



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Einsatzmöglichkeiten von Lehmbaustoffen
in der energetischen Altbausanierung in Wien

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

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

E251-01

Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Pol Carlo Wagner

01426165

Wien, am 12. September 2020

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, welches Potential Lehmbaumstoffe bergen, um Gründerzeitbauten in Wien energetisch zu sanieren. In einem ersten Arbeitsabschnitt wird der historische und architektonische Kontext von Gründerzeitbauten in Wien erläutert, um die Hauptmerkmale der Bauten dieser Zeitperiode festzuhalten. Bauten, die während dieser für Wien sehr prägenden Zeitperiode entstanden, haben oftmals erhaltenswerte Fassaden, die es bei einer energetischen Sanierung zu erhalten gilt. In einem weiteren Schritt werden die aktuellen Sanierungsmaßnahmen in Bezug auf Gründerzeitbauten veranschaulicht. Behandelt werden Sanierungsmaßnahmen die, in Bezug auf den gründerzeitlichen Baubestand, den Heizwärmebedarf reduzieren können. In einem weiteren Schritt werden die Einsatzbereich von Lehmbaumstoffen zur energetischen Sanierung erläutert. Dieser Abschnitt behandelt einerseits die Thematik der Innendämmung durch die Verwendung Lehmbaumstoffen, als auch die bauphysikalischen Eigenschaften, die mit den Dämmkonstruktionen einhergehen. Die erläuterten Innendämmsysteme beziehen sich einerseits auf Leichtlehmschalen, als auch auf angemörtelte Dämmplatten. Anschließend werden die Innendämmkonstruktionen aus Lehmbaumstoffen auf den gründerzeitlichen Baubestand übertragen. Aufgrund der mageren Datenlage bezüglich der Verwendung von Lehmbaumstoffen zur Innendämmung von gründerzeitlichen Bauten, werden in diesem Kapitel Referenzprojekte aufgelistet, die im Zusammenhang dieser Thematik erwähnenswert sind. Im gleichen Kapitel werden konventionelle Dämmstoffe mit Lehmbaumstoffen, bezüglich ihrer ökologischen und bauphysikalischen Eigenschaften, gegenübergestellt. Im gleichen Zusammenhang werden mögliche Implikationen für die Baupraxis erwähnt. Es stellt sich heraus, dass Lehmbaumstoffe das Potential bergen, um den Heizwärmebedarf von Gründerzeitbauten zu reduzieren. Ob Lehmbaumstoffe jedoch in der Sanierungspraxis eingesetzt werden können, um eine Alternative zu den konventionellen Dämmstoffen darzustellen, muss anhand des Baubestandes, durch hygrothermische Bauteilsimulationen, Lebenszyklusanalysen und Kostenberechnungen bewertet werden.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to review the potential of earthen materials within the context of thermal retrofitting of *Gründerzeit*-buildings in Vienna. The first chapter deals with the principal characteristics of *Gründerzeit*-buildings in the historical and architectural context of its historical period. The historical characteristics of *Gründerzeit*-buildings, such as e.g. the highly ornamented facades, shape today's cityscape of Vienna and thus have to be preserved during retrofitting measures and proceedings. Most of these retrofitting measures intend a decrease of the building's heating demand. The use of earthen material for thermal retrofitting mainly concerns thermal insulation constructions. The thesis then focuses on the use of earthen materials for interior insulation constructions, as well as the physical properties that are inherent to earth as a building material. The described insulation systems focus on lightweight loam constructions, as well as insulation panels in combination with earthen mortar. These interior insulation constructions then get transferred to the existing *Gründerzeit*-buildings in Vienna, to review its potential for future thermal retrofitting projects. Due to the lack of data on the underlying topic, this thesis presents a selection of relevant reference projects and additionally draws a comparison between conventional insulation materials and earthen materials concerning the building physics characteristics and the ecological properties. The possible implications for the construction practice are mentioned in the same context. Due to the existing literature and the implementation of earthen materials in thermal retrofitting projects, earthen materials seem to be applicable for thermal retrofitting projects of *Gründerzeit*-buildings. To conclude that those insulation systems actually constitute a viable option for today's construction practice and present an alternative to conventional insulation materials, it needs additional hygrothermal simulations, life cycle analyses and cost calculations specific to the existing building.

1.	EINLEITUNG	1
1.1	ARCHITEKTONISCHE RELEVANZ DER FRAGESTELLUNG	3
1.2	ZIELSETZUNG DER ARBEIT	5
1.3	METHODISCHE VORGEHENSWEISE	6
2.	GRÜNDERZEITBAUTEN – EINE HISTORISCHE UND ARCHITEKTONISCHE EINFÜHRUNG	8
2.1	DIE SOZIALE UND WIRTSCHAFTLICHE VORAUSSETZUNGEN IN WIEN	8
2.2	ARCHITEKTONISCHE CHARAKTERISTIKA VON GRÜNDERZEITBAUTEN	10
2.3	VOR- UND NACHTEILE VON GRÜNDERZEITBAUTEN IM KONTEXT AKTUELLE ANSPRÜCHE AN ARCHITEKTUR	18
3.	AKTUELLE SANIERUNGSMETHODEN IM KONTEXT VON GRÜNDERZEITBAUTEN	20
3.1	SANIERUNGSZIELE UND MAßNAHMEN	20
3.1.1	<i>Außendämmung</i>	24
3.1.2	<i>Innendämmung</i>	25
3.1.3	<i>Fensteraustausch und Luftdichtheit</i>	28
3.1.4	<i>Wärmebrücken</i>	31
3.1.5	<i>Nachhaltigkeit der Sanierungsmaßnahmen</i>	33
3.1.6	<i>Ökologische Bewertung von Baumaterialien</i>	37
3.2	SANIERUNG DER KELLERZONE VON GRÜNDERZEITBAUTEN	38
3.3	SANIERUNG DER ERD- UND OBERGESCHOSSE VON GRÜNDERZEITBAUTEN	42
4.	EINSATZ VON LEHMBAUSTOFF ZUR THERMISCHEN SANIERUNG	45
4.1	NACHHALTIGKEIT VON LEHMBAUSTOFFEN	45
4.2	INNENDÄMMUNG AUS LEHMBAUSTOFFEN	48
4.2.1	<i>Wärmedämm- und Wärmespeichereigenschaften</i>	48
4.2.2	<i>Tauwasserausfall infolge einer Innendämmung</i>	52
4.2.3	<i>Vorteile und Eignung von Lehmbaustoffen zur Innendämmung</i>	55
4.2.4	<i>Dimensionierung der Innendämmung</i>	57
4.2.5	<i>Bauliche Vorbereitung der Innendämmung</i>	58
4.2.6	<i>Einbindende Wände und Decken, Fenster- und Türlaibungen</i>	60
4.3	LEICHTLEHM	61
4.3.1	<i>Strohleichtlehm</i>	63
4.3.2	<i>Holzleichtlehm</i>	64
4.3.3	<i>Expandierter Kork</i>	65
4.3.4	<i>Mineralischer Leichtlehm</i>	65
4.4	INNENSCHALEN AUS FEUCHT EINGEBAUTEM LEICHTLEHM	68
4.4.1	<i>Bau der Leichtlehmschalen</i>	70
4.4.2	<i>Zur Herstellung der Schalung verwendete Leichtlehme</i>	72
4.4.3	<i>Trocknung der Schalung</i>	73
4.5	INNENSCHALEN AUS LEICHTLEHMMAUERWERK	73
4.6	ANGEMÖRTELTE DÄMMPLATTEN	76
4.6.1	<i>Anmörteln und Fixieren der Platten</i>	77
4.6.2	<i>Verwendete Dämmplatten</i>	79
4.6.3	<i>Weiterbehandlung der Dämmplatten</i>	81
4.7	LEHMPUTZ	81
4.7.1	<i>Lehmputzsorten</i>	84
4.7.2	<i>Verwendung von Lehmputzen zur Salzreduktion</i>	86
5.	ÜBER DEN POTENTIELLEN STELLENWERT VON LEHM IN DER SANIERUNG VON GRÜNDERZEITBAUTEN	88
5.1	REFERENZPROJEKTE	88
5.1.1	<i>Sanierung Kaiserstraße 7 in Wien</i>	89
5.1.2	<i>Sanierung einer Cottagevilla in Wien Währing</i>	92
5.1.3	<i>Altbau in Duisburg Hochfeld</i>	94
5.1.4	<i>Umbau einer Scheune in Offenbach</i>	96

5.1.5	<i>Dachausbau Wien</i>	98
5.2	VERGLEICH VON LEHMBAUSTOFFEN UND KONVENTIONELLEN BAUSTOFFEN ZUR SANIERUNG	100
5.2.1	<i>Vergleich bezüglich ökologischer Eigenschaften</i>	100
5.2.2	<i>Vergleich bezüglich bauphysikalischer Eigenschaften</i>	105
5.3	IMPLIKATIONEN FÜR DIE SANIERUNGSPRAXIS MIT LEHMBAUSTOFFEN	109
6.	SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK	115
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	118
	QUELLENVERZEICHNIS	120

1. Einleitung

Der Gebäudesektor in Österreich hat eine erhebliche Anteilnahme an der jährlichen Verursachung von Treibhausgasen. Auch wenn laut den offiziellen Zahlen des Umweltbundesamtes die Emissionen des österreichische Gebäudesektors zwischenzeitlich (1990-2014) um 5,3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent gesunken sind, stiegen sie in den drei Folgejahren um 0,8 Mio. erneut an. Im Jahr 2017 ist auf den Gebäudesektor immer noch ein Ausstoß von 8,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent zurückzuführen (Umweltbundesamt 2019:8). Aus dem *Klimaschutzbericht 2019* geht hervor, dass die zwischenzeitliche Reduktion der Emissionen auf „thermische Sanierungen, auf den steigenden Einsatz von erneuerbaren Energieträgern, die Erneuerungen von Heizungsanlagen und den verstärkten Einsatz von Fernwärmebezug zurückzuführen“ ist (Umweltbundesamt 2019:8). Zunehmende Wohnsitze, sowie vergrößerte Wohnnutzflächen, aber auch eine leichte Verschiebung hin zu flüssigen und gasförmigen fossilen Brennstoffen wirken den Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen entgegen (Umweltbundesamt 2019:9). Zur Reduktion vom Heizbedarf lassen sich zwar unterschiedliche Maßnahmen anführen – beispielhaft zu nennen wären an dieser Stelle der Austausch von Fenster oder die Dämmung der Außenwand. Ob und inwiefern solche Maßnahmen letzten Endes umgesetzt werden können, ist allerdings größtenteils abhängig vom Bestandsgebäude. Aus dem *Klimaschutzbericht 2019* geht hervor, dass vor allem vor 1970 erbaute Gebäude ein großes Einsparungspotential bergen. Dies ist insofern beachtlich, als dass die Gebäude dieser Zeitperiode etwa 45% der gesamten Wohnnutzfläche in Österreich ausmachen. In ihrer thermischen Sanierung liegt dementsprechend großes Potential zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen zu Grunde (Umweltbundesamt 2019:130). Auch Hegger u. a. (2007) verorten die zentralste ökologische Schraubstelle im Bereich der Bestandsanierung. Um dieses Potential ausschöpfen zu können braucht es allerdings ein gesellschaftliches Umdenken – weg von der derzeitigen ökonomisch angetriebenen kurzen Gebäudelebensdauer, hin zu einer neuen Gewichtung der Beständigkeit (Hegger u. a. 2007:20).

Trotz des großen Potentials wurde die in der Klimastrategie 2007 erhoffte jährliche Sanierungsrate von zumindest 3% verfehlt. Zudem konnten die für 2020 festgelegten Sanierungsziele gemäß

Energiestrategie Österreich bei Wohngebäuden nicht erreicht werden (Umweltbundesamt 2019:132). In der Rahmenstrategie von *Smart City Wien* wird das Ziel formuliert, die pro Kopf Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 um 35% und im Jahr 2050 um 80%, im Vergleich zu 1990 verringert zu haben. Bestandsanierungen werden in dieser Strategie als explizite Maßnahme angeführt, so soll der benutzerabhängige Energieverbrauch pro Jahr um 1% reduziert werden (Magistrat der Stadt Wien 2014:33).

Im Kontext von *Smart City Wien* wird zudem erwähnt, dass es für die zukünftigen Sanierungsaktivitäten neue Strategien braucht. Die Erfahrung habe gezeigt, dass sich mit den derzeitigen Förderungen die erhofften Sanierungsraten nicht erreichen lassen. Zudem brauche es zusätzliche „ordnungs- und fiskalpolitische Instrumente“ (Magistrat der Stadt Wien 2014:53). Insbesondere Änderungen im Wohn- oder Steuerrecht werden dabei als hilfreich eingestuft, wobei diese je nach Bundesland unterschiedlich geregelt werden (Magistrat der Stadt Wien 2014:53). Laut dem *Stadtentwicklungsplan 2025* (STEP 2025) ist die geförderte Gebäudesanierung notwendig, um eine höhere Wohnqualität und eine bessere Energieeffizienz zu erreichen. Das zukünftig antizipierte Wachstum der Stadt Wien soll durch ein neues Bewerten und Anpassen der Förderungsmittel gewährleistet werden (Magistratsabteilung 18 2014:41). Aus dem Bericht geht hervor, dass sich der bereits gebaute urbane Raum durch eine sanfte Stadterneuerung weiterentwickeln muss. Dies soll vor allem zu einer Qualitätsverbesserung von zwischen- und nachkriegszeitlichen urbanen Strukturen führen. Es wird dementsprechend eine allgemeine Verbesserung der Bausubstanz gefordert, und zwar sowohl von gründerzeitlichen Bauten als auch von Siedlungsstrukturen der 1950er bis 1970er Jahre in Wien (Magistratsabteilung 18 2014:43). Die vorzunehmenden Maßnahmen sind sowohl im *Aktionsplan 50/60/70* als auch im *Aktionsplan Gründerzeit* festgehalten. Im Letzteren ist angeführt, dass die thermische Sanierungen fortgeführt werden, um die Klimaziele zu erreichen (Magistratsabteilung 18 2014:45). Neben Veränderungen auf struktureller und juristischer Ebene scheint es aus einem architektonischen Blickwinkel nahe zu liegen, zudem aktuelle Sanierungsmethoden in Frage zu stellen.

Vor dem Hintergrund der Dringlichkeit, die Anzahl der energetischen Sanierungen in Wien jährlich zu vervielfachen um somit die Treibhausgas-Emissionen reduzieren zu können und unter

Berücksichtigung des Wiener Gebäudebestandes, stellt sich im Kontext der vorliegenden Diplomarbeit die Frage nach adäquaten Sanierungsmethoden. Konkreter geht es dabei um die Frage, wie Lehmbaumstoffe im Einsatz der energetischen Altbausanierung zielführend zur Reduktion von Heizwärmebedarf in Wiener Gründerzeitwohnungen beitragen können.

Im Zuge dieses einführenden Kapitels geht es zunächst (1.1) um die Darstellung der Relevanz der Fragestellung für die Architektur. In einem zweiten Schritt (1.2) wird die Zielsetzung dieser Arbeit ausformuliert, um anschließend (1.3) die methodische Vorgehensweise zu bestimmen.

1.1 Architektonische Relevanz der Fragestellung

Damit in den folgenden Teilen dieses Kapitels konkreter auf die Zielsetzung, sowie auf die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit eingegangen werden kann, gilt es an dieser Stelle darum, die Fragestellung zu kontextualisieren, ihre Eingrenzung zu legitimieren und somit auch ihre Relevanz für den Fachbereich Architektur herauszuarbeiten.

Die Sanierungsmaßnahmen orientieren sich sowohl am Bestandsgebäude als auch an dessen Errichtungsjahr. Gebäude die zu unterschiedlichen Perioden gebaut wurden, haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Konstruktionsmethode und Baustoffe spezifische und differente bauphysikalische Eigenschaften. Von dieser Differenz ausgehend erscheint eine präzise Eingrenzung hingehend der Bauzeitperiode für die vorliegende Arbeit unumgänglich. Ebenso zu berücksichtigen ist der Verwendungszweck der Gebäude, nämlich insofern als dass in den Sanierungsrichtlinien zwischen Wohngebäude (WG) und Nicht-Wohngebäude (NWG) unterschieden wird. Bevor in dieser Arbeit also der Frage nachgegangen werden kann, wie eine adäquate und somit effiziente Sanierungsmaßnahme ausschauen kann, benötigt es eine kurze Bestandaufnahme aktueller Bestandsbauten von Wien.

Aus dem *Census 2011* (STATISTIK AUSTRIA, 2013) geht hervor, dass neun von zehn Gebäuden in Österreich zu Wohnzwecken genutzt werden. In Wien werden 164.746 Gebäude gezählt, worunter 983.840 Wohnungen. In ganz Österreich wurde mittels der Registerzählung ein Bestand von

2.191.280 Gebäude ermittelt (STATISTIK AUSTRIA 2013:22). Fast drei Viertel aller Wohngebäude in Österreich sind Einfamilienhäuser (STATISTIK AUSTRIA 2013:23). Wien unterscheidet sich in dieser Hinsicht also von den restlichen Bundesländern. In der Hauptstadt sind 39,8% der Bauten als Wohngebäude mit drei und mehr Wohnungen klassifiziert. Insgesamt zählt Wien 164.746 Gebäude, wovon 149.126 Wohngebäude sind (STATISTIK AUSTRIA 2013:24). Zudem – und das scheint für die Eingrenzung der vorliegenden Forschungsfrage von zentraler Bedeutung – ist die Verteilung der Errichtungsjahre des Wiener Gebäudebestandes anders als in anderen Bundesländern Österreichs. In Österreich wurden 14,9% aller Gebäude vor 1919 erbaut, wobei Wien im Bundesländervergleich mit 19,7% den höchsten Anteil zukommt. In der Zwischenkriegszeit (1919 bis 1944) wurden in Österreich nur 7,6% des aktuellen Gebäudebestands gebaut, worunter für Wien 15,2%. In der Nachkriegszeit (1945 bis 1970) wurde 24% des Baubestandes in Österreich gebaut und in der Zeitspanne 1971 bis 1990 sind es 28,8%. In Wien sind es jeweils 24,3% und 20,5% (Abb. 01). Alles in Allem wurde in Wien etwa 60 % des Gebäudebestandes vor 1970 errichtet (STATISTIK AUSTRIA 2013:32). Schlussfolgernd lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass somit in der vor 1970 errichteten Architektur ein ausschlaggebendes Einsparungspotential an Heizenergiebedarf liegt.

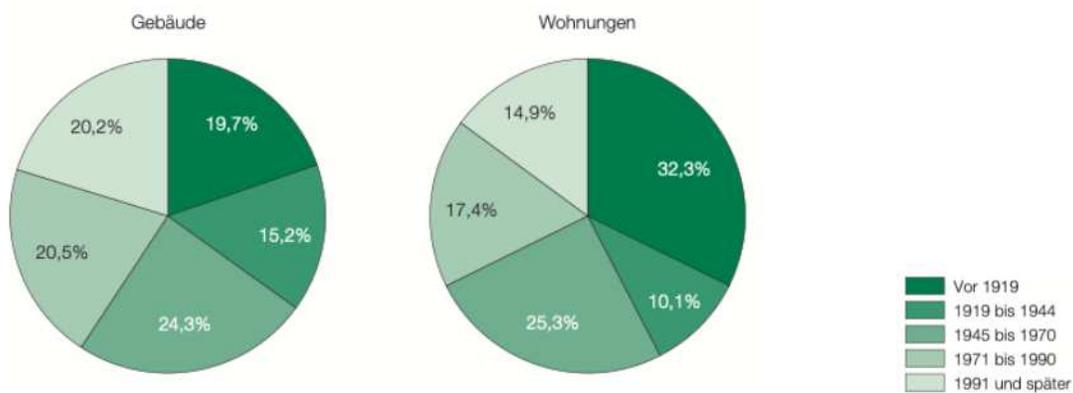


Abb. 01: Gebäude und Wohnungen nach dem Errichtungsjahr in Wien 2011
Quelle: STATISTIK AUSTRIA 2013:32

Ein Blick auf die wohnungsbezogenen Zahlen untermauert diese Einschätzung. So wurden in Österreich 17,8% der Wohnungen vor 1919 erbaut, in Wien hingegen wurden 32,3% - also fast das Doppelte - der Wohnungen während oder vor der Gründerzeit errichtet. Die in dieser Periode entstandenen Wohnbauten konstituieren somit fast ein Drittel des Wohnbestandes der

Hauptstadt. Landesweit wurden 7,7% der Wohnungen in der Zwischenkriegszeit errichtet, in Wien 10,1%. In Österreich (und ebenfalls in Wien) wurden etwa ein Viertel der Wohnungen zwischen 1945 bis 1970 errichtet. Zwischen 1971 und 1990 wurden 26,7% des Wohnungsbestandes in Österreich gebaut, in Wien ist der Anteil 17,4% (STATISTIK AUSTRIA 2013:32).

Für die Eingrenzung der in der vorliegenden Arbeit gestellten Frage kann somit festgehalten werden, dass im Kontext von Wien insbesondere die Sanierung von Gebäuden, die vor 1970 erbaut wurden, großes Potential birgt. Besonderes Augenmerk bedarf es jedoch den vor 1919 erbauten Gebäuden, da diese in Wien einen erheblichen Anteil des Gebäudebestandes, vor allem aber des Wohngebäudebestandes, ausmachen. Da Gründerzeitbauten nicht nur einen Großteil Wiener Wohnunterkünfte ausmachen, sondern überdies hinaus auch prägend für das Stadtbild sind, gehören auch solche Aspekte berücksichtigt, wenn es darum geht über Sanierungsstrategien von Gründerzeitbauten nachzudenken.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich konventioneller Sanierungsmaßnahmen mit einer energetischen Sanierung mit Lehmbaustoffen. Diese Arbeit soll die Vor- und Nachteile von Lehmbaustoffen hinsichtlich Sanierungen aufzeigen und folglich diskutieren, inwiefern Lehmbaustoffe ein alternativer Baustoff zu für Sanierungsmethoden von Gründerzeitbauten in Wien darstellen können. Dabei sollen sowohl ökologische als auch raumklimatische und sonstige Eigenschaften von Lehmbaustoffen fokussiert werden. Neben dem allgemeinen Vergleich verschiedener Sanierungsmethoden Wiener Altbauwohnungen (insbesondere Dämmung), soll anhand von Lehmkonstruktionen dargestellt werden, welche Methoden möglich sind, um Altbauten in Wien zu dämmen. Zudem zielt diese Arbeit darauf ab konkreter herauszuarbeiten, was bei der Dämmung mit Lehm beachtet werden muss.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Um die Fragestellung bestmöglich beantworten zu können und zu untersuchen, wie Lehmbaumstoffe im Einsatz der energetischen Altbausanierung von Wiener Gründerzeitwohnungen eingesetzt werden können, braucht es zunächst eine Zuwendung zur historischen Entwicklung von Gründerzeitbauten. Zudem werden die zentralen architektonischen Charakteristika der Gründerzeitbauten herausgearbeitet (Kapitel 2), um in einem nächsten Schritt (Kapitel 3) die Frage der aktuellen Sanierungsmaßnahmen von Altbauten adressieren zu können. In diesem dritten Kapitel gilt es die energetischen Sanierungsmaßnahmen auf die bauphysikalischen Gegebenheiten des Baubestandes zu beziehen. Die Annäherung an aktuelle energetische Sanierungsmaßnahmen scheint insofern relevant, als dass diese Anforderungen auf den Themenbereich des Lehmbaus übertragen werden können. Das Kapitel 4 behandelt überwiegend die Eigenschaften von Lehmbaumstoffen, sowie ihre Einsatzmöglichkeiten für die Innendämmung. In einem weiteren Schritt (Kapitel 5) gilt es zu überprüfen, wie Lehmbaumstoffe zur thermischen Sanierung von gründerzeitlichen Gebäuden in Wien eingesetzt werden könnten. Dabei kann entlang ausgewählter Referenzprojekte ein Eindruck über aktuelle Verwendungen von Lehm bei Gründerzeitbauten geliefert werden. Daran anschließend lassen sich zudem konkrete Implikationen für die Sanierungspraxis herausarbeiten. Somit kann abschließend in differenzierter Weise auf Unterschiede zwischen Lehm und konventionellen Baustoffen eingegangen werden, sodass sich Vor- und Nachteile von Lehmbaumstoffen im Hinblick auf ökologische, ästhetische und ökonomische Aspekte diskutieren lassen.

