dB	
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038		
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.		
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857		
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087		
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014		
<b>Gesamt</b>	<b>0,300</b>				<b>595,0</b>		<b>0,996</b>		
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]				PENRT 1424 MJ/m <sup>2</sup>  GWP Summe100 110 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>  AP 0,404 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9				
Zementestrich	0,050	50	3	4	18,3				
Trennl. Kunststoff	0,0001	50	3	5	1,4				
Mineralwolle TSD	0,030	50	4	3	16,3				
Stahlbeton	0,200	100	2	2	60,5				
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3				
<b>Gesamt</b>	<b>0,300</b>				<b>119,7</b>				
						OI3 <sub>KON</sub> = 83 Pkt./m <sup>2</sup> EI <sub>KON</sub> = 0,8 Pkt./m <sup>2</sup>			

<i>K_GD2: Ziegelhohlkörperdecke</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.	
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038	
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.	
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857	
Splittschüttung l.z.g.	0,040	1800	0,700	1,00	72,0	6	0,057	
Ziegelhohlkörper	0,200	1135	0,670	0,92	227,0	8	0,299	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014	
<b>Gesamt</b>	<b>0,340</b>				<b>414,0</b>		<b>1,265</b>	
<b>U = 0,683 W/(m<sup>2</sup>K)</b>								
<b>R<sub>w</sub> ca. 62 dB</b>								
<b>L<sub>n,w</sub> ca. 44 dB</b>								
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9	PENRT 1265 MJ/m <sup>2</sup>  GWP Summe100 84 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>  AP 0,357 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Zementestrich	0,050	50	3	4	18,3			
Trennl. Kunststoff	0,0001	50	3	5	1,4			
Mineralwolle TSD	0,030	50	4	3	16,3			
Splittschütt. l.z.g.	0,040	50	2	1	2,2			
Ziegelhohlkörper	0,200	100	2	2	42,4			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3			
<b>Gesamt</b>	<b>0,340</b>				<b>103,8</b>			
<b>OI3<sub>KON</sub> = 67 Pkt./m<sup>2</sup></b>								
<b>EI<sub>KON</sub> = 0,8 Pkt./m<sup>2</sup></b>								

<i>K_GD3: Holzbalkendecke</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857
Schüttung lose	0,040	1800	0,700	1,00	72,0	1	0,057
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
OSB-Platte	0,018	600	0,130	1,70	10,8	200	0,138
Mineralwolle zw.	0,100	16	0,040	1,03		1	
TW Fichtenholz	0,200	425	0,110	1,60		50	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,395</b>				<b>223,9</b>		
$R_T^i = 4,180$ ; $R_T^u = 4,039$ ; $R_T = 4,110$ ; $U = 0,243$ W/(m <sup>2</sup> K) $R_w$ ca. 70 dB $L_{n,w}$ ca. 41 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Zementestrich	0,050	50	3	4	18,3		
Trennl. Kunststoff	0,0001	50	3	5	1,4		
Mineralwolle TSD	0,030	50	4	3	16,3	PENRT 1157 MJ/m <sup>2</sup>	
Schüttung lose	0,040	100	2	1	1,1	GWP Summe100 24 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	AP 0,350 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
OSB-Platte	0,018	60	3	3	10,9		
Mineralwolle zw.	0,100	50	4	3	12,1		
TW Fichtenholz	0,200	100	1	1	- 0,4		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,395</b>				<b>89,3</b>		
$OI3_{KON} = 52$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 1,3$ Pkt./m <sup>2</sup>							



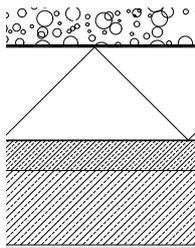
K_GD4: Brettstapeldecke							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857
Schüttung lose	0,040	1800	0,700	1,00	72,0	1	0,057
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Brettstapelement	0,200	500	0,130	1,60	100,0	50	1,538
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,353</b>				<b>297,0</b>		<b>2,554</b>
							<b>U = 0,363 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 59 dB</b> <b>L<sub>n,w</sub> ca. 51 dB</b>
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9	PENRT 976 MJ/m <sup>2</sup> GWP Summe100 - 96 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> AP 0,305 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Zementestrich	0,050	50	3	4	18,3		
Trennl. Kunststoff	0,0001	50	3	5	1,4		
Mineralwolle TSD	0,030	50	4	3	16,3		
Schüttung lose	0,040	100	2	1	1,1		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Brettstapelement	0,200	100	1	1	- 9,3		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,353</b>				<b>57,2</b>		
							<b>OI3<sub>KON</sub> = 20 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,7 Pkt./m<sup>2</sup></b>



## Dachaufbauten

<i>K_SD1: Holzsparrendach</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Betondachstein	0,020	2150	1,7	1,00	43	100	n.b.
Lattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,500	0,79	n.b.	26	n.b.
Holzfaser WD	0,020	230	0,050	2,10	4,6	5	0,400
Mineralwolle zw. Dachbalken Fichte	0,240 0,240	16 425	0,040 0,110	1,03 1,6		1 50	
Dampfbremse	0,0002	1000	0,170	1,50	n.b.	20.000	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,6	10,2	50	0,218
Gipskartonplatte	0,0125	800	0,250	1,05	10	10	0,050
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1	13	10	0,014
<b>Gesamt</b>	<b>0,427</b>				<b>94,0</b>		
$R'_T = 6,339$ ; $R''_T = 6,252$ ; $R_T = 6,296$ ; <b>U = 0,159 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 59 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Betondachstein	0,020	80	1	1	13,9		
Lattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Konterlattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Unterdeckbahn	0,0001	50	3	3	0,3	PENRT 847 MJ/m <sup>2</sup>	
Holzfaser WD	0,020	50	4	3	9,4	GWP Summe100 18 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Mineralwolle zw. Dachbalken Fichte	0,240 0,240	50 100	4 1	3 1	28,8 - 0,6	AP 0,224 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Dampfbremse	0,0002	50	3	5	0,9		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Gipskartonplatte	0,0125	60	4	3	6,0		
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,427</b>				<b>61,1</b>		
$OI3_{KON} = 24$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 1,6$ Pkt./m <sup>2</sup>							