In der vorliegenden Arbeit geht es somit um eine theoretische Annäherung an die Thematik von Lehmbaumstoffen im Kontext von Sanierungsarbeiten bei Gründerzeitbauten.

Vor dem Hintergrund einer überschaubaren themenbezogenen Literatur, insbesondere was wissenschaftliche Publikationen betrifft, setzt sich die methodische Herangehensweise der Arbeit in erster Linie aus Literaturrecherche, Exzerption und abschließender Synthese jeweiliger Kernaussagen zusammen. Die Informationen zu den Sanierungsmaßnahmen wurden überwiegend aus Fachbüchern zur aktuellen Praxis der Sanierung von Altbauten gezogen (u.a. Giebeler u. a. 2008;

Maier 2011; Fachverband Innendämmung 2016). Als lehmspezifische Quellen dienten insbesondere Röhlen & Ziegert (2020), Volhard (2016) und Minke (2017). Um theoretische Erläuterungen verständlicher zu machen und abschließend – mehr oder weniger praxisorientiert – diskutieren zu können, wurden zudem über eine Internet- und Literaturrecherche fünf Referenzprojekte ausgewählt. Auf empirische Berechnungen – bspw. zur hygrothermischen Beurteilung der Innendämmung oder zur detaillierten Lebenszyklusanalyse aller benutzten Baustoffe – wird im Zuge der vorliegenden Arbeit bewusst verzichtet. Dies legitimiert sich in der Abhängigkeit der Sanierungsmaßnahmen vom tatsächlichen Baubestand, dieser müsste also auf Ergebnissen einer Baubestandsanalyse beruhen. Eine solche umfangreiche Analyse würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

2. Gründerzeitbauten – eine historische und architektonische Einführung

Damit die Relevanz der vorliegenden Forschungsfrage erkenntlich wird, geht es in diesem ersten Teil des theoretischen Kapitels zunächst um eine kurze Skizzierung der Gründerzeitbauten. Der kurze historische Rückblick erlaubt die zentralen architektonischen Charakteristika der Gründerzeitbauten herauszuarbeiten und in differenzierter Weise darzustellen. Zudem gilt es in diesem Kapitel den Stellenwert von Gründerzeitbauten für das wienerische Stadtbild, sowie für den aktuellen Nutzungsbedarf herauszuarbeiten. Erst nachdem die Rolle von Gründerzeitbauten für die Stadt Wien, sowie Vor- und Nachteile der Architektur für die aktuelle Verwendung herausgearbeitet wurden, kann die Frage nach einer angemessenen Sanierung adressiert werden.

2.1 Die soziale und wirtschaftliche Voraussetzungen in Wien

In diesem Abschnitt gilt es zunächst den historischen Hintergrund von Gründerzeitbauten zu erwähnen, die bis heute das Stadtbild von Wien prägen. Wiener Gründerzeitbauten umfassen in erster Linie die Zeitperiode zwischen 1848 und 1918, wobei hier vor allem die Zinshäuser entstanden, die noch prägend für das Stadtbild Wiens sind (Otto Immobilien 2020:2). Die Epoche wurde sowohl von einem starken Bevölkerungswachstum, von einem Wirtschaftswandel, sowie von einem Umschwung im Gesellschaftsaufbau geprägt (Abrihan 2013:8). 1840 zählte die Stadt Wien 440 000 Einwohner*innen. Bis 1870 stieg die Einwohner*innenzahl weiter bis auf 843 000. Bis zur Jahrhundertwende verdoppelte sich die Bevölkerung ein weiteres Mal (1900: 1643000 Einwohner*innen). Ab diesen Zeitpunkt entstand die Zunahme Einwohner*innen überwiegend um den Gürtel der Vororte. Nach der Jahrhundertwende flachte der Bevölkerungsanstieg in Wien etwas ab und erreichte 1918 den Höchstwert von 2 238 545 Einwohner*innen (Bobek & Lichtenberger 1978:30). Der starke Bevölkerungszuwachs war sowohl auf eine Zuwanderung als auch auf einen Anstieg der Geburtsrate zurückzuführen. Bedingt durch die Wohnungsnot wurden viele Wohnbauten errichtet, was wiederum in einer Umstrukturierung der Stadt Wien resultierte. Die Gründerzeit gilt ebenfalls als eine Phase des wirtschaftlichen Aufschwungs in Österreich, einhergehend mit der Industrialisierung, die mit der Märzrevolution 1848 begann und mit dem großen

Börsenkrach 1873 endete (Abrihan 2013:8). In der Epoche der Gründerzeit wurden aufgrund der Wohnungsnot 450.000 Wohnungen errichtet, die auch heute noch zu einem großen Teil bestehen und das wienerische Stadtbild möglicherweise nachhaltig prägen (Bobek & Lichtenberger 1978:57). Die damaligen Ansprüche an die Wohnqualität unterschieden sich jedoch stark von heutigen Anforderungen an Städtewohnungen. Die heute – von Wohnungssuchenden oftmals sehr beliebte große und hohe Räume Wiener Wohnungen – beherbergten während der ersten Phase der Industrialisierung Großfamilien und größere Personengruppen auf engstem Raum. Die Toiletten und Waschbecken waren in den meisten Fällen im Flur oder im Treppenhaus situiert und wurden von allen Bewohner*innen des jeweiligen Geschosses benutzt (Giebeler u. a. 2008:132). Zudem wurden die Wohnungen im Schichtbetrieb genutzt, daher spielten Untermieter*innen und Bettgeher*innen hinsichtlich der Haushaltsstruktur eine wesentliche Rolle. In den Vorstädten und Vororten konstituiert sich nahezu ein Viertel der Bevölkerung aus dieser Personengruppe. Die starke Bevölkerungszunahme führte zu einer Wohnungsnot, zahlreicher Arbeiter*innen benötigten Übernachtungsmöglichkeiten und waren somit auf Untermietung angewiesen (Bobek & Lichtenberger 1978:34). Neben Arbeiter*innen, kam im Kontext der damaligen Haushaltsstruktur zudem dem Hauspersonal eine wesentliche Rolle. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts (1869) betrug der Anteil „familienfremder Personen“ in den Haushalten 42,6% der Gesamtbevölkerung (Bobek & Lichtenberger 1978:35). Der hohe Prozentsatz führen Bobek & Lichtenberger auf die Auflösung der feudalistischen Familienstruktur zurück, eine erste Auswirkungen der entstehenden Industrialisierung (Bobek & Lichtenberger 1978:35). Nach der Hochgründerzeit sank der Anteil an Untermieter*innen und Bettgeher*innen, sodass sie 1910 nur mehr 8,5% der Gesamtbevölkerung ausmachten (Bobek & Lichtenberger 1978:34). Die Zinshäuser waren also eine architektonische Antwort auf demografische, ökonomische und soziale Bedürfnisse des 19. Jahrhunderts. Trotz anderer Lebensumstände färben die zentralen Charakteristika der Gründerzeitbauten, die im Folgenden näher dargestellt werden, bis dato das Stadtbild von Wien.

2.2 Architektonische Charakteristika von Gründerzeitbauten

In der *Bauordnung* von 1859 wurde für die neuen Straßen eine Mindestbreite von acht Klaftern¹ und eine maximale Gebäudehöhe von dreizehn Klaftern festgelegt (Bobek & Lichtenberger 1978:45). Erst seit der Bauordnung 1883 musste die Straßenbreite im Verhältnis zur Gebäudehöhe angepasst werden, was im Allgemeinen zu einer Verbreiterung der Straße führte. Gleichzeitig wurde erstmals ein Bauzonenplan erstellt, welcher die „grobe funktionale Gliederung“ von Wien vorgab (Bobek & Lichtenberger 1978:46). Zur gleichen Zeit wurde die Stadt nach Gebäudehöhen zониert. In den Bezirken mit der höchstmöglichen Bebauung waren fünf Geschosse erlaubt (Bobek & Lichtenberger 1978:46).

Die gründerzeitliche Epoche unterteilt sich in Frühgründerzeit (1848-1870), Hochgründerzeit (1870-1890) und Spätgründerzeit (1890-1918) (Otto Immobilien 2020:5). Die Wohnbautätigkeit jener drei Epochen kann laut Bobek & Lichtenberger in drei Grundtypen unterteilt werden: in den (1) teilweisen Umbau, (2) den vollständigen Umbau, und (3) den Neubau. Der *teilweise Umbau*, verwendete das bestehende Gebäude als Ausgangspunkt. In der Frühgründerzeit (1848-1870) wurde der Umbau grundsätzlich im Stil der Biedermeierzeit fortgeführt (Bobek & Lichtenberger 1978:69). Bei neuen Wohnungen handelte es sich aufgrund der Schmäle der Grundstückparzellen überwiegend um kleine Wohneinheiten mit komplexem Grundrissaufbau. Die Wohnungsgrößen unterscheiden sich bezüglich des Straßen- und Hintertrakts. Im Hintertrakt der Gebäude befanden sich die kleineren Wohnungen (Bobek & Lichtenberger 1978:70). Der Baubestand konnte jedoch ebenfalls ganz abgerissen werden und durch einen Neubau ersetzt werden, dann handelte es sich um einen sogenannten *vollständigen Umbau*. In der frühgründerzeitlichen Wohnbautätigkeit spielte dieser Grundtyp allerdings eine untergeordnete Rolle. Der dritte Typ ist der *Neubau* auf einem bisher unbebauten Grundstück. Neubauten entstanden vorwiegend am äußeren Rande der Vorstädte. Neubauten konstituieren mengenmäßig den Großteil der frühgründerzeitlichen Wohnbautätigkeit (Bobek & Lichtenberger 1978:69). Die Wohnungstypen wurden von der Biedermeierzeit übernommen (Bobek & Lichtenberger 1978:72). Im ersten Geschoss befand sich

¹ eine Längenangabe die in Österreich 189,6484 cm beträgt

mindestens eine größere Wohnung. Die Erschließung der Wohnungen erfolgt, abhängig von der Anzahl der Stiegenhäuser, durch einen Korridor oder ein Stiegenpodest, wo sich ebenfalls die Toiletten befanden (Bobek & Lichtenberger 1978:73).

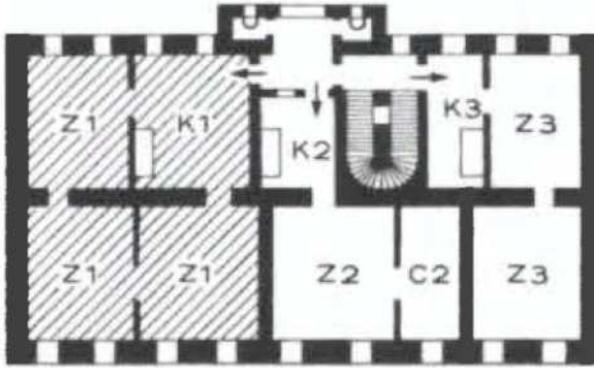


Abb. 02: Grundriss eines frühgründerzeitlichen Straßentraktes
Quelle: Bobek & Lichtenberger 1978:70

Verglichen mit den vorangehenden und folgenden Jahrzehnten wurde der *teilweise Umbau* vor allem in der Hochgründerzeit (1870-1890) angewendet, nämlich um mehr Wohnraum zu schaffen (Bobek & Lichtenberger 1978:86). Die Bauordnungen von 1870 und 1883 ließen fünf geschossige Bauten zu (inkl. Erdgeschoss und Mezzanin) bei einer – insofern die Straßenbreite ausreichte – Maximalhöhe von 25 m (Otto Immobilien 2020:6). In den Vororten wurde durch *den teilweisen Umbau* das Eigenhaus zum Miethaus umfunktioniert. Auch entstanden im Zuge von *teilweisen Umbauten* während der Hauptgründerzeit Hintertrakte, wodurch in einigen Fällen der Hausgarten verschwand (Bobek & Lichtenberger 1978:88). Beim *vollständigen Umbau* beeinflusste die Form der vorgegebenen Parzelle die architektonische Formgebung des Gebäudes. Die Gliederung der Gebäudestruktur in ein Vorder- und ein Hinterhaus war eine Antwort auf die tiefen und breiten Parzellen in den Vorstädten. Im Straßentrakt befinden sich größere Mittelwohnungen, im Hoftrakt hingegen die Kleinwohnungen (Bobek & Lichtenberger 1978:88). Unterschiede in den sozialen Schichten der Bewohner*innen von Vorder- und Hinterhäusern spiegelten sich nicht nur in den Wohnungstypen wieder sondern ließen sich zudem an der Fassadengestaltung erkennen (wohnfonds_wien 2016:18). Die straßenseitigen Fassaden haben aufwendigen Verzierungen, die Hoffassaden hingegen sind banal verputzt, bzw. bestehen aus unverputztem Ziegelmauerwerk. Eine ähnliche Diskrepanz lässt sich bei den Stiegenhäusern beobachten: die zum Straßentrakt

situieren Stiegehäuser sind großzügig angelegt, haben breite Läufe, großflächige farbige Verglasungen und kleine Steigungsverhältnisse. Die Stiegen im Hinterhof hingegen sind schmal und wenig belichtet (Giebeler u. a. 2008:132). Sind beim Vorderhaus die Toiletten in den Wohnungsverband eingeschlossen, befindet sich der geteilte Toiletten- und Wasserlaufbereich von Kleinwohnungen im Hinterhaus neben den Stiegen (Bobek & Lichtenberger 1978:88).

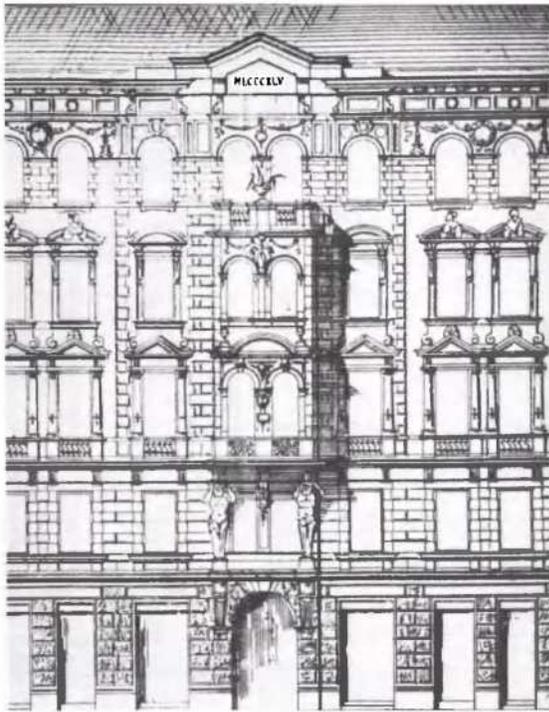


Abb. 03: Fassadengestaltung eines Reihenmiethauses der Hochgründerzeit

Quelle: Bobek & Lichtenberger 1978:122

Im Gegensatz zu den weniger auffallenden, dezenteren Fassaden des frühgründerzeitlichen Miethauses zeichnen sich die Fassaden der Hochgründerzeit durch eine stilistische Orientierung an der Formensprache der staatlichen Repräsentationsbauten aus (Abb. 03) (Otto Immobilien 2020:5). Fassaden großbürgerlicher Miethäuser inspirierten Arbeiterzinskasernen. Neben Vertikalgliederungen wurden zudem, wenn auch in abgeschwächter und weniger extravaganter Ausprägung, Verzierungen und Schmückungen dieser Bauten übernommen (Bobek & Lichtenberger 1978:68). Mit dem industriellen Fortschritt wuchsen in Zeiten der Hochgründerzeit auch die Möglichkeiten der Herstellung von Fassadenelementen (Otto Immobilien 2020:6). Die damals entstandenen individualisierten Fassaden prägten ein ganzes Stadtbild. Zunächst ließen sich die Fassaden der Gründerzeit dem Historismus zuordnen und waren bspw. stark gegliedert. Später gestalteten sich

die Fassaden dezenter und griffen die Formensprache des Jugendstils auf (wohnfonds_wien 2016:18).

In der Spätgründerzeit (1890-1918) bestand die bauliche Leistung vor allem aus dem Umbau des älteren Baubestandes und der Erweiterung des Stadtbereiches. Aufgrund der ansteigenden Bodenpreise wurde eine maximale Ausnutzung der Grundstücke angestrebt. Wie auch in der Hochgründerzeit wurde auch hier der ältere, vorliegende Baubestand umgebaut. Über dies hinaus erfolgte eine Vergrößerung des Stadtbereiches durch zusätzliche Neubauten (Bobek & Lichtenberger 1978:103). Durch die steigenden Bodenpreise wurde gegen Ende der Gründerzeit vermehrt auf Umbauten gesetzt. Hierbei handelte es sich vor allem um *vollständige Umbauten*, da ein *teilweiser Umbau* den neuen bautechnischen und architektonischen Methoden sowie den erhöhten Komfortansprüchen nicht gerecht wurden. Im Stadtkern wurde der Altbestand, welcher nicht mehr den damaligen Anforderungen entsprach, demoliert und durch einen Neubau ersetzt. Dies betraf überwiegend klassizistische Wohnbauten bzw. Biedermeierhäuser, die den Ansprüchen ihrer Bewohner*innen nicht mehr gerecht wurden. Innerhalb des Gürtels gab es nur noch wenige freie Parzellen wodurch vor allem an der Peripherie des Stadtkerns Neubauten entstanden (Bobek & Lichtenberger 1978:104). Durch die Bauordnung von 1893 wurde die maximale Flächenausnutzung auf 85% begrenzt (Bobek & Lichtenberger 1978:105). Vor dem Hintergrund des Anspruches die Grundflächen maximal auszunutzen, gestalteten sich die Grundrisse immer verschachtelter. Die Konsequenzen zunehmend komplexer Grundrisse führten zu ungünstig angeordneten Räumen sowie zu unbelichteten und schlecht belüfteten Nebenräumen. In der Spätgründerzeit unterscheiden sich *vollständige Umbauten* von Erstbebauungen in ihrem Bautyp nur wenig. In beiden Bauszenarien wurde überwiegend der Doppeltrakter verwendet (Abb. 04) (Bobek & Lichtenberger 1978:106). In der Spätgründerzeit gab es keinen so prägnanten Unterschied bezüglich der Wohnungsgrößen zwischen Vorder- und Hinterhaus, wie man ihn noch bei Hochgründerzeitbauten vorfand. Zudem sind die Wohnungen unterschiedlicher Stockwerke weniger heterogen als noch in der Hochgründerzeit. Alles in allem ist dementsprechend eine Homogenisierung der Wohnungsstruktur zu erkennen (Bobek & Lichtenberger 1978:109). In der Spätgründerzeit entstanden auch vermehrt kleinere Mittelwohnungen (bestehend aus zwei Zimmern, Küche und Vorzimmer), die gleich wie die größere Mittelwohnungen der Hochgründerzeit direkt

vom Stiegenpodest aus zugänglich waren. Im Wohnungsverband sind ebenfalls Toiletten und Wasserleitung vorhanden. Die gleichen Verbesserungen wurden ebenfalls für die Kleinwohnungen der Arbeiter*innen übernommen (Bobek & Lichtenberger 1978:111). Zudem hatte die Fassadengestaltung eine zunehmende Tendenz zur Vertikalität, Asymmetrie und Kopflastigkeit (Otto Immobilien 2020:6).

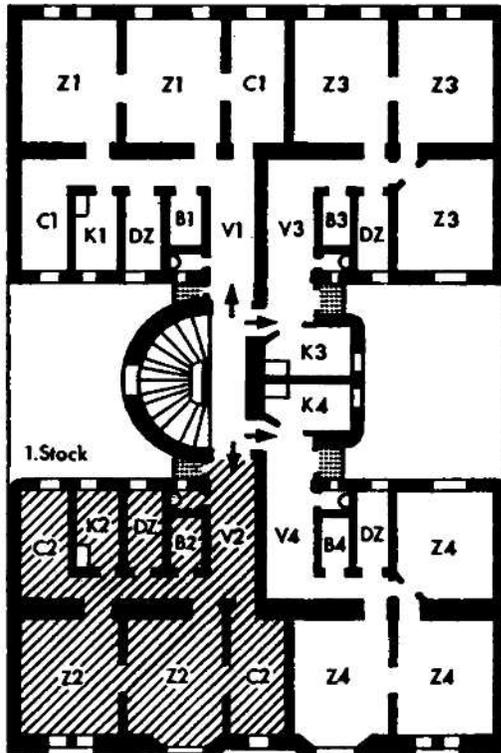


Abb. 04: Doppeltrakter der Spätgründerzeit
Quelle: Bobek & Lichtenberger 1978:109

Die Räume in den Gründerzeitbauten haben oftmals eine Raumfläche von über 20 m³ und eine ca. 3 m Raumhöhe. Diese Maßnahmen sind – wie bereits erwähnt – auf den Anspruch zurückzuführen, möglichst viele Personen auf engstem Raum unterbringen zu können (Giebeler u. a. 2008:132). Im Verlauf der Gründerzeit verringerte sich zwar der familienfremde Anteil in den Haushalten, die Wohnungsverhältnisse verbesserten sich dennoch nicht beachtlich. Vielmehr verteilten sich die Bewohner*innen auf mehrere Kleinwohnungen (Bobek & Lichtenberger 1978:60). Im Verlaufe der Gründerzeit ist der Anteil an Kleinwohnungen kontinuierlich angestiegen. 1847 machten die Kleinbauten ca. ein Drittel der Bebauung aus, 1917 konstituieren sie

die Hälfte aller Wiener Wohnungen (Bobek & Lichtenberger 1978:57). Die Kleinstwohnungen wurden überwiegend von Zuwander*innen der Unterschicht des industriellen Gesellschaftsaufbaus genutzt (Bobek & Lichtenberger 1978:59). Die Struktur der Gründerzeitbauten setzt sich meist aus parallel zur Außenfassade verlaufenden tragenden Innen- und Außenwänden mit einer großen Wandstärke zusammen. Daraus ergeben sich orthogonal ausgerichtete Räume mit simpler Raumfolge (Abb. 02). Aufgrund des einfachen, strukturierten Aufbaus sind Gründerzeitbauten vielseitig nutzbar und bergen großes Umbaupotential, bspw. zu Büroflächen und offenen Wohngrundrissen. Die stark dimensionierte, massive Bauweise der Außenwände gewährleistet grundsätzlich einen guten Schallschutz und eine ausreichende Wärmespeicherung. Darüber hinaus sind auch die hoch eingesetzten Fenster vorteilhaft für die natürliche Belichtung der Raumes und gewährleisten eine gute Tageslichtbelichtung (Giebeler u. a. 2008:133).