<i>K_FD1: Stahlbeton-Warmdach</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Kies	0,100	1600	0,470	0,84	160,0	50	n.b.	
Vlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.	
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.	
Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	1,50	n.b.	20.000	n.b.	
EPS-Dämmplatte	0,250	17	0,040	1,45	4,3	1	6,250	
Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	1,50	n.b.	20.000	n.b.	
Gefällebeton	0,080	1600	0,980	1,08	128,0	100	0,082	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014	
<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>				<b>785,3</b>		<b>6,433</b>	
<b>U = 0,152 W/(m<sup>2</sup>K)</b>								
<b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>								
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Kies	0,100	100	2	1	1,8			
Vlies PP	0,0001	50	3	3	0,3			
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	11,4	PENRT 1971 MJ/m <sup>2</sup>		
Trennlage PE	0,0001	50	3	5	1,5	GWP Summe100 128 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
EPS-Dämmplatte	0,250	50	5	4	50,9	AP 0,375 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Trennlage PE	0,0001	50	3	5	1,5			
Gefällebeton	0,080	100	2	2	7,8			
Stahlbeton	0,200	100	2	2	60,5			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3			
<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>				<b>137,0</b>			
<b>OI3<sub>KON</sub> = 100 Pkt./m<sup>2</sup></b>								
<b>EI<sub>KON</sub> = 2,9 Pkt./m<sup>2</sup></b>								



<i>K_FD2: Stahlbeton-Umkehrdach</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Kies	0,100	1600	0,470	0,84	160,0	50	n.b.	
Vlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.	
XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	1,50	7,5	200	7,143	
Trennlage PE	0,0001	1000	0,170	1,50	n.b.	20.000	n.b.	
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.	
Gefällebeton	0,080	1600	0,980	1,08	128,0	100	0,082	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014	
<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>				<b>788,5</b>		<b>7,326</b>	
						<b>U = 0,134 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>		
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Kies	0,100	100	2	1	1,8	PENRT 3205 MJ/m <sup>2</sup>		
Vlies PP	0,0001	50	3	3	0,3			
XPS-Dämmplatte	0,250	40	4	4	132,6	GWP Summe100 185 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Trennlage PE	0,0001	50	3	5	1,5			
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	11,4	AP 0,595 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Gefällebeton	0,080	100	2	2	7,8			
Stahlbeton	0,200	100	2	2	60,5			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3			
<b>Gesamt</b>	<b>0,642</b>				<b>217,1</b>			
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 180 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 3,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>		

## Erdberührte Bauteile

<i>K_KAW1: Stahlbetonwand</i>									
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]		
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.		
bit. Drain. EPS	0,080	20	1,000	1,45	1,6	1	0,080		
XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	1,50	7,5	200	7,143		
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.		
Stahlbeton	0,300	2300	1,500	1,00	720,0	10	0,130		
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014		
<b>Gesamt</b>	<b>0,640</b>				<b>742,1</b>		<b>7,368</b>		
<b>U = 0,133 W/(m<sup>2</sup>K)</b>									
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]				
Filtervlies PP	0,0001	50	3	3	0,3	PENRT 3587 MJ/m <sup>2</sup>			
bit. Drain. EPS	0,080	40	4	5	18,5				
XPS-Dämmplatte	0,250	40	4	4	132,6	GWP Summe100 214 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>			
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	1,4				
Stahlbeton	0,300	100	2	2	90,7	AP 0,671 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>			
Kalk-Gips-Putz	0,010	100	2	5	1,3				
<b>Gesamt</b>	<b>0,640</b>				<b>244,8</b>				
<b>OI3<sub>KON</sub> = 208 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 4,5 Pkt./m<sup>2</sup></b>									

<i>K_KAW2: Ziegelmauerwerk</i>									
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]		
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.		
bit. Drain. EPS	0,080	20	1,000	1,45	1,6	1	0,080		
XPS-Dämmplatte	0,250	30	0,035	1,50	7,5	200	7,143		
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.		
Vollziegel	0,300	760	0,152	1,00	228,0	5	1,974		
Zement-Putz	0,020	2000	1,000	1,13	40,0	30	0,020		
<b>Gesamt</b>	<b>0,650</b>				<b>277,1</b>		<b>9,217</b>		
<b>U = 0,107 W/(m<sup>2</sup>K)</b>									
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]				
Filtervlies PP	0,0001	50	3	3	0,3	PENRT 3424 MJ/m <sup>2</sup>			
bit. Drain. EPS	0,080	40	4	5	18,5				
XPS-Dämmplatte	0,250	40	4	4	132,6	GWP Summe100 166 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>			
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	1,4				
Vollziegel	0,300	100	2	2	49,2	AP 0,493 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>			
Zement-Putz	0,020	100	2	5	5,7				
<b>Gesamt</b>	<b>0,650</b>				<b>207,6</b>				
<b>OI3<sub>KON</sub> = 171 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 4,6 Pkt./m<sup>2</sup></b>									

<i>K_F1: Stahlbetonfundament</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038	
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.	
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087	
DS Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.	
XPS-Dämmplatte	0,200	30	0,035	1,50	6,0	200	5,714	
Trennlage PE	0,0001	220	0,170	1,50	n.b.	40	n.b.	
Beton unbewehrt	0,050	1600	0,980	1,08	80,0	100	0,051	
Baupapier	0,0001	500	0,170	700,00	n.b.	5900	n.b.	
Rollierung Kies	0,200	1800	0,700	1,00	n.b.	2	n.b.	
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.	
<b>Gesamt</b>	<b>0,530</b>				<b>667,8</b>		<b>6,747</b>	
<b>U = 0,145 W/(m<sup>2</sup>K)</b>								

<i>K_EGD1: Stahlbetondecke</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.	
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038	
Trennlage Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.	
EPS-Dämmplatte	0,030	17	0,040	1,45	0,5	1	0,750	
EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1,45	3,4	1	5,000	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087	
<b>Gesamt</b>	<b>0,490</b>				<b>583,8</b>		<b>5,875</b>	
<b>U = 0,161 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 65 dB</b> <b>L<sub>n,w</sub> ca. 35 dB</b>								