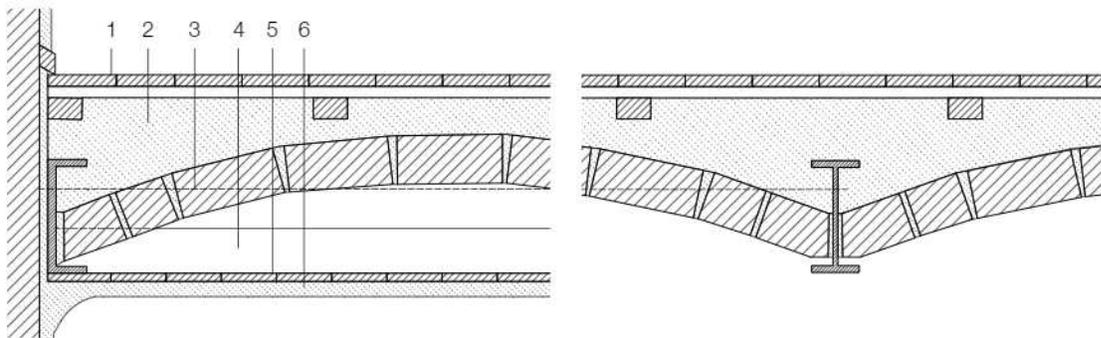


Abb. 05: Kappendecke zwischen I-Trägern

links: Kappendecke mit verputzter Unterdecke auf Holzkonstruktion, rechts: Kappendecke unverkleidet

1: Fußboden auf Blindboden, 2: Auffüllung, 3: Ankerstab, 4: Querleiste, 5: Schalung, 6: Putz/Stuck

Quelle: Giebeler u. a. 2008:136

Die Keller von Gründerzeithäusern sind nicht als Raumfläche vermietbar und können somit ökonomisch nicht genutzt werden. Dennoch waren sie hoch funktional. Giebeler et al. (2008, S. 133) verweisen an dieser Stelle bspw. auf drei zentrale Funktionen: (1) die Lagerung von Lebensmittel oder Heizmaterials, (2) der Schutz vor aufsteigender Feuchte bzw. Spritzwasser im Sockelbereich und (3) der Schutz vor dem, zur Zeit als gesundheitsschädlich angenommenen, Grundwassers. Die Keller sind zwar standfest, jedoch dauerhaft feucht und können folglich nicht als Aufenthaltsräume genutzt werden (Giebeler u. a. 2008:133). Die Kellerdecken von Gründerzeitbauten sind, im Gegensatz zu den Holzbalkendecken in den Obergeschossen, luftdicht und

feuchtigkeitsbeständig konstruiert. Es handelt sich bei den Kellerdeckenkonstruktionen fast ausschließlich um Gewölbe oder Teilgewölbe (Kappengewölbe). Um höhere Räume zu erhalten, wurden in der Gründerzeit wurden grundsätzlich keine Tonnengewölbe sondern Bogensegmente verwendet (Giebeler u. a. 2008:135). Die Gewölbe wurden aus Ziegelsteinen mit Kalk- oder Kalkzementmörtel mit geringem Zementanteil hergestellt. Oftmals wurde die Systemspannweite der Kappengewölbe zusätzlich unterteilt, um die Stichhöhe möglichst gering zu halten. Die verbauten Gurtbögen oder Stahlträger (I-Träger) tragen die Lasten des Bogensegments ab (Abb. 05). Die Stahlträger hatten oftmals eine Spannweite von nur 1,5 – 2,5 m, um die Stichhöhe des Gewölbes auf ca. 30 cm zu limitieren. Das Kappengewölbe kam oftmals zur Verwendung, weil sie auch von ungelehrten Maurern ausgeführt werden konnten. Die Fläche oberhalb des Gewölbezwickels wurde mit Sand, leichte Schlacke, oder auch Ziegelreste verfüllt. In die Schüttung wurden Polsterhölzer eingeschoben auf denen die Blindböden befestigt wurden damit anschließend der Fußbodenbelag im Erdgeschoss verlegt werden konnte (Giebeler u. a. 2008:136).

Die oberirdischen Geschosse beginnen meist oberhalb der Spritzwasserebene und reichen bis zum Dachgeschoss. Obere Stockwerke von Gründerzeitbauten wurden im Gegensatz zu den Kellern grundsätzlich nicht benutzt (Giebeler u. a. 2008:137). Die Außenwände der oberen Geschosse bestehen bei fast allen europäischen Gründerzeitbauten aus Ziegelmauerwerk. Die Mauerstärke der Gründerzeitbauten folgt insofern grundsätzlich baupolizeilichen Vorschriften, als dass sie von genormten Ziegelsteinen gewährleistet wird (Giebeler u. a. 2008:138). In Österreich beträgt das genormte Format für Ziegelsteine 290 x 140 x 65 mm (Giebeler u. a. 2008:137). In den unteren Geschossen sind aus statischen Gründen die Wandstärken erheblich höher als unterhalb des Dachgeschosses. Durch diese Verjüngung der Außenwand entsteht mit jedem zunehmenden Geschoss eine Verschlechterung der Wärme- und Schalldämmung, welche von den Bauherren bewusst in Kauf genommen wurde (Giebeler u. a. 2008:138). Für das Mauerwerk wurde meist Kalk oder seltener Zementmörtel verwendet. Kalk erhärtet nur bei Luftzufuhr, was zur Folge hat, dass oftmals der Mörtel sehr lange brauchte, um zu erhärten. Kalkmörtel wurde ebenfalls als Putzmörtel sowohl für Innen- als auch Außenflächen verwendet. Reiner Zementmörtel wurde lediglich an Bereichen verwendet, die stärker durch Feuchtigkeit beansprucht werden, wie bspw.

außen am Sockelbereich oder an Bädern. Im Innenbereich konnte ebenfalls Gips- und Lehmputz verwendet werden (Giebeler u. a. 2008:139).

Kennzeichnend für Gründerzeitbauten – und das wurde bereits dargelegt – sind ihre dekorativen, horizontal gegliederten Bänder an der Fassade, das sogenannten Gesimse. Das Gesimse ist nicht nur dekorativ, sondern auch funktional. Durch das Gesimse werden bspw. die Absätze, die mit zunehmender Geschosshöhe durch eine Verringerung der Wandstärke entstehen, verdeckt (Abb. 06). Zudem schützen sie vor Schlagregen, der kann nämlich durch das Gesimse geschossweise abtropfen. Als dekoratives Element hebt das Fenstergesimse die fassadenbündige Kastenfenster optisch hervor. Unter einem funktionalen Gesichtspunkt erschwert es das Eindringen von Wasser in die Fensterfugen (Giebeler u. a. 2008:139). Originalbestände in Wien besitzen noch Holzkastenfenster. In einem guten Zustand hat dieser Fenstertyp durchaus positive Wärme- und Schallschutzeigenschaften. Meist ist der Zustand jedoch sanierungsbedürftig und die äußeren Fensterflügel werden durch neue ausgetauscht. Für denkmalgeschützte Fassaden werden meist Kastenfenster vorgeschrieben (wohnfonds_wien 2016:19).

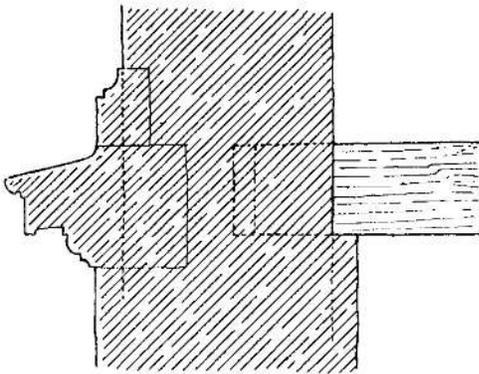


Abb. 06: Kaschierung des Mauerversatz durch Gesims

Quelle: Giebeler u. a. 2008:137

Die im vorliegenden Kapitel herausgearbeiteten architektonischen Merkmale von Gründerzeitbauten, (Gesimse, Holzkastenfenstern, konstruktiven Merkmale, massives Ziegelmauerwerk, etc.) sind zeitperiodentypische Merkmale und sind folglich bei jeglichem Eingriff in den Bestand als solche zu berücksichtigen. Um in weiterer Folge konkretere Aussagen und Empfehlungen zur

thermischen Sanierung treffen zu können, gilt es im folgenden Abschnitt konkreter auf Vor- und Nachteile dieser Bausubstanz zu verweisen.

2.3 Vor- und Nachteile von Gründerzeitbauten im Kontext aktuelle Ansprüche an Architektur

Neben den zahlreichen Vorteilen von Gründerzeitbauten kann, insbesondere aus heutiger Perspektive, zudem auf Nachteile verwiesen werden. Eine zentrale Schwäche von Gründerzeitbauten sind bspw. die engen Hinterhofbebauungen, die oftmals schlecht belichtet sind und keine Querlüftung der Räumlichkeiten erlauben. Zweitens sind sie in ihrer technologischen Ausstattung begrenzt und sind oftmals mit modernen Technologien nur schwer kompatibel. Drittens, und teilweise daran anschließend, entsprechen die Brandschutzwerte der Holzbalkendecke nicht den heutigen Normen. Ein weiterer Nachteil stellen die unzureichenden oder nicht vorhandenen Abdichtungen der Kellerwände dar, weil sie Feuchte in den Kellern und Erdgeschosswohnungen provozieren. Die Trockenlagerung des Kellers gestaltet sich insbesondere beim Umbau problematisch. Auch die Holzbalkendecken bieten grundsätzlich keinen ausreichenden Trittschall- und Luftschallschutz (Giebeler u. a. 2008:133). Der durchschnittliche Trittschallpegel einer gründerzeitlichen Tramdecke beträgt ca. 50-60 dB und liegt demnach deutlich über den heutigen von der OIB Richtlinie 5 geforderten 48 dB. Diesbezüglich können jedoch Maßnahmen zur Schallschutzverbesserung vorgenommen werden (Standards der Baudenkmalpflege 2015:354). Eine letzte Schiefelage besteht in der massiven Bauweise der Außenwände, die zwar guten Wärmeschutz, jedoch unzureichende Wärmedämmung für heutige Standards bietet. Für die thermische Dämmung zeigt insbesondere die Außenwand hohes Verbesserungspotential auf (Giebeler u. a. 2008:139). Auch wenn die Außenwände heutigen Normen und Bauteilanforderungen nicht mehr gerecht werden, sind denkmalgeschützte und reich gegliederte Außenfassaden der Gründerzeitbauten hinsichtlich der Sanierungsverordnung ausgenommen (wohnfonds_wien 2016:19).

An dieser Stelle kann vermerkt werden, dass trotz beschriebenen baulichen Problemstellen die Wohnungen aus Gründerzeitbauten von großer Beliebtheit erfahren und auch im Vergleich zu Neubauten, Vorteile aufzeigen. Diese gilt es im Folgenden zu beschreiben.

Die Vorteile der Gründerzeitbauten liegen insbesondere in der Ausrichtung der Räume und, damit einhergehend, in der Raumaufteilung. Hier kann noch einmal auf die großzügigen Räumhöhen- und -flächen verwiesen werden, sowie auf die Möglichkeit einer individuellen und flexiblen Umgestaltung. Die Außenwände lassen sich insbesondere hingehend des Wärmeschutzes verbessern.

Abschließend kann somit festgehalten werden, dass im Kontext einer thermischen Sanierung von Gründerzeitbauten vor allem dem Erhalt zeitperiodentypischer Fassadenmerkmale besondere Beachtung geschenkt werden muss. Das folgende Kapitel adressiert dabei konkreter unterschiedliche Sanierungsmethoden für Gründerzeitbauten.

3. Aktuelle Sanierungsmethoden im Kontext von Gründerzeitbauten

Nach einer geschichtlichen und architektonischen Einführung in die Thematik der Gründerzeitbauten im vorherigen Kapitel, gilt es im folgenden Kapitel die Bausubstanz der Gründerzeitbauten zu analysieren. Ausgehend von dem Anspruch, dass die energetische Sanierung an die bauphysikalischen Gegebenheiten des Baubestandes anzupassen ist, gilt es dabei insbesondere Sanierungsmethoden zu veranschaulichen, die dieser Forderung Rechnung tragen. Zunächst gilt es (3.1) den Begriff der *thermischen Sanierung* unter dem Gesichtspunkt grundlegender Ziele und potentieller Schwierigkeiten und Problemlagen zu definieren. Anschließend folgt im Hinblick auf die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit eine spezifischere Auseinandersetzung mit Sanierungsprinzipien im Kontext von Gründerzeitbauten. Dabei rückt zum einem (3.2) die Kellerzone und zum anderen (3.3) das Erd- und Obergeschoss ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Die Annäherung an aktuelle Empfehlungen für energetische Sanierung im Kontext von Gründerzeitbauten scheint insofern zentral, als dass diese Überlegungen daran anschließend (Kapitel 4) auf den Themenbereich des Lehmbaus übertragen werden können.

3.1 Sanierungsziele und Maßnahmen

Die Prozeduren die sich als thermische Sanierung verstehen lassen sind vielfältig. Einen zentralen Stellenwert nehmen dabei die im *Klimaschutzbericht 2019* aufgelisteten fünf Maßnahmen ein: (1) Austausch von Fenstern und Türen, (2) thermische Sanierung der Fassade, (3) Wärmedämmung der obersten Geschossdecke/ bzw. der Dachschrägen, (4) Wärmedämmung der untersten Geschossdecke/ bzw. des Kellers, (5) sowie Austausch der Wärmeversorgung. Bedeutsam sind diese fünf Eingriffe insofern, als dass bei einer Umsetzung von minimal drei dieser Sanierungsmaßnahmen per Definition von einer umfassenden thermisch-energetischen Sanierung die Rede ist. Eine solche umfassende Sanierung sollte – so die Empfehlungen vom Umweltbundesamt (2009) – wenn möglich einer schrittweisen Sanierung von Einzelteilen vorgezogen werden. Eine Sanierung sollte dementsprechend die gesamte Gebäudehülle, als auch die Erneuerung der Heizung

umfassen. Zudem sollte sie – und das untermauert die Erläuterungen in Kapitel 1 – immer im Einklang mit einem Gesamtkonzept stehen (Umweltbundesamt 2019:131).

Im Kontext von Wien kommt diesem Anspruch einen besonderen Stellenwert zu. Die Rate der umfassenden thermisch-energetischen Gebäudesanierungen betrug im Zeitraum von 2008 bis 2018 nur 0,7%. Im gleichen Zeitraum wurde bei 0,9% der Hauptwohnsitze mindestens eine der fünf thermischen Sanierungsmaßnahmen umgesetzt, die mit einer Erneuerung der Heizung kombiniert wurde. Der aktuell für den Zeitraum 2020-2030 angestrebte Zielwert von 2%, der im Entwurf zur integrierten Klima- und Energiestrategie angegeben wurde, gilt es dementsprechend also noch zu erreichen (Umweltbundesamt 2019:134). Zudem gilt es weiteren Kriterien Rechnung zu tragen. Laut dem Wohnfond Wien (2016, S. 19) sollten im Zuge einer thermischen Sanierung aus bauphysikalischer Sicht alle glatten Fassaden gedämmt werden. Ein 60 cm starkes Ziegelmauerwerk hat einen Wärmedurchgangswert von über $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ welcher mit jedem weiteren Geschoss, also mit geringerer Außenwandstärke, zunimmt (wohnfonds_wien 2016:19). Das Dämmkonzept für Außenwände von historischen Außenwänden sollte möglichst schadenstolerant und diffusionsoffen sein. Sowohl die materialbezogenen, als auch die konstruktiven Eigenschaften müssen im Einklang mit dem Gesamtkonzept der Sanierung sein (Standards der Baudenkmalpflege 2015:361). Die Reduktion der Wärmeströme durch die Gebäudehülle zählt zu einem zentralen Ziel der energetischen Sanierung. Eine Sanierung hat immer auch einen Impact auf den Wärme- und Feuchtehaushalt des Gebäudes und beeinflusst infolgedessen immer auch das Raumklima. In den kalten Monaten sollten die Wärmeströme von innen nach außen verhindert werden, in den warmen Monaten umgekehrt. An dieser Stelle ist, neben der thermischen Dämmung, insbesondere die Gebäudedichtheit als wichtiger Parameter zu verstehen. Die Kombination einer wärmegeprägten und luftdichten Gebäudehülle, im Einklang mit einer angemessenen Heiz- und Lüftungstechnik resultieren nicht nur in einem behaglichen Raumklima, sondern zudem in erheblichen Energieeinsparungen. Nur unter Berücksichtigung dieser Bedingungen bleiben Sanierungen auf Dauer schadensfrei und gelten als erfolgreich. Neben den energetischen Zielen können im Zuge einer Sanierung ebenfalls der Schall- und Brandschutz an aktuelle Standards angepasst werden. Beim Planen der Sanierung ist zu bedenken, dass die Maßnahmen mindestens den Anforderungen der nächsten 30 Jahren gerecht werden müssen (Giebeler u. a. 2008:32).

Aus biophysikalischer Sicht sollte laut Giebeler u. a. (2008) eine gesamtheitliche Sanierung eine „durchlaufende wärmedämmende Hülle“, eine „durchlaufende Luftdichtheitsebene“ und ein „angepasstes Lüftungskonzept“ gewährleisten (Giebeler u. a. 2008:36). Wird einer der aufgelisteten Parameter nicht beachtet, kann es zur Beschädigung der Bausubstanz – insbesondere zu Feuchtigkeitsschäden – kommen (Giebeler u. a. 2008:36). Durch das Anbringen einer Dämmschicht verändert sich der Feuchtigkeitshaushalt des Gebäudes. Vor allem bei Bestandsgebäuden mit Holzbalkendecken sollten, so Giebeler u.a. (2008), die verwendeten Dämmkonstruktionen einen sehr geringem Dampfdiffusionswiderstand aufzeigen. Dies ist notwendig, damit die vorhandene Baufeuchte weiterhin nach außen abgeführt werden kann. Besonders im Sockelbereich ist darauf zu achten, dass die Feuchtigkeit aus dem Erdreich nicht im Bauteil verbleibt, sondern an der Oberfläche des Mauerwerks durch die Außenluft abgegeben werden kann, und sich nicht ansammeln kann (Giebeler u. a. 2008:122). Die Anforderungen an die Lüftung leiten sich von den bauphysikalischen Gegebenheiten ab. Da bei unsanierten Gebäuden noch keine wärmedämmenden Maßnahmen getroffen wurden, braucht es noch vor der Sanierung eine Definition der durchgehenden thermischen Hülle. Treppenhäuser, Kellerabgänge und teilbeheizte Bereiche stellen bei der Definierung der thermischen Hülle Problemzonen dar, die besonderes Augenmerk verlangen (Giebeler u. a. 2008:36). Durch eine neue Festlegung der thermischen Hülle und der hiermit einhergehenden verbesserten Luftdichtheit muss die Luftwechselrate beachtet werden. Diese muss an die Sanierungsmaßnahmen angepasst sein. Ist dies nicht der Fall, steigt die Wahrscheinlichkeit der Tauwasserbildung. Das Risiko der Schimmelentstehung aufgrund von Tauwasserbildung betrifft insbesondere Wärmebrücken. Hier kann sich vermehrt Feuchtigkeit ansammeln (wohnfonds_wien 2016:96). Das Luftdichtungskonzept wird parallel zum Wärmedämmkonzept entwickelt und muss mit diesem im Einklang stehen. Eine luftdichte Gebäudehülle führt zu mehr Behaglichkeit, einem verringertem Heizenergiebedarf, einem verbesserten Schallschutz und zu einer Vermeidung von Feuchteschäden aufgrund von Bauteildurchströmungen mit warmer Raumluft (Giebeler u. a. 2008:36). Unter der Behaglichkeit wird das Wohlbefinden der Nutzer*innen in den Räumlichkeiten verstanden, das durch physikalische Umgebungsbedingungen (z.B. Raumlufttemperatur), individuelle-, physiologische Kriterien (z.B. Alter) als auch durch intermediäre Bedingungen (z.B. Bekleidung) beeinflusst wird. Die Behaglichkeit basiert demnach auf einer

Vielzahl von Aspekten, die sich nur schwer durch exakte Bemessungen erheben lassen (Hegger u. a. 2007:55).

Im Kontext von Gründerzeitbauten gestalten sich Empfehlungen zur Innen- und Außendämmung besonders spezifisch, weil hier die Konservierung des zeittypischen Charakters der Fassade priorisiert wird und Sanierungsmaßnahmen folglich den Baubestand berücksichtigen müssen (Giebeler u. a. 2008:122). In Wien ist es aus Denkmalschutzgründen grundsätzlich nicht möglich Gebäude innerhalb Schutzzonen, oder aber auch mit denkmalgeschützten Fassaden, durch eine Außendämmung zu sanieren. Auch beim Fensteraustausch müssen vielzählige Anforderungen berücksichtigt werden, damit nicht nur die Teilung, sondern ebenfalls die Konstruktionsform konserviert bleibt. Die nicht gegliederten Hoffassaden sind jedoch von diesen Bestimmungen ausgeschlossen, da sie keinen Einfluss auf den Ortsbildschutz haben (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013:117). Dabei gilt es auch außerhalb der Schutzzone die historischen Fassaden im Zusammenhang mit der Prägung des Stadtbildes zu erhalten. Außerhalb der Schutzzone ist es unter Umständen möglich eine Außendämmung durchzuführen und eine Nachahmung der originalen Fassadenornamente auf die neue Oberfläche zu befestigen. Ob die vorliegende Fassade erhaltenswürdig ist oder ob eine Außendämmung möglich ist, lässt sich mittels MA19 beurteilen (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013:118). Demnach schließt eine historische Fassade eine Außendämmung aus, auch wenn diese thermisch besser geeignet wäre. Durch eine Innendämmung wird versucht, den zeittypischen Charakter der Fassade zu erhalten. Dennoch muss beachtet werden, dass eine Innendämmung grundsätzlich das Risiko von Wärmebrücken an der Innenwand vergrößert (Giebeler u. a. 2008:122).

Alles in allem scheint die Herausforderung also darin zu bestehen, ökologische, baupolizeiliche als aber auch architektonische Ansprüche im Sinne des Denkmalschutzes bei der Sanierung von Gründerzeitbauten auf einen Konsens zu bringen. In den folgenden Teilen wird diese Frage spezifischer im Kontext unterschiedlicher Sanierungsprozeduren aufgegriffen.

3.1.1 Außendämmung

Wie bereits beschrieben, ist die Gliederung durch Gesims an der Fassade von gründerzeitlichen Gebäuden eine architektonische Charakteristika, die es zu erhalten gilt (vgl. Kapitel 2.2). Eine zentrale Herausforderung besteht demnach darin, eine hochwertige thermische Sanierung zu gewährleisten, ohne dabei eine Wärmedämmung an der Außenfassade anzubringen.

Bei Sanierungen wird oftmals ein preiswertes Außendämmungssystem, das sogenannte Wärmedämmverbundsystem (WDVS), verwendet. Hierbei handelt es sich um eine verputzte Dämmplatte, die mittels Verklebung, Dübel oder einer Tragkonstruktion an der Fassade befestigt wird (Giebeler u. a. 2008:37). Das System hat sich über Jahre bewährt und lässt sich auch bei komplexen Untergründen anwenden. Für die Dämmung kommen also oftmals preiswerte Schaumkunststoffe zum Einsatz. Handelt es sich allerdings um eine Gebäudeklasse 4, braucht es zusätzlich schwer entflammbare Baustoffe (B1) (Giebeler u. a. 2008:122). An dieser Stelle kommen Dämmstoffe der Baustoffklasse B1 entweder im Sturz- und Laibungsbereich oder in jedem zweiten Geschoss mit einem durchlaufenden, ca. 20 cm hohem Streifen zum Einsatz (Giebeler u. a. 2008:123).

Auch im Sockelbereich können gängige Dämmsysteme aufgrund des Dampfdiffusionswiderstandes zu Problemen führen, weshalb die Dämmstoffe vor dem Anbringen auf ihrer Eignung zu prüfen sind (Giebeler u. a. 2008:123). Bei der nachträglichen Anbringung einer Außendämmung ist auf einen ausreichend tragfähigen und ebenen Untergrund zu achten. Bei einem zu unebenen Untergrund benötigt es ein Ausgleich mit geeignetem Putzmörtel. Bei der Außendämmung wird die Temperatur innerhalb der bestehenden Außenwand deutlich erhöht, was allgemein vor Feuchteschäden schützt. Der Feuchteschutz entsteht dadurch, dass die Taupunkttemperatur erst in der Wärmedämmung unterschritten wird. Dies ist eines der bauphysikalischen Unterschiede von der Außendämmung zur Innendämmung (vgl. Kapitel 3.1.2). Damit der Feuchteschutz einer Außendämmung gewährleistet werden kann, darf das Mauerwerk nicht auskühlen. Dementsprechend muss eine Hinterströmung an der Außenwand vermieden werden. Zudem können nachträglich vorgehängte Fassadensysteme, bspw. aus Holz, Keramik oder Naturstein

feuchttechnischen Problemen entgegenwirken. Das Fassadensystem schützt die Dämmstoffe vor Bewitterung. Die Hinterlüftung des Systems stellt sicher, dass die Baustoffe nicht durch Feuchtigkeit belastet werden (Giebeler u. a. 2008:38).