<i>K_EGD2: Stahlbetondecke</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.	
Zementestrich	0,050	2000	1,330	1,08	100,0	50	0,038	
Trennl. Kunststoff	0,0001	1400	0,200	1,40	n.b.	100.000	n.b.	
Mineralwolle TSD	0,030	68	0,035	1,03	2,0	1	0,857	
Stahlbeton	0,200	2400	2,300	1,11	480,0	100	0,087	
EPS-Dämmplatte	0,200	17	0,040	1,45	3,4	1	5,000	
Kalk-Gips-Putz	0,010	1300	0,700	1,00	13,0	10	0,014	
<b>Gesamt</b>	<b>0,500</b>				<b>598,4</b>		<b>5,996</b>	
<b>U = 0,158 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b> <b>L<sub>n,w</sub> ca. 37 dB</b>								

# Bauteillisten: Lehmbauteile

## Außenwandsysteme

<i>L_AW1: Stampflehwand, Innendämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Stampflehm	1,000	2300	1,500	1,00	2300,0	10	0,667
Schilfdämmplatte	0,150	190	0,056	1,60	28,5	1	2,679
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>1,180</b>				<b>2388,5</b>		<b>3,373</b>
<b>U = 0,282 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT 966 MJ/m <sup>2</sup>	
Stampflehm	1,000	100	2	1	62,6	GWP Summe100 6 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Schilfdämmplatte	0,150	50	3	2	- 2,0	AP	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	0,217 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>1,180</b>				<b>62,3</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 25 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,0 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW2-1: Stampflehwand, Schilfdämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Schilfdämmplatte	0,120	190	0,056	1,60	22,8	1	2,143
Stampflehm	1,000	2300	1,500	1,00	2300,0	10	0,667
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				<b>2355,3</b>		<b>2,840</b>
<b>U = 0,332 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT 1065 MJ/m <sup>2</sup>	
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	GWP Summe100 27 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Schilfdämmplatte	0,120	50	3	2	- 1,6	AP	
Stampflehm	1,000	100	2	1	62,6	0,240 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				<b>72,1</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 35 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,9 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW2-2: Stampflehwand, Holzfaserdämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Holzfaserdämmung	0,120	230	0,050	2,10	27,6	5	2,400
Stampflehm	1,000	2300	1,500	1,00	2300,0	10	0,667
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				<b>2360,1</b>		<b>3,097</b>
<b>U = 0,306 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT 1807 MJ/m <sup>2</sup>	
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	GWP Summe100 64 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Holzfaserdämmung	0,120	50	4	3	56,4		
Stampflehm	1,000	100	2	1	62,6		
<b>Gesamt</b>	<b>1,145</b>				<b>130,1</b>	AP 0,443 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>OI3<sub>KON</sub> = 93 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,3 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW3-1: Lehmsteinmauerwerk, Schilfdämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Schilfdämmplatte	0,100	190	0,056	1,60	19,0	1	1,786
Lehmstein schwer	1,500	1800	1,100	1,00	2700,0	10	1,364
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>				<b>2811,5</b>		<b>3,207</b>
<b>U = 0,296 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]	PENRT 1206 MJ/m <sup>2</sup>	
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	GWP Summe100 39 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Schilfdämmplatte	0,100	50	3	2	- 1,3		
Lehmstein schwer	1,500	100	2	1	68,7		
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	AP 0,250 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>				<b>80,2</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 43 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,2 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW3-2: Lehmsteinmauerwerk, Holzfaserdämmung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Holzfaserdämmung	0,100	230	0,050	2,10	23,0	5	2,000
Lehmstein schwer	1,500	1800	1,100	1,00	2700,0	10	1,364
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>				<b>2815,5</b>		<b>3,421</b>
<b>U = 0,278 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 66 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT 1824 MJ/m <sup>2</sup>	
Holzfaserdämmung	0,100	50	4	3	47,0	GWP Summe100 70 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmstein schwer	1,500	100	2	1	68,7	AP 0,419 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7		
<b>Gesamt</b>	<b>1,655</b>				<b>128,5</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 92 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,5 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW4: Holzständerwand, Lehmsteinausfachung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Hanfdämmung AW	0,080	100	0,042	1,70	8,0	3,9	1,905
Leichtlehmstein zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	800 425	0,250 0,110	1,00 1,60		10 50	
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>0,375</b>				<b>287,1</b>		
<b>R<sub>T</sub>' = 3,145; R<sub>T</sub>" = 3,126; R<sub>T</sub> = 3,136; U = 0,319 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 54 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT 893 MJ/m <sup>2</sup>	
Hanfdämmung AW	0,080	50	3	3	12,7	GWP Summe100 - 4 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Leichtlehmstein zw. TW Fichtenholz	0,240 0,240	100 100	2 1	1 1	30,1 - 0,6	AP 0,194 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7		
<b>Gesamt</b>	<b>0,375</b>				<b>55,0</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 18 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,6 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW5-1: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Schilfdämmung</i>							
Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m²]	μ [-]	R [m²K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Schilfdämmplatte	0,035	190	0,056	1,60	6,65	1	0,625
Schilfdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240	190	0,056	1,60		1	
TW Fichtenholz	0,240	425	0,110	1,60		50	
Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	1,00	207,0	10	0,105
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>				<b>355,1</b>		
$R'_T = 5,040$ ; $R''_T = 5,008$ ; $R_T = 5,024$ ; $U = 0,199$ W/(m²K) $R_w$ ca. 57 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m²]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT	
Schilfdämmplatte	0,035	50	3	2	- 0,5	364 MJ/m²	
Schilfdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240	50	3	2	- 3,0	GWP Summe100	
TW Fichtenholz	0,240	100	1	1	- 0,6	- 68 kg CO <sub>2</sub> eq./m²	
Lehmstein schwer	0,115	100	2	1	5,3	AP	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	0,098 kg SO <sub>2</sub> eq./m²	
<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>				<b>13,9</b>		
$OI3_{KON} = - 22$ Pkt./m² $EI_{KON} = 1,0$ Pkt./m²							

<i>L_AW5-2: Holzständerwand, Lehmstein-Vorsatzschale, Holzfaserdämmung</i>							
Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m²]	μ [-]	R [m²K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Holzfaserdämmung	0,035	230	0,050	2,10	8,05	5	0,700
Holzfaserdämmung zwischen TW Fichtenholz	0,240	230	0,050	2,10		5	
TW Fichtenholz	0,240	425	0,110	1,60		50	
Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	1,00	207,0	10	0,105
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>				<b>365,6</b>		
$R'_T = 5,560$ ; $R''_T = 5,510$ ; $R_T = 5,535$ ; $U = 0,181$ W/(m²K) $R_w$ ca. 57 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m²]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT	
Holzfaserdämmung	0,035	50	4	3	16,5	1975 MJ/m²	
Schilfdämmplatte zwischen TW Fichtenholz	0,240	50	4	3	106,1	GWP Summe100	
TW Fichtenholz	0,240	100	1	1	- 0,6	13 kg CO <sub>2</sub> eq./m²	
Lehmstein schwer	0,115	100	2	1	5,3	AP	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	0,539 kg SO <sub>2</sub> eq./m²	
<b>Gesamt</b>	<b>0,445</b>				<b>139,9</b>		
$OI3_{KON} = 103$ Pkt./m² $EI_{KON} = 1,7$ Pkt./m²							

<i>L_AW6: Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Hanfdämmplatte	0,020	100	0,042	1,70	2,0	3,9	0,476
Hanfdämmplatte zw TW Fichtenholz	0,240	100	0,042	1,70		3,9	
	0,240	425	0,110	1,60		50	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,020	2000	1,100	1,00	40,0	10	0,019
<b>Gesamt</b>	<b>0,321</b>				<b>114,4</b>		
$R_T^+ = 6,100$ ; $R_T^- = 6,026$ ; $R_T = 6,063$ ; <b>U = 0,165 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 51 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT 842 MJ/m <sup>2</sup>	GWP Summe100 3 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Hanfdämmplatte	0,020	50	3	3	3,2		
Hanfdämmplatte zw TW Fichtenholz	0,240	50	3	3	35,7	AP 0,197 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
	0,240	100	1	1	- 0,6		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,020	100	2	2	1,1		
<b>Gesamt</b>	<b>0,321</b>				<b>54,9</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 18 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,2 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW7: Stahlbetonskelett, Stampflehm-Ausfachung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Holzfaserdämmung	0,200	230	0,050	2,10	46,0	5	4,000
Stampflehm zw. Stahlbetonstützen	0,200	2300	1,500	1,00		10	
	0,200	2400	2,300	1,11		100	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>565,2</b>		
$R_T^+ = 4,456$ ; $R_T^- = 4,454$ ; $R_T = 4,455$ ; <b>U = 0,224 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 63 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT 1758 MJ/m <sup>2</sup>	GWP Summe100 34 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>
Holzfaserdämmung	0,200	50	4	3	94,0		
Stampflehm zw. Stahlbetonstützen	0,200	100	2	1	10,5	AP 0,465 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
	0,200	100	2	2	6,1		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>126,3</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = 89 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>							

<i>L_AW8: Stahlbetonskelett, Leichtlehmstein-Ausfachung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kalkputz	0,025	1300	0,830	1,00	32,5	10	0,030
Holzfaserdämmung	0,200	230	0,050	2,10	46,0	5	4,000
LLST zw. Stahlbetonstützen	0,200 0,200	800 2400	0,250 2,300	1,00 1,11		10 100	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>295,2</b>		
$R'_T = 5,047$ ; $R''_T = 4,767$ ; $R_T = 4,907$ ; <b>U = 0,204 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 52 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kalkputz	0,025	80	2	3	11,1	PENRT 2021 MJ/m <sup>2</sup>	
Holzfaserdämmung	0,200	50	4	3	94,0	GWP Summe100 21 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
LLST zw. Stahlbetonstützen	0,200 0,200	100 100	2 2	1 2	24,1 6,1	AP 0,518 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>139,8</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 103 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

### Innenwandsysteme

<i>L_IW1: Stampflehmwand</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Stampflehm	0,240	2300	1,500	1,00	552,0	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,240</b>				<b>552,0</b>		f. W nicht relev.
<b>U = 0,204 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 52 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Stampflehm	0,240	100	2	1	15,0	PENRT 210 MJ/m <sup>2</sup>	
						GWP Summe100 12 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>0,240</b>				<b>15,0</b>	AP 0,045 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
						<b>OI3<sub>KON</sub> = - 21 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,1 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>L_IW2: Holzständerwand, Leichtlehmschüttung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	für IW nicht relevant
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	
Leichtlehmschütt. zwischen TW Fichte	0,100	270	0,060	1,00		10	
	0,100	425	0,110	1,60		50	
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,166</b>				<b>149,0</b>		
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	PENRT 131 MJ/m <sup>2</sup>	
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1	GWP Summe100 - 6 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Leichtlehmschütt. zwischen TW Fichte	0,100	100	2	1	4,5	AP 0,031 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
	0,100	100	1	1	- 0,2		
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7		
<b>Gesamt</b>	<b>0,166</b>				<b>7,5</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = - 28 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,1 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

<i>L_IW3: Lehmsteinmauerwerk</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	für IW nicht relevant
Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	1,00	207,0	10	
Lehmputz	0,030	2000	1,100	1,00	60,0	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,175</b>				<b>327,0</b>		
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	PENRT 127 MJ/m <sup>2</sup>	
Lehmstein schwer	0,115	100	2	1	5,3	GWP Summe100 4 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmputz	0,030	100	2	2	1,7	AP 0,028 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>0,175</b>				<b>8,6</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = - 27 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,1 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

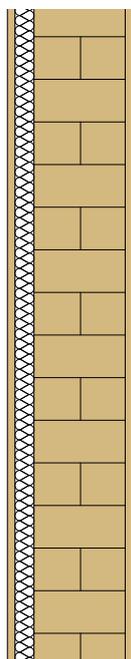
L_IW4: Holzständerwand, Hanfdämmung, Lehmputz							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	für IW nicht relevant
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100	38	0,042	2,30		2	
	0,100	425	0,110	1,60		50	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	
<b>Gesamt</b>	<b>0,142</b>				<b>48,1</b>		
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3	PENRT 351 MJ/m <sup>2</sup>	
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100	50	3	3	12,4	GWP Summe100 6 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
	0,100	100	1	1	-0,2		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4	AP 0,066 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,142</b>				<b>21,5</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = - 14 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,5 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