Demnach kann festgehalten werden, dass eine fachgerecht ausgeführte Außendämmung zwar eine bewährte Sanierungsmaßnahme ist und aufgrund der Tauwasserproblematik grundsätzlich einer Innendämmung vorzuziehen ist. Im Kontext von Gründerzeitbauten allerdings respektiert eine Außendämmung die baulichen Gegebenheiten der Fassade nur unzureichend, sodass in diesem Kontext dennoch mit Innendämmungen gearbeitet werden muss. Im Folgenden rückt dementsprechend die Auseinandersetzung mit der Innendämmung in das Zentrum der Aufmerksamkeit.

3.1.2 Innendämmung

Bei Gebäuden mit erhaltenswerten Fassaden, so wie es bei Gründerbauzeiten der Fall ist, bietet sich also eine Innendämmung an. Da Innendämmungen aus mehreren Gründen problematisch sind, gilt es im Folgenden dies kurz zu erläutern. Erst nach einer solchen Diskussion scheint es sinnvoll, Möglichkeiten und Methoden adäquat zu evaluieren und vor dem Hintergrund des Erkenntnisinteresses der vorliegenden Arbeit die potentiellen Möglichkeiten von Lehm bei Innendämmung zu diskutieren.

Neben dem, von der Innendämmung verursachtem Raumverlust lassen sich noch weitere Nachteile anführen. So sind im Kontext einer Innendämmung entstehende Wärmebrücken durch anstoßende Bauteile oder eingebundene Innenwände quasi unvermeidbar. Aus diesem Grund sind die, laut Energieeinsparverordnung (EnEV) angeforderten, Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile geringer (0,45 statt 0,35) (Giebeler u. a. 2008:123).

Durch eine raumseitige Dämmung der Außenwand sinkt die Oberflächentemperatur an der Innenseite. Dies bewirkt, dass die Anschlusspunkte von Innenwand- und Deckenoberflächen zusätzlich abkühlen, was die Bildung von Tauwasser begünstigt. Um das Risiko der Tauwasserbildung zu

verringern, empfehlen Giebeler u. a. (2008) geringe Dämmstärken (\leq ca. 8 cm) (Giebeler u. a. 2008:123). Hegger u. a. vertreten die gleiche Ansicht und sind für eine Limitierung der Dämmstärke auf ca. 6-10 cm (Hegger u. a. 2007:88). Ausgenommen von diesem Sachverhalt sind Feuchträume und Wände mit unzureichender Luftzirkulation, die es einzeln zu evaluieren gilt. Zudem kann ein 1 m breiter Dämmstreifen an beiden Seiten der anstoßenden Innenwand befestigt werden. Ist die Innenwand weder tragend noch aussteifend, kann die Wand ebenfalls thermisch getrennt werden. Eine solche Trennung geht allerdings mit einem hohen Arbeitsaufwand einher (Giebeler u. a. 2008:123). Die Außenwände können durch die niedrigeren Temperaturen schlechter austrocknen, wodurch die durch Schlagregen verursachte Feuchtigkeit länger in der Konstruktion verbleibt. Wenn warme Raumluft die Innendämmung hinterströmt, kann diese Tauwasserausfall induzieren. Die Dämmebene muss demnach flächig an die Außenmauer angebracht werden, sodass eine Hinterströmung verhindert wird (Giebeler u. a. 2008:38).

Grundsätzlich darf nicht mehr Feuchtigkeit in die Bestandswand gelangen, als über den Sommer austrocknen kann. Bei der Planung einer Innendämmung ist es daher wichtig, nicht das Dämmmaterial isoliert zu betrachten, sondern das ganze Dämmsystem inklusive Baubestand zu berücksichtigen. Es gibt unterschiedliche Herangehensweisen, um einen Feuchteschutz herzustellen. (Sprengard 2016b:87). Bei einer diffusionsdichten Konstruktion wird durch eine Dampfsperren oder einen diffusionsdichten Dämmstoff verhindert, dass Raumfeuchte in die Konstruktion gelangt wird. Diffusionshemmende Konstruktionen stellen ein weiteres Dämmsystem dar. Aus bauphysikalischer Sicht sind diese zwischen den diffusionsdichten und den diffusionsoffenen Konstruktionen zu verorten. Geringe Mengen an Wasserdampf können in die Konstruktion eindringen und trocknen anschließend über den Sommer aus. Diese Konstruktionen sind jedoch diffusionsdichter als die Kategorie der diffusionsoffenen Konstruktionen. Durch das System der diffusionsoffenen Konstruktionen steigt in den kalten Monaten die Feuchtigkeit im gesamten Konstruktionsquerschnitt an, ohne die Bestandswand zu beschädigen. Für dieses System werden kapillaraktive oder kapillarleitende Dämmstoffe eingesetzt die den raumseitigen Feuchtetransport ermöglichen (Sprengard 2016b:87).

Eine weitere Problematik der Innendämmung ist die Verlagerung des Taupunktes. Je nach Dämmsystem muss eine Dampfsperre an der Innenseite der Dämmschicht angebracht werden um somit Feuchtigkeitstransport vom Innenraum in der Dämmebene entgegenzuwirken (Hegger u. a. 2007:88). Durch fehlerhaft angebrachte Dampfbremsen können Dämmmaterialien durchfeuchtet werden, wodurch diese, je nach ihren Eigenschaften, beschädigt werden und ggf. ihre wärmedämmende Wirkung verlieren. Da fehlerhaft angebrachte Dampfbremsen durchaus öfters vorkommen, ist diese Problematik hoch zu gewichten. Anschlüssen an Boden und Decke, sowie den Durchführungen von Installationen muss dementsprechend mit besonderer Sorgfalt begegnet werden. Aufgrund der Durchfeuchtungsproblematik ist es daher ratsam, Dämmstoffe zu verwenden, die keine Dampfbremse benötigen und die über den Jahresverlauf kontinuierlich zum Innenraum austrocknen (Giebeler u. a. 2008:124). Werden dennoch Dampfbremsen verwendet, benötigt es für eine Unterbindung der Luftströmung hinter der Innendämmung einen dichten Anschluss an die Umgebungswände. Die Sorgfalt mit der die Anschlussdetails der dampfbremsenden Folie ausgeführt werden ist oftmals ausschlaggebend darüber, ob die Konstruktion schadensfrei bleibt (Maier 2011:245).

Um den angeführten Problemen zumindest stückweise entgegenzuwirken, scheint die Beurteilung des Feuchteschutzes bei der Planung unumgänglich. Das Glaser-Verfahren liefert dabei erste Anhaltspunkte. Im Kontext von Dämmstoffen mit einem hohem Sorptionsvermögen und einem hohen Transportkoeffizienten für Flüssigtransport, braucht es laut allerdings Giebeler u. a. (2008) dynamische Rechenverfahren. Derartige Verfahren erlauben eine detailliertere Berücksichtigung der Einflussparameter und stellen die Berechnungen als zeitlichen Verlauf dar. Bei inaktiven, nicht- kapillaren Dämmstoffen, benötigt es zwingend eine Dampfbremse (Giebeler u. a. 2008:38). Laut Maier (2011) ist die Problematik des Tauwasserausfalls jedoch geringer als die Berechnung nach Glaser-Verfahren vermuten lässt. Feuchtetechnisch gestaltet sich die Innendämmung weniger problematisch als oft angenommen, da kapillar leitfähige Putze und Baustoffe des Mauerwerks lokale Ansammlungen an Feuchtigkeit an den Oberflächen verteilen können, wo die Feuchtigkeit schließlich verdunstet (Maier 2011:244). Sind die Dämmmaterialien ausreichend in der Lage Wasserdampf aufzunehmen und dieses wieder zu einem späteren Zeitpunkt an die Raumluft

abzugeben, kann auf eine Dampfsperre verzichtet werden. Hierzu können bspw. Kalziumsilikatplatten verwendet werden (Hegger u. a. 2007:88).

Eine Innendämmung – so kann abschließend festgehalten werden – stellt neben der Außendämmung eine weitere Methode dar, die Gebäudehülle wärmetechnisch zu verbessern. Das Wissen über potentielle Probleme, sowie deren akribische Berücksichtigung bei der Planung scheinen notwendig um späteren Schadenbildungen entgegenzuwirken. In Bezug auf diese Arbeit, bzw. während der Suche nach einem geeignetem Dämmsystem, müssen die Anforderungen und Herausforderungen einer Innendämmung an Lehmbaustoffe übertagen werden.

3.1.3 Fensteraustausch und Luftdichtheit

Neben den zentralen Sanierungsmaßnahmen lassen sich weitere Prozeduren kurz erläutern, die ebenfalls im Kontext thermischer Sanierung bedeutsam sind.

Beginnend mit dem Fensteraustausch. Aus denkmalfachlichen Gründen gilt es die historischen Fenster zu erhalten. Eine Änderung an der Bausubstanz geht mit einem veränderten Erscheinungsbild des gesamten Gebäudes einher. Wenn nötig, sollte der vorhandene historische Fenster denkmalgerecht repariert werden. Ist eine Reparatur nicht mehr möglich, muss in der Regel ein Nachbau angefertigt werden (Standards der Baudenkmalpflege 2015:234). Hier erfordern insbesondere Glasart und Dichtigkeit des Fensters ausführliche Berücksichtigung. Laut Maier (2011) haben Holzfenster mit Einscheibenverglasung einen U-Wert von $6,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die während der Gründerzeit verbauten Kastenfenster haben immerhin einen U-Wert von $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ und erfüllen dementsprechend den heutigen Anforderungen dennoch nicht (Maier 2011:332). Eine hochwertige Wärmedämmung der Fenster ist jedoch nicht ausschließlich vom Wärmedurchlasswiderstand und U-Wert abhängig, sondern gleichzeitig von der Winddichtheit der Fugen. Bevor demnach Verbesserungsmaßnahmen an der Wärmedämmung der Fenster vorgenommen werden, braucht es eine Qualitätskontrolle der Fugen der historischen Fenster (Maier 2011:333). Neue Fenster unterscheiden sich von historischen Fenstern durch ihre erhöhte Dichtigkeit. Werden alte Fenster durch neue ausgetauscht, findet nach der Sanierung der übliche Luftwechsel nicht mehr

statt und es kommt zu einer höheren Luftfeuchtigkeit. Gleichzeitig kann sich jedoch auch Bauteilfeuchte ansammeln, was wiederum zu Schimmelproblemen führen kann (Giebeler u. a. 2008:124).

Wurden die bestehenden Fenster bereits hinsichtlich Dichtigkeit der Anschlüsse instand gesetzt, so kann die Verbesserung der Wärmedämmung als zweite Maßnahme durchgeführt werden. Es muss jedoch bedacht werden, dass der nachträgliche Austausch der Verglasung durch Isolierglasscheiben aufgrund der filigranen Flügelhölzer und Stöcke nicht möglich ist. Weil die originale filigrane Konstruktion der Kastenfenster die neuen schwereren Isoliergläser nicht tragen können, werden neue breitere Flügelhölzer benötigt. Das neue Fensterholz reduziert jedoch die Glas- und somit die Lichtfläche (bis zu 30%). Diese Maßnahme kann also nur empfohlen werden, wenn das vorhandene Fenster ausreichend groß ist (Maier 2011:335). Zudem gilt zu berücksichtigen, dass seit den 1970er-Jahren ausschließlich *Floatglas* verwendet wird. Um den U-Wert der Isoliergläser von 3,0 auf 1,3 W/m²K zu verbessern, wird seit 1995 die Gläser zusätzlich mit Metalloxiden beschichtet. Hierdurch unterscheidet sich das Isolierglas auch farblich vom Gussglas, das in historischen Fenstern verwendet wurde. Das Erscheinungsbild dieser *Floatglas*-Fenster unterscheidet sich stark vom Gussglas der Gründerzeitbauten. Der Fensteraustausch geht dementsprechend mit einer erheblichen Veränderung des Erscheinungsbildes der Fassaden einher (Giebeler u. a. 2008:124). Dies ist – bspw. laut Giebeler u.a. (2008) – besonders bei Teilsanierungen problematisch.

Das Anbringen einer zusätzlichen Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung auf der Innenseite der historischen Fenster, bzw. die Ergänzung der bestehenden Fenster mit einem neuen, innenliegenden Fenster wird von Maier (2011) als optimalster Lösungsansatz zur Wärmedämmung von historischen Fenstern verstanden. Der Abstand des neuen Fensters zum historischen Fenster sollte in beiden Fällen möglichst groß sein (Maier 2011:336). Aus denkmalfachlicher Perspektive erscheinen Isolierverglasungen als zweite Fensterebene jedoch nur in einigen Ausnahmefällen empfehlenswert. Die neue Fensterebene muss sich an die Erscheinung des Baubestandes annähern und zum anderen nachweislich zu einer maßgeblichen Verbesserung der Gesamtenergiebilanz beitragen (Standards der Baudenkmalpflege 2015:235). Giebeler u.a. (2008) verweisen auf die

Notwendigkeit, den Luftraum innerhalb des Kastenfensters ausreichend zu belüften, damit feuchte-technische Probleme vermieden werden (Abb. 07) (Giebeler u. a. 2008:47).

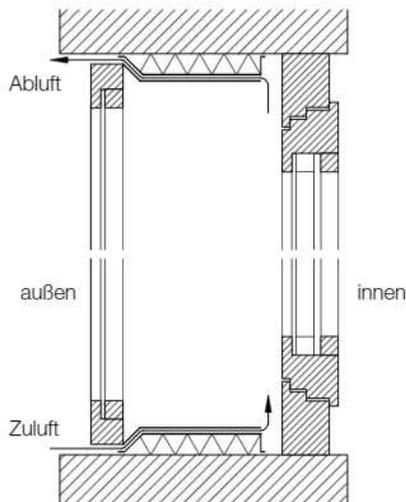


Abb. 07: Kastenfenster mit neuem innenliegendem Mehrscheiben-Isolierglasfenster
Quelle: Giebeler u. a. 2008:47

Im Zusammenhang des Leitprojekts „Gründerzeit mit Zukunft“ wurde die Kaiserstraße 7 in Wien energetisch saniert und dokumentiert. Um das Erscheinungsbild der Fassade zu erhalten, wurde die originale äußere Fensterschicht übernommen und – wie im vorigen Abschnitt beschrieben – der innere Flügel durch ein Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ersetzt (Abb. 08) (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2018:24).

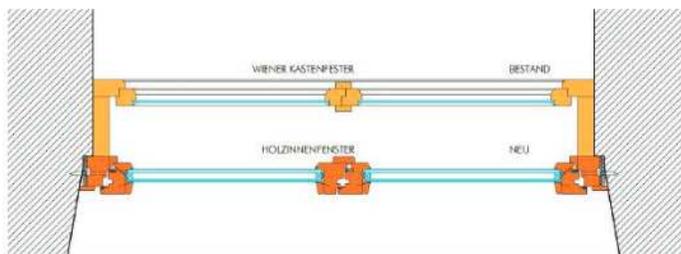


Abb. 08: Wiener Kastenfenster mit neuem innenseitigem Doppelisolierglas, Kaiserstraße 7
Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2018:25

Neben der Luftdichtheit der Fenster benötigt auch die Luftdichtheit des Mauerwerks gründliche Beachtung. Laut Giebeler u. a. (2008) dient grundsätzlich der Innenputz als Luftdichtheitsebene. Da diese Ebene in Altbauten allerdings an mehreren Stellen durch Holzbalkendecken

unterbrochen wird, sind mehrere Schwachstellen aufzufinden. Auch undichte Steckdosen und Installationen können solche Schwachpunkte darstellen. Ein vollflächiges Verkleben der Außen-
dämmung kann eine weitere Luftdichtheitsebene herstellen, falls diese an der Innenseite der Außenwand nicht garantiert werden kann (Giebeler u. a. 2008:37). Im Kontext von Sanierungsarbeit bei Gründerbauzeiten ist diese Möglichkeit, aus oben dargestellten Gründen, nicht gegeben.

Auf die Sanierung von Gründerzeitgebäuden bezogen, stellt sowohl der Fensteraustausch als auch die Luftdichtheit dementsprechend eine Herausforderung dar. So können Kastenfenster nicht ohne Weiteres gegen moderne Fenster ausgetauscht werden, weil das mit einer zu hohen Veränderung des Erscheinungsbildes einhergehen würde. Auch eine luftdichte Gebäudehülle ist bei historischen Fenstern nur schwer erreichbar.

3.1.4 Wärmebrücken

Das Thema der der Wärmebrücken fand bereits im Kapitel der Innendämmung (3.1.2) kurze Erläuterung, da diese Dämmmethode das Zustandekommen von Wärmebrücken besonders fördert. Dennoch scheint es notwendig, Wärmebrücken im Zuge des vorliegenden Kapitels genauer zu thematisieren, da sie eines der entscheidenden Kriterien für die Auswahl von Dämmsystemen darstellen.

Wärmebrücken entstehen durch einen punktuellen Wärmedurchlasswiderstand an der dämmenden Gebäudehülle. Thermische Isolierungen zeigen einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, lassen also wenig warme Raumluft zur kalten Außenseite des Mauerwerks durchfließen. Wird dieser, durch thermische Isolierung erzeugter, hoher Wärmedurchlasswiderstand durch ein Bauteil unterbrochen, schlägt sich die Raumfeuchte auf der kalten Oberfläche nieder (Blaschek 2015:64). Häufig vermeiden Außendämmungen das Zustandekommen von Wärmebrücken. Werden bei einer Außendämmung alle Schwachstellen auf der Innenseite der Außenwand überdeckt, müssen bei der Innendämmung alle Anschlüsse der Innenwände an die Decke, sowie sonstige Schwachstellen berücksichtigt werden. Diese Schwachstellen, welche die Dämmebene durchdringen, können nämlich eine Wärmebrücke verursachen (Giebeler u. a. 2008:38). Grundsätzlich ist

eine nachträgliche Dämmung umso problematischer, desto komplizierter die Gebäudegeometrie (Giebeler u. a. 2008:124). Im Kontext von Gründerzeitbauzeiten in Wien ist die Gebäudegeometrie weniger problematisch, da diese meist über keine Balkonplatten oder Loggien verfügen. Kritisch sind vor allem die Anschlüsse von Kellerdecke oder Bodenplatte zur Außen- und Innenwand. Giebeler u. a. (2008) empfehlen für den Umgang mit angeführten kritischen Punkten die Kombination einer Dämmung unterhalb der Kellerdecke mit einer Perimeterdämmung. Zudem gestalten sich bei einer Innendämmung all jene Anschlüsse problematisch, die die Dämmebene durchdringen. Hierbei handelt es sich vor allem um Anschlüsse Innenwand an Außenwand und Decke an Außenwand. Dämmkeile können verwendet werden, um die Oberflächentemperatur an kritischen Bauteilen zu erhöhen und eine Wärmebrücke zu vermeiden (Giebeler u. a. 2008:38). Der Anschluss von Holzbalkendecke und Außenwand ist weniger problematisch, da dieser infolge einer Innendämmung nahezu keine Wärmebrücke erzeugt. Es besteht die Möglichkeit die Holzbalkendecke zu öffnen und die Wärmedämmung zwischen den tragenden Balken anzubringen. Die Holzbalken stellen punktuelle Wärmebrücken dar, dennoch kommt es aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Holz nicht zu kritischen Temperaturen (Weller u. a. 2012:218). Problematischer hingegen ist der Holzbalkenkopf, der die Dämmebene durchdringt und sich im Wandbereich befindet. Der Holzbalkenkopf befindet sich hinter der Dämmebene, wodurch er verstärkt von Feuchtigkeit belastet wird. Nicht nur ist im Bereich der Konstruktion die relative Feuchte erhöht, sondern zudem ist das Mauerwerk aufgrund der geringeren Wandstärke im Bereich des Holzbalkens vermehrt von Schlagregen belastet. Weller u. a. (2012) empfehlen den Flüssigwassertransport von Mauerwerk in den Holzbalkenkopf durch Sanierungsmaßnahmen zu verhindern (Weller u. a. 2012:218).

Da Wärmebrücken bei thermischen Sanierungen oftmals unvermeidbar sind, empfiehlt sich eine Orientierung an den gesetzlichen energetischen Mindestanforderungen. Je größer die Differenz zwischen gedämmten und ungekämmten Bauteilen, umso größer das Risiko von Bauschäden aufgrund von Wärmebrücken. Entstandene Schäden können thermische Spannungsrisse, Bauteilfeuchte und Schimmel sein (Giebeler u. a. 2008:124). Folglich muss beim Einsatz einer Innendämmung zum einen darauf geachtet werden, dass die Innendämmung konstruktiv nicht durchstoßen wird und dadurch eine Wärmebrücke entsteht. Zum anderen muss bei der Materialwahl und beim

Schichtenaufbau der Konstruktion darauf geachtet werden, dass sich kein Tauwasser an der Innenseite der Außenwand ansammelt. Letztes scheint insbesondere im Kontext der vorliegenden Fragestellung relevant, weil – und das findet in Kapitel (4.2.2) Berücksichtigung – Lehm eine Ansammlung an Tauwasser entgegenwirken kann. An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass bei der Planung einer thermischen Sanierung Wärmebrücken besonders mitzudenken sind. Eine explizite Berücksichtigung potentieller Wärmebrücken ist notwendig, damit größere Bauschäden vermieden werden.

3.1.5 Nachhaltigkeit der Sanierungsmaßnahmen

Nicht zu trennen von den beschriebenen Sanierungsmaßnahmen ist der ökologische Anspruch, die Umwelt durch sanierte Gebäude weniger zu belasten. Oftmals wird nachhaltiges Bauen mit ökologischem oder energieeffizientem Bauen gleichgestellt. Für eine Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden benötigt es Hegger u.a. zufolge allerdings eine holistische Betrachtung des Bauvorhabens in der sowohl ökonomische, ökologische als auch gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden (Hegger u. a. 2007:190). Architektur nimmt ihm zufolge immer eine kulturelle und soziologische Doppelrolle ein: zum einen spiegeln sich in ihrer Ästhetik kulturelle Trends, sowie zentrale Wertvorstellungen, zum anderen konstituieren sie soziologische Räume, grenzen aus und inkludieren (Hegger u. a. 2007:190). Auch wenn die damit einhergehenden Einflüsse auf die Lebensqualität nicht numerisch dargestellt werden können und sich nicht berechnen lassen, muss ihnen ausreichend Berücksichtigung geschenkt werden, wenn es um Bau- und Umbau von Gebäuden geht. Gleiches gilt für die gründerzeitlichen Gebäude Wiens. Gründerzeitbauten sind tief in der Identität der Stadt verwurzelt und spiegeln zentrale gesellschaftliche Wertvorstellungen und Entwicklungen des 19. Jahrhunderts wider.

Neben den gesellschaftlichen Aspekten beeinflussen auch Investitionskosten Planungsentscheidungen. Die Entwicklung des Gebäudes muss im Gesamtkontext evaluiert werden, weil die Betriebs- und Unterhaltskosten von Gebäuden oftmals schon nach wenigen Jahren die Investitionskosten übersteigen. Die Kosten sollten daher nicht als einmalige Investition, sondern über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden (Hegger u. a. 2007:190). Diesbezüglich ist es wichtig,

die gestalterische Qualität von Gründerzeitgebäuden nicht durch kurzfristige Kosteneinsparungen zu reduzieren. Langfristig betrachtet steigert sich durch die richtigen Planungsentscheidungen der Wert der Immobilie (Hegger u. a. 2007:191).