L_WTW1: Holzständerwand, Lehmstein-Ausfachung							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	1,80		3	
	0,100	425	0,110	1,60		50	
LAB-Platte	0,016	1600	0,353	1,00	25,6	10	0,045
Lehmstein schwer	0,115	1800	1,100	1,00	207,0	10	0,105
LAB-Platte	0,016	1600	0,353	1,00	25,6	10	0,045
Zellulosefaser zwischen TW Fichtenholz	0,100	45	0,037	1,80		3	
	0,100	425	0,110	1,60		50	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,389</b>				<b>312,6</b>		
$R'_T = 5,789$ ; $R''_T = 5,720$ ; $R_T = 5,755$ ; <b>U = 0,174 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 60 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100	50	3	3	5,8	PENRT 648 MJ/m <sup>2</sup>	
	0,100	100	1	1	-0,2		
Lehmausbau-Platte	0,016	50	2	1	10,0	GWP Summe100 8 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmstein schwer	0,115	100	2	1	5,3		
Lehmausbau-Platte	0,016	50	2	1	10,0	AP 0,172 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100	50	3	3	5,8		
	0,100	100	1	1	-0,2		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,389</b>				<b>45,9</b>		
						$OI3_{KON} = 9$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 1,0$ Pkt./m <sup>2</sup>	

L_WTW2: Holzständerwand, Lehmschüttung							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	45 425	0,037 0,110	1,80 1,60		3 50	
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmschüttung	0,100	1100	0,470	1,00	110,0	10	0,213
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	45 425	0,037 0,110	1,80 1,60		3 50	
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,348</b>				<b>165,6</b>		
$R'_T = 5,916$ ; $R''_T = 5,840$ ; $R_T = 5,878$ ; <b><math>U = 0,170</math> W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 50 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	5,8 - 0,2	PENRT 314 MJ/m <sup>2</sup>	
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1	GWP Summe100 - 4 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmschüttung	0,100	100	2	1	3,0		
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1	AP 0,102 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	5,8 - 0,2		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,348</b>				<b>23,5</b>		
$OI3_{KON} = - 12$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 1,0$ Pkt./m <sup>2</sup>							

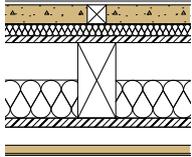
L_WTW3: Holzständerwand, Lehmplatten									
Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m²]	μ [-]	R [m²K/W]		
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005		
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123		
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	45 425	0,037 0,110	1,80 1,60		3 50			
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	1,00	35,2	10	0,062		
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	1,00	35,2	10	0,062		
Glaswolle Akustik	0,020	45	0,035	1,03	0,9	1	0,571		
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	1,00	35,2	10	0,062		
Lehm-Ausbauplatte	0,022	1600	0,353	1,00	35,2	10	0,062		
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	45 425	0,037 0,110	1,80 1,60		3 50			
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123		
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005		
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				<b>196,1</b>				
$R'_T = 6,448$ ; $R''_T = 6,346$ ; $R_T = 6,397$ ; $U = 0,156 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $R_w \text{ ca. } 58 \text{ dB}$									
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m²]				
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3	PENRT 1182 MJ/m² GWP Summe100 23 kg CO₂ eq./m² AP 0,297 kg SO₂ eq./m²			
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4				
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	5,8 - 0,2				
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	2	1	13,7				
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	2	1	13,7				
Glaswolle Akustik	0,020	50	4	3	7,2				
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	2	1	13,7				
Lehm-Ausbauplatte	0,022	50	2	1	13,7				
Zellulosefaser zw. TW Fichtenholz	0,100 0,100	50 100	3 1	3 1	5,8 - 0,2				
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4				
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3				
<b>Gesamt</b>	<b>0,350</b>				<b>82,8</b>				
								$OI3_{KON} = 46 \text{ Pkt./m}^2$ $EI_{KON} = 1,1 \text{ Pkt./m}^2$	

L_WTW4: Lehmsteinmauerwerk							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lehmputz	0,020	2000	1,100	1,00	40,0	10	0,018
Hanfdämmung	0,050	38	0,042	2,30	1,9	2	1,190
Lehmstein schwer	0,240	1800	1,100	1,00	432,0	10	0,218
Lehmputz	0,020	2000	1,100	1,00	40,0	10	0,018
<b>Gesamt</b>	<b>0,330</b>				<b>513,9</b>		<b>1,444</b>
<b>U = 0,587 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 62 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Lehmputz	0,020	100	2	2	1,1	PENRT 302 MJ/m <sup>2</sup>	
Hanfdämmung	0,050	50	3	3	6,5	GWP Summe100 12 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmstein schwer	0,240	100	2	1	11,0	AP	
Lehmputz	0,020	100	2	2	1,1	0,058 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<b>Gesamt</b>	<b>0,330</b>				<b>19,7</b>		
<b>OI3<sub>KON</sub> = - 16 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,4 Pkt./m<sup>2</sup></b>							



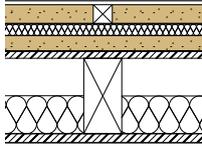
## Geschossdecken

<i>L_GD1: Holzbalkendecke, Lehmestrich</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	425 1800	0,110 0,910	1,60 1,00		50 10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	2,10	4,8	5	0,714
Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	1,60	7,7	50	0,164
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100 0,200	38 425	0,042 0,110	2,30 1,60		2 50	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	1,60	20,4	50	0,436
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>				<b>135,5</b>		
$R'_T = 5,929$ ; $R''_T = 5,670$ ; $R_T = 5,799$ ; <b><math>U = 0,172</math> W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 66 dB $L_{n,w}$ ca. 53 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	60 100	1 2	1 1	0,1 2,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	PENRT 778 MJ/m <sup>2</sup>	
TSD Holzfaserplatte	0,030	50	4	3	9,8		
Vollschalung Fichte	0,018	60	1	1	0,5	GWP Summe100 - 21 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100 0,200	50 100	3 1	3 1	12,4 - 0,4	AP 0,222 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Lattung Fichte	0,048	60	1	1	0,0		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>				<b>52,1</b>		
$OI3_{KON} = 15$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 0,7$ Pkt./m <sup>2</sup>							



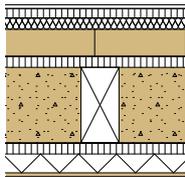
<i>L_GD2: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmsteinausfachung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	425 1800	0,110 0,910	1,60 1,00		50 10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	2,10	4,8	5	0,714
Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	1,60	7,7	50	0,164
Lehmstein zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	1800 425	1,100 0,110	1,00 1,60		10 50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	1,60	20,4	50	0,436
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>				<b>473,7</b>		
$R'_T = 3,637$ ; $R''_T = 3,450$ ; $R_T = 3,544$ ; <b>U = 0,282 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_{w,w}$ ca. 78 dB $L_{n,w}$ ca. 37 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	60 100	1 2	1 1	0,1 2,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	PENRT 700 MJ/m <sup>2</sup>	
TSD Holzfaserplatte	0,030	50	4	3	9,8	GWP Summe100 - 19 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollschalung Fichte	0,018	60	1	1	0,5	AP 0,214 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmstein zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	100 100	2 1	1 1	8,7 -0,4		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Lattung Fichte	0,048	60	1	1	0,0		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,401</b>				<b>48,6</b>		
$OI3_{KON} = 12 \text{ Pkt./m}^2$ $EI_{KON} = 0,4 \text{ Pkt./m}^2$							

<i>L_GD3: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	425 1800	0,110 0,910	1,60 1,00		50 10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	2,10	4,8	5	0,714
Lehmschüttung	0,040	1100	0,470	1,00	44,0	10	0,085
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,018	425	0,110	1,60	7,7	50	0,164
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100 0,200	38 425	0,042 0,110	2,30 1,60		2 50	
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	1,60	20,4	50	0,436
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,441</b>				<b>179,4</b>		
$R'_T = 6,015$ ; $R''_T = 5,755$ ; $R_T = 5,885$ ; <b><math>U = 0,170</math> W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_{w,w}$ ca. 70 dB $L_{n,w}$ ca. 41 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	60 100	1 2	1 1	0,1 2,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
TSD Holzfaserplatte	0,030	50	4	3	9,8	PENRT 797 MJ/m <sup>2</sup>	
Lehmschüttung	0,040	100	2	1	1,2	GWP Summe100 - 20 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Vollschalung Fichte	0,018	60	1	1	0,5	AP 0,227 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Hanfdämmung zw. TW Fichtenholz	0,100 0,200	50 100	3 1	3 1	12,4 - 0,4		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Lattung Fichte	0,048	60	1	1	0,0		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,441</b>				<b>53,5</b>		
$OI3_{KON} = 17$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 0,7$ Pkt./m <sup>2</sup>							



<i>L_GD4: Holzbalkendecke, Lehmestrich, Lehmschüttung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	425 1800	0,110 0,910	1,60 1,00		50 10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	2,10	4,8	5	0,714
Spanplatte	0,025	800	0,170	1,80	20,0	90	0,147
Lehmschüttung zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	1100 425	0,470 0,110	1,00 1,60		10 50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Spanplatte	0,025	800	0,170	1,80	20,0	90	0,147
Lattung Fichte	0,048	425	0,110	1,60	20,4	50	0,436
LTP-Platte	0,016	700	0,130	1,00	11,2	18	0,123
Lehmputz	0,005	2000	1,100	1,00	10,0	10	0,005
<b>Gesamt</b>	<b>0,409</b>				<b>362,9</b>		
$R'_T = 3,787$ ; $R''_T = 3,614$ ; $R_T = 3,701$ ; <b>U = 0,270 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_{w,w}$ ca. 78 dB $L_{n,w}$ ca. 37 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	60 100	1 2	1 1	0,1 2,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	PENRT	
TSD Holzfaserplatte	0,030	50	4	3	9,8	730 MJ/m <sup>2</sup>	
Spanplatte	0,025	60	1	1	1,3	GWP Summe100	
Lehmschüttung zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	100 100	2 1	1 1	5,7 - 0,4	- 51 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	AP	
Spanplatte	0,025	60	1	1	1,3	0,234 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lattung Fichte	0,048	60	1	1	0,0		
LTP-Platte	0,016	50	2	1	4,4		
Lehmputz	0,005	100	2	2	0,3		
<b>Gesamt</b>	<b>0,409</b>				<b>47,1</b>		
$OI3_{KON} = 10$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 0,4$ Pkt./m <sup>2</sup>							

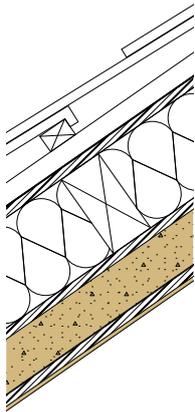
L_GD5 Holzbalkendecke, Leichtlehmschüttung, Lehmsteinauflage							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Spanplatte	0,025	800	0,170	1,80	20,0	90	0,147
TSD Holzfaserplatte	0,030	160	0,042	2,10	4,8	5	0,714
Lehmstein	0,071	1800	1,100	1,00	127,8	10	0,065
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Spanplatte	0,025	800	0,170	1,80	20,0	90	0,147
LL.schüttung zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	270 420	0,060 0,110	1,10 1,60		5 50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Spanplatte	0,025	800	0,170	1,80	20,0	90	0,147
Schilfdämmplatte	0,050	190	0,056	1,60	9,5	1	0,893
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>277,6</b>		
$R'_T = 5,553$ ; $R''_T = 5,522$ ; $R_T = 5,538$ ; <b>U = 0,181 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 78 dB $L_{n,w}$ ca. 37 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Spanplatte	0,025	60	1	1	1,3		
TSD Holzfaserplatte	0,030	50	4	3	9,8		
Lehmstein	0,071	100	2	1	3,3	PENRT 707 MJ/m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Spanplatte	0,025	60	1	1	1,3	GWP Summe100 - 92 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
LL.schüttung zw. TW Fichtenholz	0,200 0,200	100 100	2 1	1 1	1,4 - 0,4	AP 0,240 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Spanplatte	0,025	60	1	1	1,3		
Schilfdämmplatte	0,050	50	3	2	- 0,7		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,446</b>				<b>40,2</b>		
$OI3_{KON} = 3$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 0,6$ Pkt./m <sup>2</sup>							