Bei der Konstruktion von Gebäuden als auch beim Austausch von Bauteilen (bspw. im Kontext einer Sanierung) sind in erster Linie die Rohstoffe und ihr Lebenszyklus ausschlaggebend für die ökologische Nachhaltigkeit des Gebäudes. In der aktiven Nutzung des Gebäudes ist der Energiebedarf die zentrale Schraubstelle hinter der ökologischen Nachhaltigkeit (Hegger u. a. 2007:191). In Mitteleuropa geht laut Hegger u. a. aufgrund des großen Sanierungspotential das nachhaltige Bauen eng mit der ökologischen und energetischen Sanierung des Baubestandes einher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erhaltung und weitere Nutzung des Gebäudebestandes im Gegensatz zur Errichtung von Neubauten weniger natürliche Ressourcen benötigt (Hegger u. a. 2007:191). Demnach ist die energetische Sanierung eines Gründerzeitgebäudes ebenfalls in Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit ein wichtiger Bestandteil einer gesamtheitlichen Betrachtung des Nachhaltigen Bauens.

Laut Hegger u. a. ist die Optimierung von Einzelementen, wie bspw. die Dämmung der Außenfassade nicht unwichtig, trägt jedoch wenig zum Gesamtkonzept des nachhaltigen Bauens bei (Hegger u. a. 2007:18). Um Emissionen reduzieren zu können, benötigt es eine holistische Berücksichtigung des Sanierungsprojektes, worunter vor allem auch Fragen bzgl. Baumaterialien an Bedeutung gewinnen. Baumaßnahmen stellen immer einen Eingriff in die natürlichen Ressourcen und Kreisläufe dar und benötigen dementsprechende Berücksichtigung. Im Gebäudesektor ist laut Schroeder (2019) dann von Nachhaltigkeit die Rede, wenn in allen Lebensphasen eines Gebäudes der Verbrauch von Ressourcen und die Belastung der Umwelt unter Berücksichtigung der Forderungen der Nutzer*innen minimiert wird. Dementsprechend lässt sich insofern eine Bedeutungswandlung des Nachhaltigkeitsbegriffes identifizieren, als dass er nicht mehr wie sonst überwiegend auf die Konstruktion und dessen stofflichen Eigenschaften bezogen ist, sondern vielmehr die Notion des Umweltschutzes in den Mittelpunkt rückt (Schroeder 2019:22f.). Um nach dem Prinzip des „Nachhaltiges Bauens“ (Schroeder 2019:23) zu planen, müssen neben Nutzer*inneninteressen zudem wichtige ökologische und ökonomische Parameter berücksichtigt werden. Die

allgemeinen Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sind durch die jeweiligen Bauordnungen geregelt, die technische und funktionale Qualitäten der Bauprodukte definieren. Nur wenn die Anforderungen an die Bauprodukte erfüllt werden, dürfen sie verbaut werden. Laut der Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates *Zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten* müssen Bauwerke so geplant und errichtet werden, dass sie am Ende ihrer Lebensphase wieder demontiert werden können. Zudem müssen laut der Verordnung umweltfreundliche Rohstoffe und Sekundärstoffe verwendet werden. Leitend ist dabei die Idee des Recyclings der Baustoffe (Schroeder 2019:23).

Eine nachhaltige Bauweise steht dementsprechend in direktem Zusammenhang mit der Verwendung ökologischer Baustoffe, wobei diverse Kriterien hierfür maßgebend sind. Erstens gilt generell der Anspruch, wenig umwelt- und gesundheitsbelastende Materialien zu wählen. Zweitens sollen diese langfristig verfügbar sein und drittens umweltschonend gewonnen werden. Ausschlaggebend für den dritten Aspekt ist ein niedriger Energieaufwand bei der Gewinnung der Rohstoffe und Herstellung der Bauteile (Schroeder 2019:24). Dieser Energieaufwand wird als Primärenergieinhalt (PEI) bezeichnet und wird meistens in Kilowattstunden (kWh) oder Megajoule (MJ) pro Tonne oder Kubikmeter angegeben (Minke 2017:38). Der PEI bezieht sich auf die graue Energie eines Baustoffs. Die graue Energie umfasst die im Material gebundene Energie die untrennbar mit der Herstellung, dem Transport, der Lagerung und der Entsorgung eines Produktes einhergeht. Bei der Angabe der Energiemenge wird zwischen erneuerbarem und nicht erneuerbarem Energieverbrauch unterschieden (Hegger u. a. 2007:160). Mit der kontinuierlichen energetischen Verbesserung der Bauteile steigt der im Material vorhandene Anteil an grauer Energie nur gering an. Die kontinuierliche Effizienzsteigerung von Gebäudehüllen geht mit einer signifikanten Steigerung des Anteils von grauer Energie am Gesamtenergieverbrauch über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes einher. Hierin artikuliert sich die Notwendigkeit neben einer energieeffizienten Gebäudekonzipierung zudem die graue Energie bei der Materialwahl gering zu halten (Hegger u. a. 2007:160). Neben dem PEI kommt auch dem Energieaufwand, der darauffolgenden Lebenszyklusstufen eine hohe Bedeutung zu. Auch der Transportenergieaufwand zwischen den Lebenszyklusstufen, wie bspw. der Transport von -materialien und Baustoffen, sollte so gering wie möglich gehalten werden. Im Kontext der Herstellung und Verarbeitung der Baustoffe gilt es die

Schadstoffemissionen zu vermeiden (Schroeder 2019:24). Der Anspruch, die Schadstoffemissionen zu reduzieren, trifft neben Herstellung gleichermaßen auf die Nutzungsdauer des Gebäudes sowie auf die Demontage der Bauteile und deren Entsorgung zu. Die Baustoffe sollten dementsprechend am Ende der Lebensdauer des Gebäudes mit minimalem Energieaufwand wiederverwendet, recycelt oder zumindest entsorgt werden, ohne dabei die Umwelt zu belasten (Schroeder 2019:24). Langlebigkeit ist somit ein zentraler Nachhaltigkeitsfaktor von Baustoffen und wirkt sich dementsprechend maßgeblich auf die ökologische Gesamtbilanz des Gebäudes aus (Schroeder 2019:25).

Neben den technischen Anforderungen sind bei einer nachhaltigen Planung auch ökonomische und soziokulturelle Faktoren, wie bspw. Behaglichkeit, Sicherheit und Funktionalität zu berücksichtigen (Schroeder 2019:25). Indem solche Faktoren sich auf die Zufriedenheit und auf das Wohlbefinden der Nutzer*innen auswirken, spielen sie dem Nachhaltigkeitsaspekt in die Karten (Schroeder 2019:26).

Damit die Baukonstruktionen den allgemeinen Anforderungen nachhaltigen Bauens entsprechen und um dem Recycling-Anspruch gerecht zu werden, sollten die Bauteilverbindungen trennbar sein. Die Gebäude sollten reparaturfähig sein und hinsichtlich ihrer Nutzung flexibel geplant werden. Oftmals führt der Versuch den Wärmeschutz an Anforderungen anzupassen zu derart komplizierten und mehrschichtigen Außenwandkonstruktionen und zu einem untrennbaren Materialverbund, dass die oben genannten Grundsätze für nachhaltiges Bauen nicht erfüllt werden können. Dementsprechend gestalten sich Ziele hinter der Wärmedämmung zu den ökologischen Ansprüchen zum Teil widersprüchlich (Schroeder 2019:25). Über die gebäudebezogenen Kriterien hinaus müssen ebenfalls übergeordnete städtebauliche Maßnahmen beurteilt werden. Diesbezüglich gibt es jedoch derzeit keine präzise Methoden zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Bauvorhaben, die eine übergeordnete städtebauliche Perspektive einnehmen (Hegger u. a. 2007:18). Im Kontext der vorliegenden Arbeit erscheinen derartige Parameter allerdings weniger relevant.

Über die Anforderungen an die Konstruktion hinaus müssen demnach sowohl benutzerorientierte als auch soziokulturelle Entscheidungen in eine nachhaltige Planung eingebunden werden. Die

gleichen Parameter sind ebenso relevant für den Bau mit Lehmbaustoffen. Neben den Prinzipien des nachhaltigen Bauens können ebenfalls Bewertungsmethoden verwendet werden, um die verwendeten Baumaterialien einzuordnen.

3.1.6 Ökologische Bewertung von Baumaterialien

Seit 2009 ist der Energieeffizienz-Nachweis ebenso für bestehende Immobilien erforderlich. Der Energieausweis soll die Beurteilung der Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes sowie die Zuordnung zu einer Energieeffizienzklasse ermöglichen (wohnfonds_wien 2016:24). Die Energieeffizienzklasse eines Gebäudes ist allerdings nicht auf die Nachhaltigkeit der Baumaterialien bezogen, sondern umfasst lediglich den Energieverbrauch im Betriebszustand. Inwiefern durch bauliche Maßnahmen sowie durch verwendete Materialien Eingriffe in natürliche Ressourcen zu Stande kamen, verschleiert dieser Nachweis. An dieser Stelle scheint eine Lebenszyklusanalyse angebracht. Diese analysiert nämlich alle Prozesse: von der Gewinnung der Rohstoffe, bis hin zum Abriss und Recycling der Materialien (Schroeder 2019:26). Das Resultat der Lebenszyklusanalyse, die Produktuntersuchungen unter der Perspektive des gesamten Lebenszyklus anliegt nennt sich *Ökobilanz*. Alle Umwelteinwirkungen die in den jeweiligen Lebensabschnitten des Produktes verursacht werden, lassen sich hier gegenüberstellen (Schroeder 2019:34).

Eine Möglichkeit der Ökobilanzierung von Baumaterialien ist der *Oekoindex OI3* (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie 2018). Zur Berechnung werden zum einen *baubook* Richtwerte verwendet, also Werte, die sich aus den Ökobilanzindikatoren der IBO-Richtwerte und den gegebenen materialspezifischen bauphysikalischen Daten zusammensetzen. Zum anderen kommen, ebenfalls durch unabhängige Dritte verifizierte, produktspezifische Werte zur Verwendung (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie 2018:8). Der Oekoindex OI3 bewertet nach Umweltkategorien, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aus der Lebenszyklusanalyse basieren. Die Umweltkategorien umfassen den „Beitrag zur Globalen Erwärmung“ (GWP), das „Versauerungspotential von Boden und Wasser“ (AP) und den „Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, total“ (PENRT) (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie 2018:8). Eine langjährige Betrachtung des Gebäudes, also eine Begutachtung die nicht punktuell

auf Emissionen schaut sondern gleichermaßen Aspekte wie Ressourceneffizienz, zukünftige Auswirkungen des Gebäudes auf Luftqualität, Böden und Gewässer in den Blick nimmt (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie 2018:8), scheint für eine nachhaltige, umweltfreundliche Sanierung unumgänglich.

Der Primärenergieinhalt (PEI) eines Produktes oder einer Dienstleistung ist laut IBO der zur Herstellung benötigte Bedarf an energetischen Ressourcen (vergl. Kapitel 3.1.5). Hierbei handelt es sich um die Rohenergie der Herstellung, die weder die Energie einer technischen Umsetzung oder Umwandlung, noch den Transport berücksichtigt. Für den Oekoindex OI3 wird der zur Herstellung notwendige Primärenergieinhalt nicht erneuerbarer Ressourcen (PENRT) herangezogen. Eine weitere Umweltkategorie ist das GWP, welche den Beitrag von Treibhausgasen zur globalen Erwärmung beschreibt. Der Oekoindex OI3 verwendet den Indikator „GWP Summe“, der sowohl die den Beitrag an Treibhausgasemissionen, als auch die in Biomasse gespeicherte Kohlendioxidmenge berücksichtigt. Die Umweltkategorie AP bezieht sich vor allem auf die Wechselwirkung von Stickoxid- und Schwefeldioxidgasen mit anderen Bestandteilen der Luft. Diese Wechselwirkung verursacht eine Versauerung, welche die Seen und Gewässern belastet (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie 2018:9). Die Auflistung von Parametern, die die Nachhaltigkeit von Baustoffen bewerten, kann ebenfalls zur Evaluierung von Lehmbaustoffe eingesetzt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Kennwerte der verwendeten Lehmbaustoffe in den Datenbanken aufgelistet sind.

3.2 Sanierung der Kellerzone von Gründerzeitbauten

Nachdem im vorherigen Kapitel Sanierungsmaßnahmen im Allgemeinen in den Blick geraten sind sowie auch konkrete Maßnahmen zur Berücksichtigung ökologischer Ansprüche, gilt es im vorliegenden Kapitel spezifischer auf die Sanierung der Kellerzone einzugehen. Vor dem Hintergrund des vorliegenden Erkenntnisinteresses beziehen sich die Überlegungen insbesondere auf die Sanierung von Gründerzeitbauten.

Ein zentrales Problem bei Kellerzonen von Gründerzeitbauten liegt in der aufsteigenden Feuchtigkeit. Zur Analyse der Feuchtigkeit und zur Bestimmung deren Quelle kann eine unabhängige, autorisierte Prüfstelle herangezogen werden. In allen Fällen allerdings scheint eine ausreichende Durchlüftung unumgänglich – der Keller muss die Feuchtigkeit an die Umgebungsluft abgeben können. Aus diesem Grund darf das feuchtigkeitsausgleichende Verhalten der Kellerwand nicht durch einen Verputz unterbunden werden (wohnfonds_wien 2016:36). Auch das feuchtigkeitsausgleichende Verhalten der Kellerboden von Gründerzeitbauten darf nicht durch Eingriffe verändert werden. Die Kellerböden bestehen in den meisten Fällen aus einem gestampftem Lehm- boden der direkt auf den Erdboden aufgetragen ist (wohnfonds_wien 2016:23). Eine Saniermaß- nahme zur Entgegenwirkung aufsteigender Feuchtigkeit im Kellerboden ist das Einbringen einer WU-Betonschicht von mindestens 25 cm Stärke auf den Kellerfußboden (Giebeler u. a. 2008:134). Diese Sanierungsmaßnahme ist jedoch nicht empfehlenswert, da durch den Austausch des Lehm- bodens durch einen Betonestrich der Keller zusätzlich mit Feuchtigkeit belastet wird. Durch die abdichtende Wirkung des Betonestrichs kann die unter der Bodenplatte stauende Feuchtigkeit nicht mehr aufgenommen werden und kann ins Mauerwerk eindringen. Bei einer Erneuerung der Bodenplatte sollte dementsprechend auf feuchtigkeitsregulierende Materialien gesetzt werden (wohnfonds_wien 2016:36f.).

Die Fundamente von gründerzeitlichen Gebäuden bestehen in den meisten Fällen aus Bruchstein, nur selten aus Beton (wohnfonds_wien 2016:35). Ihre Kellerwände bestehen grundsätzlich aus unbehandeltem Mauerwerk und weisen erhebliche Wandstärken (in Berlin bis zu 99 cm) auf. Die baupolizeilich geforderte Mindeststärken hatten jedoch zu Folge – so ist bei Giebeler et al. zumin- dest im Kontext von Berlin nachzulesen – dass nur die Außenschalen gemauert wurden und Zwi- schenräume aus ökonomischen Gründen mit Abbruch- oder Aushubmaterial verfüllt wurden. Zu- dem wurden für die gründerzeitlichen Kellerwände nur wenig Bindemittel verwendet (Giebeler u. a. 2008:134). Durch die Verwendung von Abbruch- oder Aushubmaterial in Kombination mit wenig Bindemittel lassen sich die bestehenden Kellerwände nur schwer durch Sanierungsmaß- nahmen (bspw. Injektion) abdichten (Giebeler u. a. 2008:135). Nachträgliche Abdichtungen sind allerdings notwendig, wenn durch die aufsteigende Feuchtigkeit gelöste Salze an der Mauerober- fläche des Erdgeschosses sichtbar werden und diese Zone als Wohnraum genutzt werden soll

(wohnfonds_wien 2016:37). Aufgrund des uneinheitlichen Mauerwerks und der vorhandenen Hohlräume im Mauerwerk sind Injektionen nicht verwendbar. Stemmarbeiten stellen eine schwierig durchzuführende Abdichtungsmaßnahme dar, da Teile aus dem Wandgefüge unkontrolliert abbrechen könnten (Giebeler u. a. 2008:135). Beim erneuten Auftragen von Mörtel auf die Kellerwand ist ebenfalls Vorsicht geboten, da nur Kalkmörtel mit einer ähnlichen Güte verwendet werden kann. Wird ein Mörtel mit mehr Zement bzw. reiner Zementmörtel verwendet, entsteht aufgrund seiner Wasserundurchlässigkeit kein dauerhafter Verbund zum Mauerwerk. Gründerzeitkeller sollten nicht trockengelegt werden, auch wenn dies aus technischer Sicht möglich wäre. Durch die Austrocknung des Mauerwerks verlieren die Fugen an Volumen und das Aussanden des Kalkmörtels wird verstärkt. Durch das Aussanden verliert das Mauerwerk an Stabilität und es kommt zu Setzungen. Deshalb ist auf jegliche Trockenlegungsmaßnahmen des Mauerwerks zu verzichten (Giebeler u. a. 2008:135).

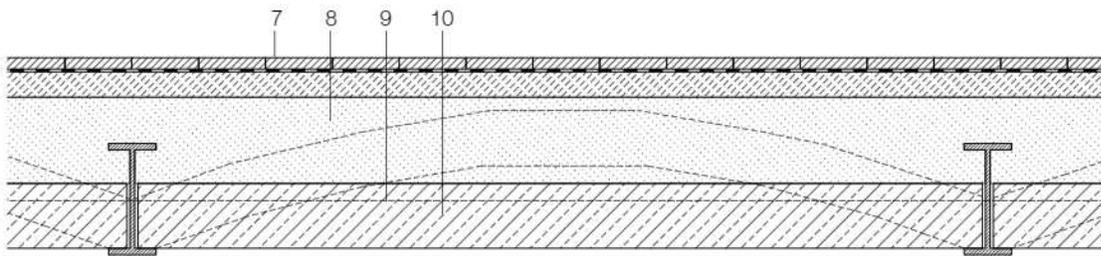


Abb. 09: Austausch einer Kappendecke gegen eine Stahlbetondecke

7: Bodenbelag / PE-Folie / schwimmender Estrich, 8: Schüttdämmung, 9: neuer Zuganker in Trägerachse, 10: Stahlbetondecke

Quelle: Giebeler u. a. 2008:136

Der Keller von Gründerzeitbauten dient als Pufferzone zwischen dem Erdreich und dem Erdgeschoss. Da die Kellerdecke hierbei die Trennung des beheizten Raumes zur Pufferzone darstellt, ist zu prüfen ob die Decke wärme gedämmt werden kann (wohnfonds_wien 2016:23). Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, bestehen die Kellerdecken von Gründerzeitbauten fast ausschließlich aus Gewölbe oder Teilgewölbe (Giebeler u. a. 2008:135). Wie auch bei der Außenwand kann es auch beim Gewölbe zum Aussanden der Lagerfuge kommen. Durch das Aussanden kann sich der Gewölbescheitel zu setzen anfangen. Im Gegensatz zum Mauerwerk sind bei diesem Schadensbild die Sanierungen wesentlich teurer (Giebeler u. a. 2008:136f.). Liegen bereits erkenntliche Setzungen vor, benötigt es höchstwahrscheinlich ein Austausch des Kappengewölbes, bspw. durch eine

nicht gewölbte Stahlbetondecke (Abb. 09). Wird nur ein Segment des Kellergewölbes ersetzt, müssen die Stahlträger oder gemauerte Gurtbögen der verbleibenden benachbarten Kappengewölbes zusätzlich gestützt werden. Die Träger der verbleibenden benachbarten Gewölbe müssen vor dem Einbau der Stahlbetondecke horizontal abgefangen werden da sie die, durch Betonplatten entstehende seitliche Biegung nicht aufnehmen können (Giebeler u. a. 2008:137). Eine weitere Problemstellung die sich bei gründerzeitlichen Gewölben stellt, ist die Verrostung vorhandener Stahlträger. Beim Austausch eines Deckenträgers müssen die angrenzenden Kappen abgebrochen werden, wobei die benachbarten Teile des Kappengewölbes abgesichert werden müssen. Die bestehenden Träger können aufgrund der unterschiedlichen Stahlzusammensetzung nicht nachträglich durch eine Schweißverbindung verstärkt werden, können aber, insofern die Raumhöhe es erlaubt, abgestützt werden. Sind mehrere Stahlträger zu ersetzen, wird die gesamte Decke durch eine neue flache Stahlbetondecke ersetzt. Im Falle eines Austausches der gesamten Kellerdecke, bedarf es zur Ableitung entstehender Lasten zusätzliche Sicherungsmaßnahmen. Zur Gewichtsreduktion der Konstruktion wird die vorhandene Schüttung, die grundsätzlich aus Sand oder Schlacke besteht, durch eine Schüttdämmung ersetzt (Giebeler u. a. 2008:137). Bei unbewohnten Kellergeschossen außerhalb der definierten thermischen Hülle ist eine Wärmedämmung der Decke möglich. Das Gewölbe kann von der Unterseite durch eine zusätzliche Tragkonstruktion oder mithilfe von biegsamen Dämmplatten gedämmt werden (Abb. 10). Steht das Gründerzeitgebäude unter Denkmalschutz, wird die Kappendecke nicht wärmedämmt da dies die Unterseite des Kellergewölbes verstecken würde (Maier 2011:284). Alternativ oder ergänzend zu der unterseitigen Dämmung der Kellerdecke kann die Dämmung ebenfalls über der Kellerdecke angebracht werden. Bei der Dämmung auf dem Erdgeschossboden muss jedoch bedacht werden, dass sich der gesamte Fußbodenaufbau des Erdgeschosses erhöht und folglich Türen gekürzt und Heizkörper angehoben werden müssen (Maier 2011:288).

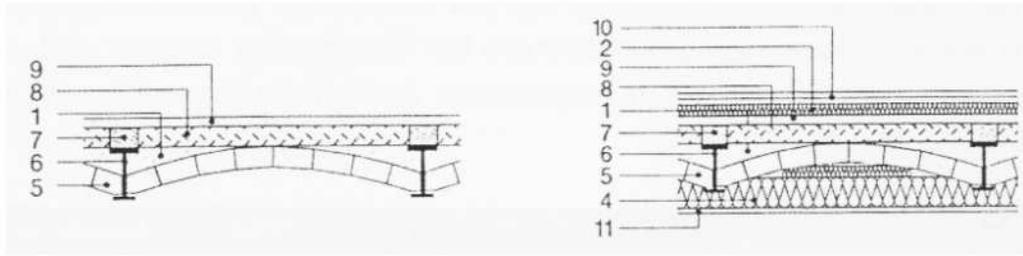


Abb. 10: links: Ungedämmtes Kappengewölbe, rechts: Untenseitig gedämmtes Kappengewölbe
1: Betondecke, 2: Trittschalldämmung, 3: Estrich, 4: Wärmedämmung, 5: Ziegelstein, 6: Stahlträger, 7: Lagerholz, 8: Sand/Schlacke, 9: Dielen, 10: Trockenestrich, 11: Gipskartonplatte
Quelle: Maier 2011: 285

An dieser Stelle muss wiederum erwähnt werden, dass aus denkmalpflegerischen Gründen die historische Substanz bezüglich ihrer Materialität und Erscheinung zu erhalten gilt. Umbauten sind demnach aus denkmalfachlicher Sicht dann illegitim, wenn die Kellerzone aus bauhistorischer oder architektonischer Sicht bedeutsam erscheint (Standards der Baudenkmalpflege 2015:267). Auch wärmedämmende Maßnahmen sollten an der Kellerdecke nur unternommen werden, wenn dies die historische Erscheinung und den Bestand aus bauphysikalischer Sicht nicht negativ beeinflusst (Standards der Baudenkmalpflege 2015:268). Bei einer Sanierung der Kellerzone von Gründerzeitbauten geht es demnach nicht um die Maximierung nutzbarer Raumfläche, sondern um den Erhalt des bestehenden Kellers. Hierfür können abdichtende Maßnahmen notwendig sein, bspw. wenn der Baubestand durch aufsteigende Feuchte beschädigt wurde. Im Zuge der vorliegenden Arbeit gilt es an späterer Stelle noch zu überprüfen, inwieweit Lehmbaustoffe eingesetzt werden können, um den durch die aufsteigende Feuchte gelösten Salze entgegenzuwirken und somit die Bausubstanz zu erhalten.