L_GD6 Brettstapeldecke, Lehmestrich, Lehmschüttung							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Parkettboden	0,010	740	0,160	1,60	n.b.	200	n.b.
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	425 1800	0,110 0,910	1,60 1,00		50 10	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
TSD Holzfaserplatte	0,040	160	0,042	2,10	6,4	5	0,952
Lehmschüttung	0,050	1100	0,470	1,00	55,0	10	0,106
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Funderplan HF	0,008	1000	0,180	1,70	8,0	185	0,044
Brettstapelement	0,200	500	0,130	1,60	100,0	50	1,538
Schilfrohwegewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,371</b>				<b>273,1</b>		
$R'_T = 2,991$ ; $R''_T = 2,962$ ; $R_T = 2,977$ ; <b>U = 0,336 W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 59-62 dB $L_{n,w}$ ca. 52-57 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Parkettboden	0,010	25	2	2	21,9		
Polsterholz zw. Lehmestrich	0,050 0,050	60 100	1 2	1 1	0,1 2,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	PENRT 1013 MJ/m <sup>2</sup>	
TSD Holzfaserplatte	0,040	50	4	3	13,1	GWP Summe100 - 144 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Lehmschüttung	0,050	100	2	1	9,7		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	AP 0,289 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Funderplan HF	0,008	50	1	1	9,7		
Brettstapelement	0,200	100	1	1	- 9,3		
Schilfrohwegewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,371</b>				<b>48,3</b>		
$OI3_{KON} = 11$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 0,4$ Pkt./m <sup>2</sup>							

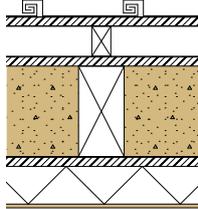
## Dachaufbauten

L_SD1 Holzsparrendach, schwere Lehmschüttung							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Betondachstein	0,020	2150	1,700	1,00	43,0	100	n.b.
Lattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,500	0,79	n.b.	26	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Holzfaserdämmung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	230	0,050	2,10		5	
	0,240	425	0,110	1,60		50	
ggf. Dampfbremse	0,0002	1000	0,170	1,50	n.b.	20.000	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Lehmschüttung zwischen Lattung	0,120	1100	0,470	1,00		10	
	0,120	425	0,110	1,60		50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,565</b>				<b>283,7</b>		
$R'_T = 5,706$ ; $R''_T = 5,598$ ; $R_T = 5,652$ ; <b><math>U = 0,177</math> W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b><math>R_w</math> ca. 51-53 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Betondachstein	0,020	80	1	1	13,9		
Lattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Konterlattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Unterdeckbahn	0,0001	50	3	3	0,4		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Holzfaserdämmung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	50	4	3	106,1	PENRT 1895 MJ/m <sup>2</sup>	
	0,240	100	1	1	- 0,6	GWP Summe100 - 29 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
ggf. Dampfbremse	0,0002	50	3	3	0,6		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Lehmschüttung zwischen Lattung	0,120	100	2	1	3,4	AP 0,515 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
	0,120	60	1	1	0,2		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,565</b>				<b>127,0</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 90 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,5 Pkt./m<sup>2</sup></b>	



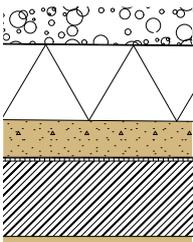
L_SD2 Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung							
Material	d [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m²]	μ [-]	R [m²K/W]
Betondachstein	0,020	2150	1,700	1,00	43,00	100	n.b.
Lattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,500	0,79	n.b.	26	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
LL.-Schüttung zw. Dachbalken Fichte	0,240 0,240	270 425	0,060 0,110	1,10 1,60		5 50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Holzfaserdämmung zwischen Lattung	0,080 0,080	230 425	0,050 0,110	2,10 1,60		5 50	
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>1000</i>	<i>0,170</i>	<i>1,50</i>	<i>n.b.</i>	<i>20.000</i>	<i>n.b.</i>
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Schilfrohwewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,525</b>				<b>183,9</b>		
$R'_T = 6,233$ ; $R''_T = 6,173$ ; $R_T = 6,203$ ; $U = 0,161 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $R_w$ ca. 43-53 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m²]		
Betondachstein	0,020	80	1	1	13,9		
Lattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Konterlattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Unterdeckbahn	0,0001	50	3	3	0,4		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
LL.-Schüttung zw. Dachbalken Fichte	0,240 0,240	100 100	2 1	1 1	10,8 - 0,6	PENRT 1059 MJ/m²	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	GWP Summe100 - 36 kg CO <sub>2</sub> eq./m²	
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Holzfaserdämmung zwischen Lattung	0,080 0,080	50 60	4 1	3 1	37,6 0,1	AP 0,274 kg SO <sub>2</sub> eq./m²	
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>50</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>0,6</i>		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Schilfrohwewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,525</b>				<b>65,8</b>		
						$OI3_{KON} = 29 \text{ Pkt./m}^2$ $EI_{KON} = 0,7 \text{ Pkt./m}^2$	

<i>L_FD1: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Blecheindeckung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Blecheindeckung	0,001	7170	105,000	0,42	7,2		n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	n.b.
Konterlattung Fichte	0,050	425	0,110	1,60	21,3	50	n.b.
Unterdeckbahn	0,0001	300	0,500	0,79	n.b.	26	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
LL.-Schüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	270	0,060	1,10		5	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Holzfaserverplatte	0,100	230	0,050	2,10	23,0	5	2,000
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,476</b>				<b>150,1</b>		
$R'_{T} = 6,489$ ; $R''_{T} = 6,446$ ; $R_{T} = 6,468$ ; <b>U = 0,155 W/(m<sup>2</sup>K)</b> <b>R<sub>w</sub> ca. 43-51 dB</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Blecheindeckung	0,001	40	4	4	54,9		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Konterlattung Fichte	0,050	60	1	1	0,1		
Unterdeckbahn	0,0001	50	3	3	0,4	PENRT 1716 MJ/m <sup>2</sup>	
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
LL.-Schüttung zwischen Dachbalken Fichte	0,240	100	2	1	10,8	GWP Summe100 - 51 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	AP 0,499 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Holzfaserverplatte	0,100	50	4	3	47		
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,476</b>				<b>115,3</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 79 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 0,8 Pkt./m<sup>2</sup></b>	



<i>L_FD2: Holzsparrendach, Leichtlehmschüttung, Kieseindeckung</i>							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kies	0,100	1600	0,470	0,84	160,0	50	n.b.
Vlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.
XPS-Dämmung	0,200	30	0,035	1,50	6,0	200	5,714
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.
Lehm-Gefälleschüttung	0,120	1100	0,470	1,00	132,0	10	0,255
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
LL.-Schüttung zwischen TW Fichtenholz	0,240	270	0,060	1,10		5	
	0,240	425	0,110	1,60		50	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>1000</i>	<i>0,170</i>	<i>1,50</i>	<i>n.b.</i>	<i>20.000</i>	<i>n.b.</i>
Vollschalung Fichte	0,024	425	0,110	1,60	10,2	50	0,218
Schilfrohwewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051
Lehmputz	0,010	2000	1,100	1,00	20,0	10	0,009
<b>Gesamt</b>	<b>0,723</b>				<b>408,2</b>		
$R^i = 10,478$ ; $R^e = 10,418$ ; $R_T = 10,448$ ; <b><math>U = 0,096</math> W/(m<sup>2</sup>K)</b> $R_w$ ca. 50-58 dB							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kies	0,100	100	2	1	1,8		
Vlies PP	0,0001	50	3	3	0,3		
XPS-Dämmung	0,200	40	4	4	106,1		
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	11,4		
Lehm-Gefälleschüttung	0,120	100	2	1	3,6	PENRT 2251 MJ/m <sup>2</sup>	
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2	GWP Summe100 46 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7	AP 0,400 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
LL.-Schüttung zwischen TW Fichtenholz	0,240	100	2	1	10,8		
	0,240	100	1	1	- 0,6		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2		
<i>ggf. Dampfbremse</i>	<i>0,0002</i>	<i>50</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>0,6</i>		
Vollschalung Fichte	0,024	60	1	1	0,7		
Schilfrohwewebe	0,003	100	4	3	- 0,1		
Lehmputz	0,010	100	2	2	0,6		
<b>Gesamt</b>	<b>0,723</b>				<b>136,1</b>		
						$OI3_{KON} = 99$ Pkt./m <sup>2</sup> $EI_{KON} = 2,7$ Pkt./m <sup>2</sup>	

<i>L_FD3: Massivholzdach</i>								
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]	
Kies	0,100	1600	0,470	0,84	160,0	50	n.b.	
Vlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.	
XPS-Dämmung	0,200	30	0,035	1,50	6,0	200	5,714	
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dampfd.	n.b.	
Lehm-Gefälleschüttung	0,120	1100	0,470	1,00	132,0	10	0,255	
Rieselschutzpapier	0,0001	800	0,180	1,35	n.b.	423	n.b.	
Funderplan HF	0,008	1000	0,180	1,70	8,0	185	0,044	
Brettstapelelement	0,200	500	0,130	1,60	100,0	50	1,538	
Schilfrohwergewebe	0,003	200	0,059	1,30	0,6	2	0,051	
Lehmputz	0,002	2000	1,100	1,00	40,0	10	0,018	
<b>Gesamt</b>	<b>0,653</b>				<b>448,8</b>		<b>8,256</b>	
<b>U = 0,129 W/(m<sup>2</sup>K)</b>								
<b>R<sub>w</sub> ca. 60 dB</b>								
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]			
Kies	0,100	100	2	1	1,8			
Vlies PP	0,0001	50	3	3	0,3			
XPS-Dämmung	0,200	40	4	4	106,1	PENRT 2348 MJ/m <sup>2</sup>		
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	11,4			
Lehm-Gefälleschüttung	0,120	100	2	1	3,6	GWP Summe100 - 60 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Rieselschutzpapier	0,0001	50	3	3	0,2			
Funderplan HF	0,008	50	1	1	9,7	AP 0,424 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>		
Brettstapelelement	0,200	100	1	1	- 9,3			
Schilfrohwergewebe	0,003	100	4	3	- 0,1			
Lehmputz	0,002	100	2	2	1,1			
<b>Gesamt</b>	<b>0,653</b>				<b>124,7</b>			
<b>OI3<sub>KON</sub> = 88 Pkt./m<sup>2</sup></b>								
<b>EI<sub>KON</sub> = 2,6 Pkt./m<sup>2</sup></b>								



## Erdberührte Bauteile

L_KAW1: Stampflehwand							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kies	0,100	1600	0,470	0,84	n.b.	50	n.b.
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.
Schaumglas	0,100	130	0,056	0,90	13,0	dd.	1,786
Abdichtung Bitumen	0,0002	1570	0,230	1,26	n.b.	dd.	n.b.
Stampflehm	1,000	2300	1,500	1,00	2300,0	10	0,667
<b>Gesamt</b>	<b>1,100</b>				<b>2313,0</b>		<b>2,453</b>
<b>U = 0,387 W/(m<sup>2</sup>K)</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kies	0,100	100	2	1	3,7	PENRT 2204 MJ/m <sup>2</sup>	
Filtervlies PP	0,0001	50	3	3	0,3	GWP Summe100 121 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Schaumglas	0,100	50	3	3	77,1	AP 0,461 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
Abdichtung Bitumen	0,0002	50	3	5	11,4		
Stampflehm	1,000	100	2	1	62,6		
<b>Gesamt</b>	<b>1,100</b>				<b>155,0</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 118 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,0 Pkt./m<sup>2</sup></b>	

L_KAW2: Stampflehwand							
Material	d [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	c [kJ/(kgK)]	m' [kg/m <sup>2</sup> ]	$\mu$ [-]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Kies / Lehm verdichtet	0,100				n.b.		n.b.
Filtervlies PP	0,0001	300	0,220	0,79	n.b.	1	n.b.
XPS-Dämmplatte	0,100	30	0,035	1,50	3,0	200	2,857
<i>Lehmschlämme</i>	<i>0,001</i>				<i>n.b.</i>		<i>n.b.</i>
Stampflehm	1,000	2300	1,500	1,00	2300,0	10	0,667
<b>Gesamt</b>	<b>1,101</b>				<b>2303,0</b>		<b>3,524</b>
<b>U = 0,274 W/(m<sup>2</sup>K)</b>							
Material	d [m]	ND.	EE.	VP.	OI3 [Pkt./m <sup>2</sup> ]		
Kies / Lehm verdichtet	0,100	100	2	1	3,7	PENRT 1772 MJ/m <sup>2</sup>	
Filtervlies PP	0,0001	50	3	3	0,3	GWP Summe100 91 kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
XPS-Dämmplatte	0,100	40	4	4	53,0	AP 0,340 kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	
<i>Lehmschlämme</i>	<i>0,001</i>						
Stampflehm	1,000	100	2	1	62,6		
<b>Gesamt</b>	<b>1,101</b>				<b>119,6</b>		
						<b>OI3<sub>KON</sub> = 83 Pkt./m<sup>2</sup></b> <b>EI<sub>KON</sub> = 1,8 Pkt./m<sup>2</sup></b>	