3.3 Sanierung der Erd- und Obergeschosse von Gründerzeitbauten

Das Erdgeschoss von Gründerzeitbauten fungiert – ähnlich wie in den meisten Wohngebäuden – als Verbindung zwischen dem Stiegenhaus, dem Hof, dem Kellerabgang und den ebenerdigen Wohnungen. Meist führen wenige Stufen von der Straße zum Erschließungsgang und zum Stiegenhaus. Ob eine Wohnungssanierung im Erdgeschoss sinnvoll ist, muss angesichts der Lage und Erschließung zum Außenraum, sowie aber auch hinsichtlich der Bausubstanz und der bestehenden Feuchtigkeit entschieden werden. Zudem bieten sich Wohnungssanierungen im

Erdgeschoss nur dann an, wenn kein Bedarf für hausallgemeine Räume im Erdgeschoss besteht (wohnfonds_wien 2016:32).

Aufgrund der massiven Bauweise der Außenwände liefern Gründerzeitbauten ausreichend Brand- und Schallschutz (Giebeler u. a. 2008:139). Wie bereits im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit thematisiert, gewährleisten die Wände der Gründerzeitbauten zwar adäquaten Wärmeschutz für Sommerzeiten, der winterlichen Kälteschutz ist allerdings mangelhaft. Dies führte u.a. zu der, in Kapitel 2.3 getroffenen Schlussfolgerung, dass das größte Verbesserungspotential einer thermischen Sanierung von Gründerbauzeiten zwar in der Außenwand liegt, es aus kulturellen, ästhetischen und Denkmalschutz-Gründen dennoch zu empfehlen ist, die Wärmedämmung nur als Innendämmung anzulegen.

Im Falle einer Dämmung der Außenfassade muss die Wahl der baulichen Eingriffe allenfalls unter Berücksichtigung des Fassadentypus getroffen werden. Im Kontext von Gründerzeitbauten muss dementsprechend berücksichtigt werden, ob es sich um eine Straßen- oder um eine Hoffassade handelt. Bei der Hoffassade kann meist ohne formale Beeinträchtigung eine Außendämmung angebracht werden. Hier ist lediglich die Positionierung der Fenster zu berücksichtigen (Giebeler u. a. 2008:139f.). Eine solche Sanierungsmaßnahme ist bei Straßenfassaden aufgrund des Gesimses nicht möglich. Um charakteristische Fassaden von Gründerzeitbauten zu erhalten, ist die Innendämmung die einzige einsetzbare Dämmmaßnahme. Da die tragenden Wände in Gründerzeitbauten grundsätzlich parallel zur Außenfassade verlaufen, durchstoßen sie keine, an der Innenseite angebrachte Dämmebene. Durch die kontinuierliche Dämmebene kommt es weniger oft zum vorhin thematisierten Problem der Wärmebrücken (Giebeler u. a. 2008:140).

Grundsätzlich haben Gründerzeitbauten aneinandergereihte Satteldächer aus rotem Dachziegel, diese bilden die thermische Grenze des Gebäudes. Die Dachgeschosse fungierten damals in den meisten Fällen als zusätzliche Abstellräume, bzw. als Trockenräume. Mit der Altbausanierungen verändert sich allerdings ihre Raumfunktion, oftmals werden Dachgeschosse ausgebaut und es verändert sich – und hierbei handelt es sich keineswegs um einen unbestrittenen architektonischen Eingriff – die Dachlandschaft Wiens (wohnfonds_wien 2016:24).

Nachdem im vorliegenden Teil der Arbeit auf allgemeine Sanierungsempfehlungen eingegangen wurde, gilt es im folgenden Kapitel den möglichen Einsatz von Lehmbaustoffen in Sanierungsarbeiten herauszuarbeiten. Daran anschließend lässt sich überprüfen, inwieweit Lehmbaustoffe zur thermischen Sanierung von Gründerzeitbauten eingesetzt werden können.

4. Einsatz von Lehmbaustoff zur thermischen Sanierung

Die zentrale Zielsetzung der Arbeit ist die Darstellung der Einsatzmöglichkeiten von Lehmbaustoffen zur energetischen Sanierung von Gründerzeithäusern. In diesem Kapitel gilt es darzustellen, wie derzeit Lehmbaustoffe eingesetzt werden, um Gebäude zu sanieren.

Nachdem im Kapitel 3.1.5 „Nachhaltigkeit der Sanierungsmaßnahmen“ auf die Nachhaltigkeit von üblichen Sanierungsmaterialien eingegangen wurde, gilt es im vorliegenden Kapitel eine alternative Sanierungsmethode mittels Lehmbaustoffe darzustellen. Dies ist in Bezug auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit insbesondere von Bedeutung, weil dies auf die Fragestellung der eingesetzten Lehmbaustoffe eingeht. In einem ersten Teil wird beschrieben, wie Lehmbaustoffe zur Innendämmung eingesetzt werden und welche Vorteile, Nachteile und mögliche Problemstellungen diese mit sich führen. Sowohl die positiven regulierenden Eigenschaften von Lehmbaustoffen auf das Raumklima (4.2.1) als auch die Problematik des anfallenden Tauwassers der Innendämmung (4.2.2) werden im folgenden Arbeitsabschnitt thematisiert. In einem weiteren Schritt (4.3) werden zentrale Charakteristika von Leichtlehm beschrieben. Schließlich werden konkrete Konstruktionen aufgelistet, die für thermische Dämmungen von Altbauten eingesetzt werden können (4.4).

4.1 Nachhaltigkeit von Lehmbaustoffen

Wie bereits in vorherigen Teilen der Arbeit diskutiert, sind Sanierungsarbeiten immer mehr mit ökologischen Ansprüchen behaftet. Dementsprechend gilt es im vorliegenden Kapitel das Baustoff Lehm unter einer Nachhaltigkeitsperspektive zu beleuchten.

Bei energetischen Sanierungen der Gebäudehülle werden meist synthetische Baustoffe eingesetzt, meist im Zusammenhang mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Dies sind erdölbasierende Baustoffe mit hohem Energieverbrauch im Herstellungs- und einem nicht weniger problematischem Entsorgungsprozess. Die Anforderung an energieeffiziente Außenwände führen

oftmals zu komplizierten und mehrschichtigen Außenwandkonstruktionen die bezüglich des untrennbaren Materialverbunds problematisch sind (Schroeder 2019:25). Diese erdölbasierenden Dämmstoffe werden oftmals an die Tragstruktur verklebt, wodurch ein unlösbarer Verbund entsteht. Am Ende des Lebenszyklus muss das Baumaterial als Abfallprodukt deponiert werden (Hauer 2020:159). Lehmbaustoffe können möglicherweise eine Alternative zu konventionellen Dämmmaterialien im Einsatz zur Sanierung von Altbauten darstellen, da bei der Produktion von Lehmbaustoffen kaum schädlichen Nebenprodukte, die die Umwelt belasten, entstehen. Werden dem Lehm keine Zuschlags- oder Zusatzstoffe hinzugefügt, so kann der Baustoff problemlos wiederverwendet oder im Gelände deponiert werden (Hauer 2020:159). Dämmsysteme aus Lehmbaustoffen wirken sich demnach hinsichtlich der Entsorgung und Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus positiv auf dessen Ökobilanz aus.

Baustoff	Dichte t/m ³	PEI		Quelle
		kWh/t	kWh/m ³	
adobes	1,7	3-6	5-10	6
Leichtlehm- ausfachung	0,8	14	11	1
Stampflehm	2,2	20	44	2
Lehmputz (in- dustriell hergest.)	1,7	139	236	1
Grünlinge künstl. getrocknet	1,2	290	349	2
Hochlochziegel, porosiert	0,75	722	541	1
Vollziegel	1,8	750	1350	1
Betonfertigteile			800	3
Armierungsstahl	7,8	3.611	28.166	1
Aluminium- platten		72.500	195.000	3
Kalksandstein	1,8	313	564	2
Steinwolle			169	4
Blähton	0,35	857	300	7
Kanholz (techn. getrocknet)		1.306	588	1
Dreischichtholz- platte	0,43	1.691	727	2
OSB-Platte	0,62	2.058	1.276	2
Sperrholz	0,49	2.681	1.314	2
Strohballen (HD- Kleinballen)	0,11	64	7	5

Quellen: 1: Waltjen 1999;
2: Hegger et al. 2005; 3: Baier 1982;
4: Eyerer, Reinhardt 2000; 5: Krick 2008;
6: Minke 1986; 7: Marmé, Seeberger 1982

Abb. 11: Primärenergieinhalt von Baustoffen bzw. Bauteilen

Quelle: Minke 2017: 38

Lehmbaustoffe erfüllen viele der in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Kriterien, die umweltfreundliche Baustoffe erfüllen müssen. Lehmbaustoffe gelten grundsätzlich aufgrund ihrer Replastifizierbarkeit als nachhaltig. Dadurch, dass Lehm nicht chemisch abbindet soweit kein Zement oder synthetische Zuschläge hinzugefügt werden, können Lehmbaustoffe wiederverwendet werden und am Ende vom Lebenszyklus problemlos von der Konstruktion entfernt und entsorgt werden (Hauer 2020:123). Lehm ist dadurch besonders bei der Entsorgung wesentlich unproblematischer als synthetische Baustoffe.

Lehm als primärer Baustoff einer Innendämmung eignet sich besonders aus einer ökologischen und baubiologischen Sichtweise. Besonders in Hinblick auf den PEI ist die Verwendung von Lehmbaustoffen zur Dämmung von Vorteil (Gänßmantel 2016d:133). Grundsätzlich weisen natürliche Baustoffe wie Lehm im Vergleich zu industrialisierten Baustoffen einen niedrigen PEI-Wert auf. Wie in Abb. 11 abzulesen, sind die PEI-Werte für Lehmputz und Grünlinge im Vergleich zu anderen Materialien relativ hoch. Die hohen Werte sind darauf zurückzuführen, dass bei der Wertmessung von einer industriellen Produktion mit künstlicher Trocknung ausgegangen wurde. Bei einer Lufttrocknung von Lehm hingegen würden die Werte um 90% niedriger ausfallen. Dementsprechend würde ein Austausch konventioneller Baumaterialien mit Lehmbaustoffen den PEI-Wert des gesamten Bauegefüges, und somit ebenfalls die CO² Emission deutlich reduzieren (Minke 2017:38). Wie bereits in Kapitel 3.1.5 und 3.1.6 festgehalten, müssen für eine Ökobilanz von Baustoffen und Baukonstruktionen diverse Parameter berücksichtigt werden. Dementsprechend rücken neben dem PEI-Wert zusätzliche Kriterien ins Augenmerk, die einen Gesamteindruck von der Umweltverträglichkeit eines Baustoffes erlauben – im Fall von Lehm bspw. Herkunft, Transportwege und Entsorgung.

Abschließend kann zur Verwendung von Lehmbaustoffen zur Sanierung von Bestandsgebäuden festgehalten werden, dass sich hierdurch einerseits eine verbesserte Energieeffizienz der Gebäude -und andererseits ein geringer Anteil an grauer Energie erhofft wird.

4.2 Innendämmung aus Lehmbaustoffen

Der folgende Abschnitt thematisiert die Eigenschaften von Lehmbaustoffen unter dem Gesichtspunkt der Innendämmung. Dabei geht es zum einen (4.2.1) um die Wärmedämm- und Wärmespeichereigenschaften von Lehmbaustoffen und (4.2.2) zum anderen um das Verhalten von Lehm bezüglich des problematischen Tauwasserausfalls infolge einer Innendämmung. Es gilt ebenfalls die Anforderungen zu erläutern (4.2.3), dessen Lehm als Wärmedämmstoff gerecht werden muss. Im Kontext der vorliegenden Arbeit muss diesen Inhalten einen besonders zentralen Stellenwert beigemessen werden. Die in Kapitel 3 thematisierten Forderungen für Gründerzeitbauten-Sanierungen werden im Zuge des vorliegenden Kapitels nämlich den Eigenschaften von Lehm gegenüberstellen, sodass sich folglich die Frage nach der Eignung von Lehm für Sanierungsarbeiten von Gründerzeitbauten problematisieren lässt.

4.2.1 Wärmedämm- und Wärmespeichereigenschaften

Eine suffiziente Wärmedämmung der Gebäudehülle ist notwendig damit die Räumlichkeiten energiesparend aufgeheizt werden können und die Wandoberflächen angenehm temperiert sind. Der Wärmedämmung entgegengestellt ist die Wärmespeicherung, diese schützt vor zu starker Erwärmung oder Abkühlung der Wandoberflächen. Wechselnde Wärmeeinwirkungen, die Temperaturschwankungen verursachen, werden durch die Wärmespeicherung reguliert (Volhard 2016:199). Verfügt ein Gebäude über geringe Speichermasse, entsteht schneller ein Innenraumklima mit hohen Temperatur- und Feuchteschwankungen. Diese Schwankungen wirken sich negativ auf die Behaglichkeit der Benutzer*innen aus. (Hegger u. a. 2007:158). Die Wärmespeicherung sorgt demnach für ein angenehmes Raumklima. Desto höher die *Wärmespeicherung* eines Bauteils, desto mehr Wärme gibt das Bauteil bei Abkühlung ab und desto mehr Wärme ist erforderlich, um die Temperatur eines Baustoffvolumens zu erhöhen. Bei der Wärmespeicherung wird laut Volhard (2016) zwischen Stoff- und Bauteileigenschaften unterschieden (Volhard 2016:203).

Bezüglich den Stoffeigenschaften ist die *Spezifische Wärmekapazität c* ausschlaggebend. Die spezifische Wärme ist die „erforderliche Energie, um ein Kilogramm eines Baustoffes um ein Grad

Kelvin (K) zu erhöhen“ (Volhard 2016:203). Sie wird charakterisiert durch die Wärmespeicherszahl S (Volhard 2016:203). Organische Materialien weisen eine höhere spezifische Wärmekapazität als massive mineralische Baustoffe auf und können demnach auf das Gewicht des Baustoffs bezogen mehr Wärmeenergie aufnehmen. Demnach besitzen organische Stoffe, trotz geringen Gewichtes, eine höhere spezifische Wärme als Lehmbaustoffe. Die Wärmekapazität von Lehm kann also durch das Hinzufügen eines organischen Stoffes, wie bspw. Holz oder Stroh erhöht werden (Hegger u. a. 2007:158). Die spezifische Wärme von Lehmbaustoffen ist $c = 1.0 \text{ kJ/kgK}$, die Werte von Stroh und Holzhackschnitzel betragen im Vergleich $c = 2.0 \text{ kJ/kgK}$. Mit zunehmenden Zuschlaganteil lässt sich somit die Wärmespeicherung von Holz- und Strohleichtlehm um das 1,1 bis 1,6-fache der Rohdichte erhöhen. Mineralische Zuschläge (wie Blähton) hingegen erhöhen die spezifische Wärme nicht (Volhard 2016:203).

Die Wärmespeicherung eines Bauteils bezieht sich nicht nur auf die spezifischen Wärme c , sondern ebenfalls auf die Rohdichte und das Volumen der Speichermasse. Temperaturschwankungen und Wärmeeinstrahlung beeinflussen die Raumtemperatur. Wärmespeichernde Stoffe regulieren die durch Temperaturschwankungen und Wärmeeinstrahlung beeinflusste Raumtemperatur auf ein mittleres Temperaturniveau. Diese Temperaturregulierung erlaubt der Speichermasse durch Nachtlüftung im Sommer abzukühlen, oder aber in Wintertagen Sonnenergie zu speichern. Die Wärme wird tagsüber durch die Sonneneinstrahlung im Baustoff gespeichert und strahlt abends Wärme in den Innenraum. Somit kommt es zu einer Zeitverschiebung zwischen den von außen einwirkenden Temperaturschwankungen und der Raumtemperatur (Volhard 2016:206). Hegger u. a. (2007) sprechen beim Zeitraum zwischen Energieabsorption und -emission von einer Phasenverschiebung (Hegger u. a. 2007:158). Durch eine undifferenzierte Anwendung einer Außendämmung wird diese wärmespeichernde Wirkung der Außenwand ignoriert. Eine Innendämmung kann hingegen aufgrund der erhöhten Mitteltemperatur der Außenschale in einer geringeren Stärke ausgeführt werden (Volhard 2016:206). Auch nach dem Anbringen einer Innendämmung können die Außenwände weiterhin durch solare Einstrahlung erwärmen. Die durch die Erwärmung entstehende höhere Temperatur der Außenwand wirkt sich positiv auf den Energiefluss durch das Bauteil aus (Claytec 2020:3). Grundsätzlich trennt eine Innendämmung die thermische Speichermasse der Außenwände von der beheizten Raumluft, wodurch die Innenräume schneller

erwärmt werden. Da laut Volhard (2016) Leichtlehme gute wärmedämpfende Eigenschaften aufweisen, könnte eine Dämmung mit Lehmbaustoffen es erlauben, die wärmedämmenden Eigenschaften der Außenwand zu verbessern und gleichzeitig das Wärmespeichervermögen der Außenwand beizubehalten (Volhard 2016:199).

Die Wärmedämmung und -speicherung eines Stoffes verhalten sich jedoch entgegengesetzt zueinander. Dämmstoffe zeigen zwar einen hohen Luftanteil auf und besitzen wärmedämmenden Eigenschaften, können allerdings kaum Wärme speichern. Baustoffe mit einer hohen Rohdichte können Wärme hingegen gut speichern, sind allerdings nicht für Dämmung geeignet. Das Verhältnis zwischen Dämmung und Speicherung eines Baustoffes wird als *Wärmedämpfung* bezeichnet (Volhard 2016:199). Ein Material zeigt dann hohe Kapazitäten zur Wärmedämpfung auf, wenn wärmedämmende und wärmedämpfenden Eigenschaften ausgeglichen sind. Ein Bauteil mit guten wärmedämpfenden Eigenschaften setzt sich somit entweder aus speichernden und dämmenden Baustoffen zusammen, oder aber besteht aus einem mittelschweren Material mit einer ausgeglichenen Zusammensetzung von wärmedämmender- und dämpfender Charakteristika. Neben Leichtziegel, Porenbeton und Holz zählt auch Leichtlehm zu den Baustoffen mit guter Wärmedämpfung (Volhard 2016:199). Leichtlehm hat somit sowohl wärmedämmende als auch wärmespeichernde Eigenschaften. Seine wärmedämmenden Eigenschaften sind auf den hohen Luftanteil von Leichtlehm zurückzuführen. Das Raumgewicht des Baustoffs steht im direkten Zusammenhang mit dessen Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK) (Volhard 2016:199). Die Wärmedämmung eines Baustoffs wird durch den *Wärmedurchlasswiderstand* R angegeben. Dieser ist abhängig von der Wanddicke s und der Wärmeleitfähigkeit λ der Baustoffe. Je höher der Wärmedurchlasswiderstand, desto besser die Wärmedämmung des Baustoffs. Bei unzureichender Wärmedämmung kann sich Raumfeuchte an der kalten Wandoberfläche in Form von Tauwasser ansammeln. Eine ausreichende Wärmedämmung ist demnach essenziell für ein angenehmes Raumklima und eine schadensfreie Wandkonstruktion (Volhard 2016:201). Auf die wärmedämmende Wirkung, sowie auf die Eignung von Leichtlehm als Dämmstoff wird später noch ausführlicher eingegangen (Kapitel 4.2.3).

Der Wärmedurchlasswiderstand bezieht sich somit auf die Wärmedämmung eines Baustoffes. Um die Wärmedämmung eines ganzen Bauteils zu beurteilen, ist der *Wärmedurchgangskoeffizient U* notwendig. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist somit der „Kehrwert der Summe der Wärmedurchlasswiderstände R aller Baustoffschichten und der unterschiedlichen Wärmeübergangswiderstände“ der innen- und außenliegenden Bauteiloberflächen (Volhard 2016:202). Grundsätzlich erreichen Lehmbauteile die geforderten U-Werte nur mit zusätzlichen Dämmschichten. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich jedoch auf bestehende Außenwände aus Ziegelmauerwerk, die durch Lehmbaustoffe saniert werden, es geht also darum den U-Wert einer bestehenden Außenwand zu verbessern. Der U-Wert beschreibt nur den Wärmeverlust eines Bauteils, sagt jedoch nichts über Energiesparpotentiale, wie bspw. über die Wärmespeicherung, aus. Der U-Wert gibt keine Auskunft über die energiesparende und komfortsteigernde Regulierung von Temperaturschwankungen, welche vor allem bei schweren Baustoffen ausgeprägt ist (Volhard 2016:202).

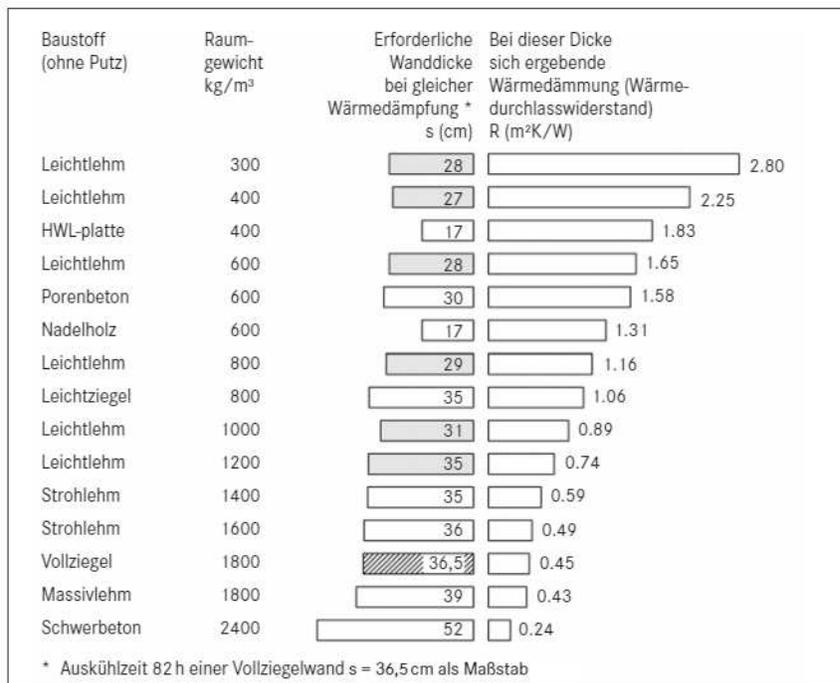


Abb. 12: Wärmedämmung von Baustoffen bei gleicher Dämmung
Quelle: Volhard 2016: 207

Die Wärmedämmung drückt aus, wie stark und mit welcher Zeitverschiebung sich die Schwankungen der Außentemperaturen an der Innenoberfläche einer Außenwand bemerkbar machen. Abhängig je nach Klimazone kann eine gute Wärmedämmung sowohl durch eine

Wärmedämmung als auch durch eine Wärmespeicherung erreicht werden. Je stärker die mittlere Außentemperatur von der normalen Innentemperatur abweicht, desto notwendiger ist eine Wärmedämmung (Volhard 2016:208f.). Massive Ziegelmauerwerke zeigen gute Dämpfungswerte auf, werden allerdings aktuellen energetischen Anforderungen nicht gerecht. Im Vergleich zu einer 36,5 cm dicken Vollziegelwand mit einer Rohdichte von 1800 kg/m^3 erreicht Leichtlehm mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 mit einer lediglich 27 cm Wanddicke die gleiche Wärmedämmung. Somit hat Leichtlehm eine vielfach bessere Wärmedämmung als Vollziegel (Abb. 12) (Volhard 2016:207). Demnach ist es notwendig, die Dämpfungswirkung der bestehenden Außenwände auch nach einer Sanierung zu behalten, jedoch thermisch zu verbessern. An dieser Stelle – so lässt sich im Zuge dieser Arbeit thematisieren – können sich Lehmbaustoffe als vorteilhaft beweisen, weil Leichtlehmteile eben auch bei niedrigerem Umfang Temperaturschwankungen dämpfen können und ein angenehmes Raumklima schaffen (Volhard 2016:209). Dennoch ist es bei der Dimensionierung und der Anwendung von Leichtlehmelementen wichtig, deren wärmedämpfenden Eigenschaften zu berücksichtigen, da diese einen erheblichen Einfluss auf des Raumklima haben. Leichtlehmkonstruktionen ausschließlich nach dem Wärmedurchlasswiderstand zu bewerten und dabei die Bewertung ihrer klimaregulierenden Eigenschaften zu vernachlässigen sollte dementsprechend vermieden werden.

4.2.2 Tauwasserausfall infolge einer Innendämmung

Anders als bei der Außendämmung, besteht bei der Innendämmung eine Tauwasser-Problematik. Erreicht der Wasserdampfgehalt der Luft die Sättigungsgrenze, entsteht Tauwasser. In den kalten Monaten diffundiert die warme Raumluft durch die Außenwand hin zur kalten Außenseite und kühlt währenddessen sukzessive ab. Die kalte Raumluft kann weniger Wasserdampf aufnehmen, erreicht folglich an einer bestimmten Stelle im Wandquerschnitt ihre Sättigungsgrenze und Wasserdampf wird zu Tauwasser (Röhlen & Ziegert 2020:155). Diese Tauwasser-Problematik wird durch dichte, außenliegende Schichten (z.B. Dampfbremse) verstärkt. Diese bremsen die Diffusion des Dampfstroms durch den Außenwandquerschnitt ab und konservieren die Feuchtigkeit in der Wandkonstruktion (Röhlen & Ziegert 2020:155). Besonders in kalten Monaten könnte es am Übergang der Innendämmung zur Außenwand zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur

kommen. Bei anhaltender Feuchtigkeit steigt das Risiko von Schimmelpilzbildung in der Konstruktion, die vom Innenraum nicht sichtbar ist (Maier 2011:249f.). Diese Problematik wurde bereits im Kapitel 3.1.2 Innendämmung thematisiert. Geringere Mengen an Feuchtigkeit im Mauerwerk sind weitestgehend unproblematisch insofern bestimmte Werte nicht überschritten werden und die Bauteile in den warmen Jahreszeiten austrocknen können (Röhlen & Ziegert 2020:155). Das entstehende Tauwasser kann laut Maier (2011) auch durch den Einsatz von saugfähigen und kapillaraktiven Dämmstoffen, wie bspw. Kalziumsilikatplatten oder Lehmsteinen², ausgeglichen werden (Maier 2011:250). Hierbei handelt es sich um Dämmstoffe, die bei der Planung eines diffusionsoffenen Dämmsystem verwendet werden können.

Diffusionsoffene Dämmsysteme können eingesetzt werden, um Bauschäden aufgrund von Kondensat zu vermeiden. Diese Systeme lassen – wie bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnt – die Bildung von Kondensat zu, ohne dass dadurch die Konstruktion beschädigt wird. Die geeigneten Dämmstoffe können ausfallende Feuchtigkeit aufnehmen, sie verteilen und anschließend wieder an die Raumluft abgeben (Worch 2016:124). Das Kondensat soll zwischen dem Kleber und der Dämmebene entstehen und nicht in der dahinter liegenden Außenwand. Dies ist besonders wichtig, da die Außenwand möglicherweise, im Gegensatz zum Dämmstoff, durch die Feuchtebelastung beschädigt werden kann (Worch 2016:124f.). Kommt es zu Kondensat in der Ebene zwischen Kleber und Dämmstoff, wird die Feuchtigkeit aufgrund der kapillaren Eigenschaften aufgenommen und im Dämmstoff gespeichert. Die Feuchtigkeit dringt durch die Dämmebene hindurch bis sie an der Oberfläche an den Innenraum wieder abgegeben werden kann (Worch 2016:125). Mineralische Baustoffe, wie bspw. Kalziumsilikatplatten, sind aufgrund ihrer kapillaren Leitfähigkeit kondensattollerierend. Es ist jedoch nicht jeder kondensattollerierende Baustoff kapillaraktiv, gleichwohl kann er ebenfalls aufgrund von Sorption speichernd wirken. Baustoffe wie Holzweichfaser oder Lehm können aufgrund ihrer hohen Speicherfähigkeit dem Feuchteausfall entgegenwirken (Worch 2016:128). Die Fähigkeit Feuchtigkeit zu speichern ist für ein funktionsfähiges diffusionsoffenes Dämmsystem eine entscheidende Eigenschaft (Worch 2016:126).

² In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff *Lehmstein* verwendet. Die Begriffe *Lehmstein* und *Lehmziegel* werden in der Literatur synonym verwendet, wobei *Lehmstein* eher in Deutschland und *Lehmziegel* primär in Österreich Verwendung findet.

Die thermischen Sanierungsmaßnahmen, die Minke (2017) herausarbeitete, beziehen sich zwar vorwiegend auf Fachwerksbauten, die zentralen Prinzipien lassen sich dennoch auf andere Baukonstruktionen übertragen. Minke weist u.a. darauf hin, dass dort wo Balkenköpfe die Dämmebene an der Innendämmung durchdringen, fast immer Wärmebrücken entstehen. Bei einer Innendämmung sei im Normalfall eigentlich eine Dampfsperre anzubringen, auf diese sollte jedoch laut Minke bei Fachwerksbausaniierungen verzichtet werden, da sich an den Wärmebrücken vermehrt Tauwasser ansammelt (Minke 2017:127). Durch ein dampfdichtes Material in der Konstruktion werden Luft- und Dampfstrom unterbunden, was jedoch ebenfalls verhindert, dass die durch Schlagregen durchfeuchtete Bauteile austrocknen können (Abb.13). Es entsteht eine *Feuchtefalle*. Somit scheint ein wesentlicher Aspekt darin zu liegen, Feuchtigkeit nicht nur nach außen hin-, sondern ebenfalls zum Innenraum austrocknen zu lassen (Röhlen & Ziegert 2020:156). Im Kontext von Gründerzeitbauten muss jedoch erwähnt werden, dass verputztes Mauerwerk grundsätzlich weniger empfindlich gegenüber Schlagregen ist (Weller u. a. 2012:215). Durch eine nachträgliche Innendämmung kommt es zusätzlich zu einem geringeren Temperaturgefälle im äußeren Mauerquerschnitt, wodurch die Bestandswand langsamer nach außen austrocknen kann. Diese Problematik ist besonders hinsichtlich der Austrocknung von einbindenden Holzbalkendecken zu berücksichtigen (Weller u. a. 2012:193). Auch kann dadurch, dass die Möglichkeit des *Durchheizens* gewitterter Bauteile verloren geht, historischer Mörtel und Ziegel verstärkt abfrieren und beschädigt werden (Röhlen & Ziegert 2020:156).

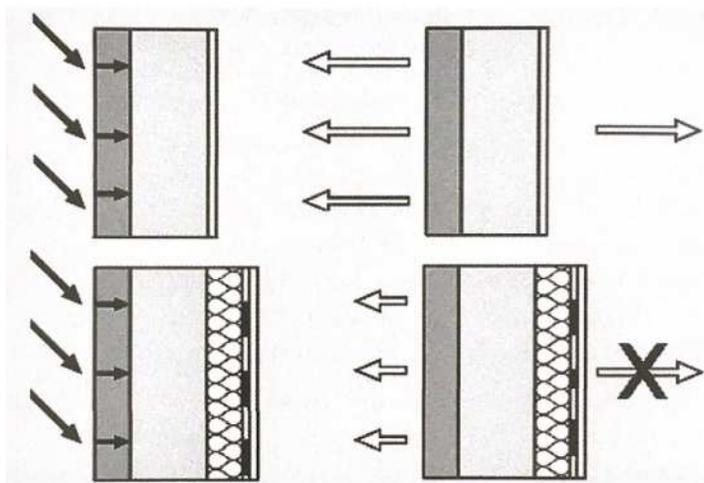


Abb. 13: Befeuchtung der Außenwand durch Schlagregen und Austrocknung nach innen
Quelle: Krus 2009:9 zit. n. Gänßmantel 2016d:282

Wegen möglicher Nachteile einer abdichtenden Innendämmung, werden laut Röhlen & Ziegert (2020) diffusionsoffene Innendämmkonstruktionen bevorzugt. Die Dämmstoffe sollten kapillar leitfähig sein damit sich die anfallende Feuchtigkeit verteilen kann und somit eine Belastung durch Tauwasser verhindert wird. Die kapillare Leitfähigkeit bewirkt, dass die Feuchtigkeit an der Oberfläche des Materials verdunsten kann. Zusätzlich erweist sich die Sorptionsfähigkeit von Baumataterialien als vorteilhafte Eigenschaft da sie dem Entstehen von Kondensat im Wandquerschnitt entgegengewirkt (Röhlen & Ziegert 2020:156).

Hinsichtlich der skizzierten Probleme der Wärmebrücke kann gesagt werden, dass ein Großteil der Schwachstellen und potentiellen Wärmebrücken durch eine Wandflächenheizung, welche durch eine Innendämmung von der Außenwand getrennt ist, entgegengewirkt werden kann. Die Wandflächenheizung wird hierbei in den Lehmputz eingearbeitet. Die Innendämmung zwischen Wand und Heizung verhindert den Energieverlust zur Außenwand (Blaschek 2015:89). Wandflächenheizungen können bei fast allen Innendämmsystemen eingesetzt werden. Eine Wandheizung kann jedoch nicht nur Wärmebrücken entschärfen, sondern ebenfalls den Heizenergiebedarf reduzieren. Oftmals fühlen sich Bewohner*innen auch bei geringeren Raumtemperaturen wohl, soweit die Wandoberflächen ausreichend beheizt sind und nicht abkühlen (Bauer 2016:239). Bei der Auswahl eines geeigneten Dämmsystems spielt dessen Relevanz für Tauwasser demnach eine entscheidende Rolle. Sowohl Minke (2017) als auch Röhlen & Ziegert (2020) plädieren für eine Innendämmung die ohne Dampfsperre auskommt, weil eine solche das Risiko einer Durchfeuchtung und einer Schadensbildung minimiert.

4.2.3 Vorteile und Eignung von Lehmbaustoffen zur Innendämmung

Baustoffe sind per Definition dann Wärmedämmstoffe, wenn sie die spezifische Wärmeleitfähigkeit, nämlich $\lambda \leq 0,1 \text{ W/mK}$, aufweisen. Die Wärmeleitfähigkeitswerte von Leichtlehm zählt mit $\lambda \geq 0,12 \text{ W/mK}$ somit allerdings nicht zur Kategorie der Wärmedämmstoffe. Die zur Dämmung nicht optimal geeignete Wärmeleitfähigkeit von Lehm erscheint allerdings im Kontext der vorhin

thematisierten Tauwasserproblematik hilfreich. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Tauwasserausfall und Wärmeleitfähigkeit fällt bei Lehmkonstruktionen kein oder nur wenig Tauwasser an (Röhlen & Ziegert 2020:158). Durch den Wärmeleitfähigkeitswert von Lehm kann demnach der Tauwasserproblematik (4.2.2) einer Innendämmung entgegengewirkt werden. Lehmstoffe können einerseits Wasser in ihren Poren- und Mineralstruktur speichern, ohne dass dies zu Problemen wie Schimmelpilze führt. Das Wasser im Baustoff wird jedoch nicht in flüssiger Form gespeichert, sondern wird im Baustoff gebunden. Durch die Eigenschaft von Lehm Wasserdampf temporär aufzunehmen, kann das Risiko von Tauwasserausfall infolge einer Innendämmung aus oder mit Lehm minimiert werden (Röhlen & Ziegert 2020:157). Insofern kann in Anlehnung an das vorherige Kapitel an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich Lehmstoffe insofern zur Innendämmungen eignen, als dass ihre Eigenschaften (wobei insbesondere Sorptionsverhalten und Kapillarität) innendämmungsbedingten Wärmebrücken- und Tauwasserproblematik entgegenwirken.

Ein weiterer Vorteil ist die diffusionsoffene Eigenschaft von Lehm. Wie Giebeler u. a. (2008) erwähnen, sollte vor allem bei Bestandsgebäuden mit Holzbalkendecken Dämmsysteme mit geringem Dampfdiffusionswiderstand verwendet werden. Bei geringem Dampfdiffusionswiderstand kann die vorhandene Baufeuchte weiterhin nach außen abgeführt werden (Giebeler u. a. 2008:122). Der Lehmstoff eignet sich insofern für Innendämmung, als dass die Trocknung der Außenwand hierdurch nicht maßgeblich beeinflusst wird. Das Aufrechterhalten der Trocknung ist nicht nur im Fall von Kondensatbildung im Bauteil zentral, sondern ebenfalls im Fall von Schlagregen, der auf die Außenwand einwirkt. Die Diffusionsoffenheit garantiert, dass die Bauteile schnell austrocknen können. Die kapillaren Eigenschaften von Lehmstoffen sorgen dafür, dass die eindringende Feuchtigkeit zu den Oberflächen abgeleitet werden und dort verdunsten können. Dies ist maßgeblich für den Feuchteschutz der Bauteile (Röhlen & Ziegert 2020:157). Wie bereits im Kapitel 3.1.2 Innendämmung erwähnt, stellen fehlerhaft angebrachte Dampfbremsen laut Giebeler u. a. (2008) ein reales Problem dar. Besonders im Anschlussbereich der Außenwand zum Boden und der Decke besteht ein erhöhtes Risiko, einer nicht-fachgerechten Montage der Dampfbremse. Aufgrund der Durchfeuchtungsproblematik empfiehlt es sich daher Dämmstoffe zu verwenden, die keine Dampfbremse benötigen. (Giebeler u. a. 2008:124). Nicht nur kann bei

Lehmbaustoffen auf eine Dampfbremse verzichtet werden, sondern zudem sollten keine dichten Schichten bei kapillar wirkenden Baustoffen wie Lehm verwendet werden. Eine Dampfbremse würde den Kapillarstrom und somit die Austrocknung des Bauteils verhindern (Blaschek 2015:89). Aufgrund seiner Wasserlöslichkeit kann Lehm hinsichtlich Reversibilität vorteilhaft bei nachträglichen Dämmungen eingesetzt werden. Die Lehmschichten können jeder Zeit entfernt werden, ohne den Bestand zu beschädigen. Folglich ist Lehm ein präferierter Baustoff im Kontext denkmalgeschützten Gebäuden (Röhlen & Ziegert 2020:158). Bei gründerzeitlichen Gebäuden ist dies von Vorteil, da durch die Wasserlöslichkeit die nachträgliche Innendämmung wieder entfernt werden kann, ohne die bestehende Außenwand zu beschädigen.

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, hat eine Innendämmung aus Lehmbaustoffen klare Vorteile bezüglich der Regulierung des Raumklimas. Durch eine Innendämmung wird die Außenwand von der thermischen Hülle getrennt. Diese thermische Entkoppelung kann sich negativ auf den sommerlichen Wärmeschutz auswirken. Die von Volhard (2016) beschriebenen klimaregulierenden Eigenschaften von Lehmbaustoffen können der thermischen Entkopplung jedoch entgegenwirken, und die wärmespeichernden Eigenschaften der Außenwand behalten (Volhard 2016:206). Es kann somit zusammengefasst werden, dass Lehm sich besonders hinsichtlich der Tauwasserproblematik, der Wärmespeicherung und der Reversibilität als Innendämmung eignet. Dies sind alle zentrale Problemstellungen, die oftmals bei Innendämmsystemen vernachlässigt werden.

4.2.4 Dimensionierung der Innendämmung

Durch eine optimale Dimensionierung der Innendämmung wird versucht, eine möglichst hohe Dämmwirkung bei einem möglichst minimalen Verlust an Raumfläche zu erhalten. Es ist jedoch ebenfalls wichtig, das Risiko einer Durchfeuchtung des Dämmstoffmaterials durch Tauwasser oder Schlagregen zu minimieren (Röhlen & Ziegert 2020:160). Laut Maier (2011) ist die alleinige Berechnung des Feuchtigkeitsnachweises mittels Glaser-Verfahren unzureichend. Das Glaser-Verfahren nämlich berücksichtige die Kapillarität der Baustoffe, die auch größere Tauwassermengen ausgleichen kann, nicht. Das Resultat der Berechnung nach Glaser könnte demnach angeben, dass Tauwasserausfall entsteht, obwohl dies durch kapillaraktive Dämmstoffe verhindert wird

(Maier 2011:250). Zur Berechnung der Dämmstoffstärke kann die internationale Norm EN ISO 13788 verwendet werden. Hierbei handelt es sich um ein ähnliches Nachweisverfahren wie beim Glaser-Verfahren mit dem Unterschied, dass sich hier auf realitätsnähere Klimadaten bezogen wird und mögliche Tauwasserausfälle berücksichtigt werden. Dadurch ist die Beurteilung dickerer Dämmschichten als nach Glaser-Verfahren möglich. Eine weitere Methode ist COND, ein Programm „zur hygrothermischen Beurteilung von Konstruktionen“ (Röhlen & Ziegert 2020:160). Es ist ähnlich dem Glaser, berücksichtigt jedoch Flüssigwassertransport innerhalb der Konstruktion, wodurch die Nachweisfähigkeit auch bei größeren Dämmschichtquerschnitten gegeben ist. Schlagregen wird bei diesem Feuchteschutznachweis nicht berücksichtigt. Um Parameter wie Flüssigwassertransport und Schlagregen zu berücksichtigen, müssen Programme wie DELPHIN und WUFI verwendet werden. Mittels dieser Programme lassen sich „Wärme-, Feuchtigkeits-, Luft-, und Salztransportvorgänge in porösen Baustoffen“ simulieren (Röhlen & Ziegert 2020:160). Die Programme DELPHIN und WUFI berücksichtigen die realen Klimadaten, Schlagregen, kapillare Leitfähigkeit der Baustoffe und deren Feuchtepufferung durch Sorption. Es liegen jedoch nicht viele Kennwerte für die Lehmbaustoffe vor, weshalb lediglich mit Abschätzungen berechnet werden kann. Bei allen Berechnungen müssen die Bestandsbaustoffe adäquat eingeschätzt werden. Die Feuchtebelastung muss für die Bestandsbaustoffe errechnet werden um sicherzustellen, ob die Baustoffe für die Konstruktion zulässig sind (Röhlen & Ziegert 2020:160). Röhlen & Ziegert (2020) empfehlen vor allem bei denkmalgeschützten und erhaltenswerten Fassaden schonend zu dämmen um die Bausubstanz nicht bauphysikalisch zu gefährden (Röhlen & Ziegert 2020:162). Demnach sollten ebenfalls die Gründerzeitbauten adäquat im Hinblick auf bauphysikalische Bedingungen hin gedämmt werden. Um das zu dämmende Ziegelmauerwerk bestmöglich dämmen zu können und eine Feuchtebelastung zu vermeiden, muss die Dimensionierung der Innendämmung mittels Software ermittelt werden.

4.2.5 Bauliche Vorbereitung der Innendämmung

Bevor eine Innendämmung an die Innenseite der Außenwand angebracht werden kann, benötigt es einige Vorbereitungen. Es muss zuerst sichergestellt werden, dass der untere Bereich des zu dämmenden Baubestandes nicht durch aufsteigende Feuchte belastet ist. Auf gründerzeitliche

Gebäude trifft dies jedoch öfters zu. Laut dem Wohnfond Wien (2016) ist eine nachträgliche Abdichtungen notwendig, wenn die, durch die Feuchtigkeit gelösten Bausalze an der Maueroberfläche des Erdgeschosses sichtbar sind und die Erdgeschosszone als Wohnraum benutzt wird (vgl. Kapitel 3.2) (wohnfonds_wien 2016:37). Horizontale oder außenseitige Abdichtungsmaßnahmen sind jedoch nicht immer möglich, weshalb alternativ auch innenseitige mineralische Innendämmungen als Maßnahme verwendet werden können (Röhlen & Ziegert 2020:162). Der Keller von Gründerzeitbauten hat nicht die Anforderungen eines Kellers nach heutigen Normen. Dadurch, dass keine Abdichtungen an der Kellerwand angebracht wurden, kann die Feuchtigkeit kapillar an die raumseitige Wandoberfläche geleitet werden und kann dort verdunsten. Die Verdunstung der Feuchtigkeit an der Wandoberfläche ist wichtig, um eine Feuchtigkeitsbelastung der Bauteile zu vermeiden. Sowohl innenseitige bituminöse Abdichtungen als auch dampfundurchlässige Dämpfstoffe können verursachen, dass die Salze lediglich mittels der aufsteigenden Feuchtigkeit höher das Mauerwerk entlang hinauf transportiert werden. Zudem können auch durch Feuchte im Mauerwerk gelöste und transportierte Salze die Bauteile belasten. Nach einer erfolgreich angebrachten Abdichtung können die Oberflächen der Bauteile durch die hygroskopische Wirkung der Salze weiterhin feucht sein (Röhlen & Ziegert 2020:162). Die endgültige Trockenlegung des Mauerwerks kann dementsprechend langwierig sein.

Vor dem Anbringen der Innendämmung müssen ebenfalls alle abdichtenden Beschichtungen vom bestehenden Mauerwerk entfernt werden. Grundsätzlich sind vorhandene Innenputze ausreichend diffusionsoffen. Um sicher zu stellen, dass die Beschichtungen nicht dichtend wirken, kann die Diffusionsoffenheit anhand des Benetzungsversuchs geprüft werden. Dabei wird Wasser auf die Oberfläche aufgetragen. Ist die Feuchtigkeit innerhalb weniger Minuten eingezogen, weist die Saugfähigkeit der Oberfläche auf eine ausreichende Diffusionsoffenheit hin (Röhlen & Ziegert 2020:163). Auch Minke (2017) empfiehlt alle alten Wandoberflächen zu entfernen und mit neuen dünnen Lehmschlämme zu überstreichen (Minke 2017:128). Ist der Boden oder bodennahe Bereich der Bestandswand aus einem kapillar leifähigen Material, das dafür verantwortlich ist, dass die in die Konstruktion eindringende Feuchtigkeit das Mauerwerk hinauf transportiert wird, muss am Fußpunkt der Leichtlehmschale eine bituminierte Pappe oder Folie angebracht werden. Bei

Baustoffen wie Beton besteht ein Risiko zur aufsteigenden Feuchte, weshalb die Leichtlehmschale durch solche Maßnahmen vom Bestand getrennt werden muss (Claytec 2020:13).

Die Installations- und Elektroleitungen können im Bereich der Schalenfuge der Dämmebene und im Bereich der Dämmschalen angebracht werden. Bei der Anordnung der wasserführenden Leitungen ist zu beachten, dass diese im frostsicheren Bereich angeordnet sind. Alle Installationen müssen tauwassergeschützt sein und dürfen während der Trocknungsphase der Innenschale nicht durch Feuchtigkeit belastet werden, weshalb diese meistens vor der Dämmschale oder an den Innenwänden angeordnet werden (Röhlen & Ziegert 2020:163).

4.2.6 Einbindende Wände und Decken, Fenster- und Türleibungen

Einbindende Bauteile können eine Schwachstelle in der Dämmung darstellen, weshalb bei einer Dämmung mit Dämmplatten eine flankierende Dämmung im Anschlussbereich zur Außenwand zu empfehlen ist. Durch diese Dämmstreifen kann der Energieabfluss minimiert, und eine Wärmebrücke vermieden werden. Einbindende Innenwände und Decken können ansonsten zu einer problematischen Oberflächenauskuhlung führen (Claytec 2020:5). Laut Röhlen & Ziegert (2020) muss die Dämmung von Wänden und Decken aus dichten und stark wärmeleitenden Materialien wie Beton immer flankierend ausgeführt werden (Röhlen & Ziegert 2020:164). Bei historischen Bauten stellen einbindende Bauteile ein geringeres Problem dar, weil die Baumaterialien eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufzeigen. Dies gilt ebenfalls für Ziegel mit einer Rohdichte $\leq 1600 \text{ kg/m}^3$. Auch Bauteile mit Rohdichten $\leq 1800 \text{ kg/m}^3$ sollten zu keinen problematischen Oberflächenauskuhlungen führen. Altbauten mit Außenwänden aus Ziegelmauerwerk sind demnach vorteilhaft für thermische Sanierungen mittels Innendämmung. Die relative Luftfeuchtigkeit in zentral beheizten Altbauten beträgt im Winter durchschnittlich eher 40 % als 50 %, dennoch sind die Oberflächentemperaturen bezüglich des Tauwasserausfalls unproblematisch. Sorptionsfähige Baustoffe wie Lehm können durch ihre Pufferwirkung einer erhöhten Raumlufteuchtigkeit entgegenwirken und verhindern, dass sich Oberflächenwasser bildet (Röhlen & Ziegert 2020:164). Hat ein Raum dauerhaft hohe Luftfeuchtigkeit, benötigt es eine regelmäßige Schimmelüberprüfung (Röhlen & Ziegert 2020:164). Gründerzeitbauten eignen sich demnach bezüglich der

Problematik der einbindenden Wände und der anfallenden Feuchtigkeit gut zur Innendämmung. Zusätzlich verhilft die Sorptionsfähigkeit von Lehm die anfallende hohe Raumluftheuchtigkeit zu regulieren.

Fenster- und Türleibungen sollten laut Röhlen & Ziegert (2020) gedämmt werden, wobei schon eine Stärke von 20 mm ausreicht, um die Oberflächentemperatur zu erhöhen. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 erwähnt, muss der Fensterrahmenanschluss luftdicht ausgeführt werden, da die Luftdichtheit ausschlaggebend für eine gute dämmende Wirkung ist. Besteht das Risiko einer Durchfeuchtung oder entstand bereits im Vorfeld der Sanierung Schimmel im Laibungsbereich, eignet sich ein mineralischer Dämmstoff (Röhlen & Ziegert 2020:164). In Bezug auf Gründerzeitbauten ist zu überprüfen, inwieweit diese Empfehlungen mit den Wiener Holzbaukastenfenster vereinbar sind. Durch die Rohdichte von gründerzeitlichem Mauerwerk sollte eine Innendämmung hinsichtlich der abkühlenden Oberflächentemperatur unproblematischer sein.

4.3 Leichtlehm

In Kapitel 4.2.3 wurde darauf hingewiesen, dass Leichtlehm eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda \geq 0,12$ W/mK aufweist und demnach nicht zur Kategorie der Wärmedämmstoffe zählt. Dennoch eignet sich Leichtlehm aufgrund seiner vielfältigen Vorteilen für Innendämmung (Röhlen & Ziegert 2020:157). Der Leichtlehm ist der Hauptbestandteil der dämmenden Konstruktionen. Lehm in Kombination mit Leichtzuschlägen ist laut DIN 18951 dann als Leichtlehm bezeichnet, wenn der getrocknete Baustoff eine Rohdichte von ≤ 1200 kg/m³ aufweist. Diese porösen Zuschlagstoffe werden dem Lehm hinzugefügt, um die Wärmedämmwirkung von Lehm zu verbessern. Auch „Abfallprodukte wie Sägemehl, Holzhobelspäne, Holzhackschnitzel und Getreidespelzen“ können für die Beimischung verwendet werden (Minke 2017:51). Je mehr Luftporen im Baustoff verarbeitet sind, und je geringer die Rohdichte ist, desto besser ist die Dämmwirkung (Minke 2017:51). Generell wird im Kontext von Leichtlehm zwischen mineralischen und organischen Zuschlägen unterschieden, wobei auch Mischungen aus beiden Zuschlägen möglich sind (Röhlen & Ziegert 2020:169). Die beigemischten Zusatzstoffe verändern überwiegend die physikalischen Eigenschaften des Baustoffes. Dadurch kann laut Schroeder (2019) die Zugfestigkeit, das

Schwindverhalten, als auch die Stabilität gegenüber Erosion verbessert werden (Schroeder 2019:171). Das Mischverhältnis von Lehm und Zusatzstoffen ist ausschlaggebend für die Eigenschaften des Leichtlehms. Durch eine Verringerung des Lehmantails und der damit einhergehenden Verringerung der Rohdichte, verbessert sich kontinuierlich die Wärmedämmwirkung. Dies bedeutet jedoch ebenfalls, dass mit zunehmendem Anteil an Zuschlägen, die Eigenschaften die an Lehmstoff verknüpft sind, wie die Schalldämmung, die Wärmespeicherung und der Feuerchutz, abnehmen (Volhard 2016:75). Neben den wärmedämmenden Eigenschaften von Leichtlehm erwähnt Volhard (2016), dass die faserigen Zuschläge die Lehmstoffe besser stabilisieren als mineralische Zuschläge. Überdies verringert der Zuschlag von Fasern die Wasserempfindlichkeit und erhöht sich die Frostbeständigkeit (Volhard 2016:53). Um thermisch verbesserte Eigenschaften zu erzielen, werden dem Lehm Zusatzstoffe wie Blähton, Blähglas und Blähschiefer hinzugefügt. Diese Zusatzstoffe haben jedoch im Vergleich zu organischen Zusatzstoffen den Nachteil des hohen Energieaufwandes bei der Herstellung. Als organischer Zusatzstoff werden überwiegend pflanzliche Faserstoffe, wie Strohhäcksel, Holzhackschnitzel und Hanfschäben, verwendet (Schroeder 2019:172). Leichtlehme werden meist „einbaufertig geliefert oder müssen leicht nachgefeuchtet werden“, können jedoch auch erst auf der Baustelle gemischt werden (Röhlen & Ziegert 2020:169). Organische Leichtlehme haben aufgrund des Zuschlags eine begrenzte Haltbarkeit und können daher nicht lange gelagert werden (Röhlen & Ziegert 2020:169). Mehrere organische und mineralische Zusatzstoffe werden eingesetzt, um die thermischen Eigenschaften von Lehmstoff zu verbessern.

Somit kann festgehalten werden, dass mehrere Leichtlehme eingesetzt werden können, um eine wärmedämmende Ebene zu erzeugen. Zur Dämmung von Gründerzeitbauten ist allerdings nicht jede Leichtlehmart gleichermaßen geeignet. Im Folgenden gilt es jene Leichtlehme darzustellen, die sich im Lehmbau bewährt haben. Zudem wird ihr Potential für die Dämmung von Ziegelmauerwerken diskutiert.

4.3.1 Strohleichtlehm

Wie der Name bereits andeutet, setzt sich Strohleichtlehm aus Stroh und Lehm zusammen. Strohleichtlehm hat wie alle Leichtlehme eine Rohdichte von $\leq 1200\text{kg/m}^3$. Für eine ausreichende wärmedämmende Wirkung ist die Struktur der Strohhalme ausschlaggebend. Grundsätzlich eignen sich Stroharten mit dünnen und stabilen Halmen, da diese bei der Verarbeitung nicht zusammengedrückt werden (Minke 2017:51). Das Stroh sollte ebenfalls möglichst stabil, reißfest und frei von Blättern und Unkraut sein (Volhard 2016:53f). Werden die Strohhalme bei der Verarbeitung zusammengedrückt, erhöht sich die Rohdichte und die Dämmwirkung wird verringert. Das verwendete Stroh sollte ebenfalls trocken sein, um die Bildung von Schimmelpilz zu vermeiden (Minke 2017:51).

Um durch Strohleichtlehm eine gute Dämmwirkung zu erreichen, muss die Rohdichte ausreichend gering sein. Das Problem ist jedoch, dass Lehmwände mit einer geringen Rohdichte von 300 bis 400kg/m^3 meist nicht erreicht werden. Die erhöhte Rohdichte liegt erstens an den Strohballen, die zusammengepresst werden und somit weniger Hohlräume enthalten. Zweitens wird das Stroh durch die Lehmschlämme weich und lässt sich einfacher verdichten, so dass bei der Verarbeitung die Rohdichte des Leichtlehms erhöht wird. Wird trotz dieser Hürden eine ausreichend niedrige Rohdichte erreicht, bieten die Bauteile keine ausreichende Festigkeit, um Dübel zu befestigen und um eine Putzschicht zu tragen. Erst ab einer Dichte von 700kg/m^3 ist eine ausreichende Festigkeit erreicht. Eine solche Rohdichte erfordert allerdings eine derart massive Wandstärke, dass sie nicht optimal als nachträgliche Dämmung eingesetzt werden kann. Hinzu kommt, dass sich mit zunehmender Wandstärke ebenfalls die Austrocknungszeit verlängert und sich somit die Verrottungsgefahr vergrößert (Minke 2017:52).

Strohleichtlehm neigt im Gegensatz zu reinem Lehm wesentlich schneller zu Schimmelbildung, weshalb der Belüftung der Bauteile besonders Rechnung getragen werden muss. Das Innere der Konstruktion kann noch nach Monaten nicht ganz ausgetrocknet sein und folglich verrotten (Minke 2017:53). Durch die langen Austrocknungszeiten kann auch der Baufortschritt verzögert werden (Gänßmantel 2016d:133). Während der Austrocknung der Konstruktion kommt es bei

Bauteilen aus Strohleichteilm zu starken Setzungen, weshalb die dabei entstehenden Fugen auszubessern sind. Auch ist die Verarbeitung von Strohleichteilm im Vergleich zu anderen Baumaterialien sehr zeitintensiv. Der notwendige Zeitaufwand ist etwa viermal größer als der einer herkömmlichen Ziegelwand. Vorteile von Strohleichteilm hingegen sind geringe Materialkosten, sowie „einfache Verarbeitbarkeit ohne Geräte“ (Minke 2017:53).

Strohleichteilm stellt aufgrund seiner Nachteile demnach nicht der adäquateste und optimalste Baustoff für eine nachträgliche Dämmung dar, insbesondere weil die hohe Rohdichte und die dadurch resultierende geringe Dämmwirkung zu einer unnötig dicken Dämmkonstruktion führt. Ein weiterer zentraler Nachteil ist der hohe Zeitaufwand, der die Konstruktion weniger lukrativ erscheinen lässt.

4.3.2 Holzleichteilm

Neben Strohleichteilmen zählen auch Holzleichteilmen zu der Gruppe organischer Leichteilmen. Aufgrund der erhöhten Rohdichte von Holz, ist die Dämmwirkung von Holz geringer als die von Stroh, Kork und mineralischen Zuschlägen. Durch das Hinzufügen von Holzabfällen lässt sich ein durchaus hoher Luftporenanteil im Leichteilm erreichen (Minke 2017:55).

Bei der Produktion von Holzleichteilm wird dieser in eine Schalung geschüttet und nur leicht verdichtet – die gleiche Vorgangsweise wie beim Strohleichteilm. Desto geringer die Rohdichte des Holzleichteilms, desto länger muss die Mischung in der Schalung verbleiben um eine ausreichende Festigkeit zu erreichen (Volhard 2016:54). Leichteilmen mit Zuschlägen aus Sägemehl oder Hobelspänen können Rohdichten von 500 kg/m^3 erreichen, diese verfügen jedoch nicht über die notwendige Festigkeit und haben ein erhöhtes Schimmelpilzbildungs- und Verrottungsrisiko. Es kann ebenfalls Holzhackschnitzel als Zuschlag verwendet werden um einen ausreichenden Anteil an Hohlräumen im Leichteilmgemisch zu erzeugen (Minke 2017:55). Ein Vorteil von Holzleichteilm ist seine geringe Setzung. Der Holzleichteilm mit Zuschlag aus Holzhackschnitzel hat eine Rohdichte von 600 kg/m^3 und eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$ (Röhlen & Ziegert 2020:169). Werden Waldholzabfälle als Holzhackschnitzel verwendet, besteht laut Minke (2017)

aufgrund des maßgeblichen Rindenanteils eine erhöhte Verrottungsgefahr. Es muss demnach darauf geachtet werden, dass die Holzhackschnitzel rindenfrei sind (Minke 2017:55). Laut Röhlen & Ziegert (2020) ist die Verrottungsgefahr des Materials „weder während der Trocknungszeit noch bei normaler Feuchtebelastung“ gegeben (Röhlen & Ziegert 2020:169). Ein weiterer Vorteil von Holzleichtelem ist die, bspw. im Gegenzug zum Strohleichtelem etwas schnelle Trocknung (Volhard 2016:54).

Rohdichten unter 700 kg/m^3 haben sich im Einsatz ohne verlorene Schalung nicht bewährt. Wird auf eine verlorene Schalung verzichtet, muss die Rohdichte zwischen 1000 und 1200 kg/m^3 aufweisen. Mischungen mit einer Rohdichte zwischen 1000 und 1200 kg/m^3 haben eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,50 \text{ W/mK}$ und erreicht somit keine ausreichenden wärmedämmenden Eigenschaften. Ein Vorteil von Holzleichtelem, ist die im Gegensatz zum Strohleichtelem einfache Verarbeitbarkeit. Dennoch muss bei der Ökobilanz von Holzleichtelem, zumindest in Deutschland, weite Transportwege beachtet werden, wodurch der Energieaufwand hoch ausfällt. Der einstehende Energieaufwand ist ähnlich hoch wie der von Blähton, ein mineralischer Zuschlag der grundsätzlich mehr Energie zur Herstellung benötigt als organische Zuschläge (Minke 2017:55).

4.3.3 Expandierter Kork

Eine weitere Zuschlagmöglichkeit liefert der expandierte Kork. Mit einer geringen Schüttdichte von nur ca. 90 kg/m^3 erreicht die Leichtlehmischung eine Rohdichte von nur 300 kg/m^3 . Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten sowie die geringe Festigkeit. Zusätzlich ist die Kantenfestigkeit gering und erlaubt aufgrund der geringen Festigkeit keine Befestigung von Möbelstücken an die Wand. Expandierter Kork kann ebenfalls in Kombination mit anderen Zuschlägen kombiniert werden, wodurch die negativen Eigenschaften womöglich wieder ausgeglichen wären (Minke 2017:55).

4.3.4 Mineralischer Leichtlehm

Neben den organischen Leichtlehmern bilden die mineralischen Zuschläge die zweite Gruppe der Leichtlehme. Diese Leichtlehmarten haben eine Rohdichte zwischen 500 und 1200 kg/m^3 . Im

Gegensatz zum den organischen Leichtlehm haben diese den Vorteil, dass sie beim Austrocknen nicht schwinden. Zusätzlich haben mineralische Leichtlehme eine ausreichende Festigkeit und erlauben es bspw. Dübel an der Wandkonstruktion zu befestigen. Auch bezüglich der Austrocknung sind mineralische Zuschläge klar im Vorteil, denn bei der Verarbeitung besteht nicht die Gefahr der Schimmelpilzbildung oder der Verrottung. Mineralischer Leichtlehm hat im Vergleich zum Strohleichtlehm einen 2 bis 3 mal höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand, weshalb das Risiko einer Tauwasserbildung in der Wand maßgeblich geringer ausfällt. Ebenfalls ist eine mineralische Mischung pumpfähig, was den Arbeitsfortschritt also wesentlich beschleunigen kann. Der Einsatz von Geräten für die Erstellung der Konstruktion lohnt sich allerdings erst bei größeren Bauvorhaben (Minke 2017:53). Im Gegensatz zu Stroh- und Holzleichtlehm müssen mineralische Leichtlehme einige Tage vollflächig eingeschalt bleiben bis eine ausreichende Trocknung erreicht ist. Mineralische Leichtlehme haben ebenfalls im Vergleich zu organischen Leichtlehm bei gleichem Raumgewicht eine viel höhere Zuschlagdichte. Dies ist besonders bei Zuschlägen wie Blähton zu berücksichtigen, die höchst energieaufwändig hergestellt werden. Der Energieaufwand für die Herstellung der Zuschläge muss im Kontext der ökologischen Beurteilung der Konstruktion berücksichtigt werden. Unter einem ökologischem Gesichtspunkt ist oftmals mineralisches Recyclingmaterial, wie bspw. granulierter Porenbeton, geeigneter (Volhard 2016:56).

Blähtonleichtlehm besteht aus Lehm mit der Zugabe von Blähton, gebrannte, poröse und kugelförmige Tonpartikel mit einer Körnung zwischen 4-8 oder 8-16 mm (Röhlen & Ziegert 2020:169). Blähton stellt den preisgünstigsten der mineralische Zuschlagstoff dar. Mit einer Schüttdichte von 300 kg/m^3 erzielt der Baustoff eine gute Wärmedämmwirkung. Durch seine nicht-kapillare Struktur ist Blähton „unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Frost“ (Minke 2017:53). Blähtonleichtlehm hat eine Rohdichte zwischen 600 und 700 kg/m^3 und einen Lambdawert zwischen $0,17$ und $0,21 \text{ W/mK}$ (Röhlen & Ziegert 2020:170). Die Eigenschaften von Blähglas zeigen Ähnlichkeiten mit jenen vom Blähton auf. Blähglas, verfügt jedoch über eine Schüttdichte von nur ca. 190 kg/m^3 , wodurch eine bessere Wärmedämmung erreicht wird. Diese geringere Schüttdichte resultiert in einer ca. 40% erhöhten Wärmedämmwirkung, wodurch sich laut Minke (2017) die Mehrkosten des Baustoffes womöglich wieder ausgleichen (Minke 2017:53f.). Durch die verbesserte Dämmwirkung braucht es zudem eine geringere Wandstärke (Minke 2017:54). Blähglas kann laut Röhlen

& Ziegert (2020) mit Stroh kombiniert werden, um das Gefüge *Blähglasleichte* herzustellen. Ein weiterer Baustoff ist der *Leichte mit Kieselgur*, welcher aus Lehm, Stroh- und Korngranulatzuschlägen besteht. Dieses Gemisch unterscheidet sich durch sein wasserunlösliches Abbinden von anderen Leichtlehmarten. Es ist somit nach Erhärtung nicht mehr replastifizierbar. Der Lambda-wert des Materials ist mit 0,08 W/mK deutlich besser als andere Leichtlehmarten (Röhlen & Ziegert 2020:170).

Zudem können Blähperlite als mineralische Zusatzstoffe verwendet werden. Dieser Zusatzstoff wird aus vulkanischem Gestein hergestellt. Blähperlite hat eine Schüttdichte von mindestens 60 kg/m³ und einen Lambda Wert von 0,045 W/mK (Minke 2017:54). Der Zusatzstoff Blählava besteht ähnlich wie Blähperlite aus vulkanischem Lavagestein. Bims ist ein natürlicher poröser Stein, der nicht wie Blähperlite durch Erhitzung expandiert wird, sondern als vulkanisches Produkt von Natur aus gebläht ist. Die Schüttdichte beträgt zwischen 500 und 750 kg/m³ und ist demnach maßgeblich schwerer als Blähperlite (Minke 2017:54).

Mineralische Leichtlehme werden aus einem fetten Lehm mit hoher Bindekraft und mineralischen Leichtzuschlägen hergestellt. Damit eine geringe Rohdichte von ca. 500 kg/m³ erreicht werden kann, muss die Menge des fetten Lehms lediglich einen Verbund zwischen den Körnern herstellen, nicht jedoch die Zwischenräume vollständig ausfüllen. Hierdurch erhalten Bauteile jedoch nur eine geringe Kantenfestigkeit. Zudem besteht die Möglichkeit, Leichtlehmteile mit einer höheren Rohdichte anzufertigen, bei welchen die Zwischenräume zwischen den Blähtonpartikeln vollkommen gefüllt ist (Minke 2017:54). Ein Vorteil von mineralischen Leichtlehmarten gegenüber von Strohleichte ist ihre gute Verarbeitbarkeit. Lässt sich Strohleichte nur in eine Schalung stampfen, können mineralische Leichtlehme hineingeschüttet und gepumpt werden. Bei einer Rohdichte von 600 kg/m³ ist die Dämmwirkung von mineralischen Leichtlehmarten und Strohleichten ähnlich. Bei geringerer Dichte jedoch, sind mineralische Zuschläge vorteilhafter (Minke 2017:54). Beim Strohlehm mit einer Rohdichte unter 700 kg/m³ kann es zu einem Bienenflug kommen. Da beim mineralischen Leichtlehm kein Stroh eingesetzt wird, kann dies auch nicht von Schädlingen befallen werden (Minke 2017:15). Bezüglich der Verarbeitung, der Trocknung und der Dampfdiffusionswiderstandes der Festigkeit und der Dämmwirkung können

mineralische Leichtlehme Vorteile gegenüber organischen Leichtlehm aufweisen. Im Kontext von Sanierungsmaßnahmen ist demnach zu überprüfen, welche Forderungen an die Leichtlehm-bauteile gestellt werden.

4.4 Innenschalen aus feucht eingebautem Leichtlehm

Die in Kapitel 4.3 aufgelisteten Leichtlehme können für die Dämmung einer bestehenden Außenwand durch eine Leichtlehmschale verwendet werden. Die Innenschale aus feucht eingebautem Lehm ist eine Dämmkonstruktion die an der Innenseite der Außenwand befestigt wird, um die Wärmedämmung der Gebäudehülle zu verbessern (Abb. 14). Hierzu wird Leichtlehm zwischen eine Außenwand und eine verlorene Schalung eingebaut. Leichtlehmschalen werden insbesondere bei Außenwänden angewendet, wo sonstige Innendämmung aufgrund unregelmäßiger Oberflächen schwer installierbar sind. Diese Unebenheiten werden durch eine bis mehrere Putzlagen ausgeglichen. Ein Nachteil von feucht eingebautem Leichtlehm ist die Belastung der bestehenden Außenwand durch die Einbaufeuchte und die lange Trocknungszeit. Um die Feuchtebelastung der Außenwand möglichst gering zu halten und eine schnelle Austrocknung der Konstruktion zu ermöglichen, braucht es die richtige Schalenstärke (Röhlen & Ziegert 2020:166). Zudem muss bei der Dimensionierung berücksichtigt werden, dass die Schalenstärke relativ hoch sein muss damit die wärmedämmende Wirkung ausreichend hoch ist. Dadurch ist jedoch der Verlust an nutzbarer Fläche höher als bei Dämmstoffen mit besseren wärmedämmenden Eigenschaften (Gänßmantel 2016d:133).

Leichtlehmschalen bestehen aus einer Unterkonstruktion aus einem vertikalen Lattengerüst und einer Leichtlehmfüllung. Die vertikalen Latten sind jeweils 30-35 cm voneinander getrennt und sind an beiden Enden an einer horizontalen Lattung, bzw. an einem Rahmen befestigt (Claytec 2020:14). Das vertikale Lattengerüst dient zur Montage der Schalung, die in einem gewissen Abstand zur Außenwand montiert wird. Der Abstand zwischen der Schalung und der zu dämmenden Außenwand definiert die Dämmstärke der Konstruktion. Nach dem Montieren der Schalung wird der Hohlraum mit Leichtlehm gefüllt. Nach Fertigstellung und Trocknung der Schalung wird meist

ein Putz aufgetragen, es können aber auch Platten angebracht werden (Röhlen & Ziegert 2020:166).

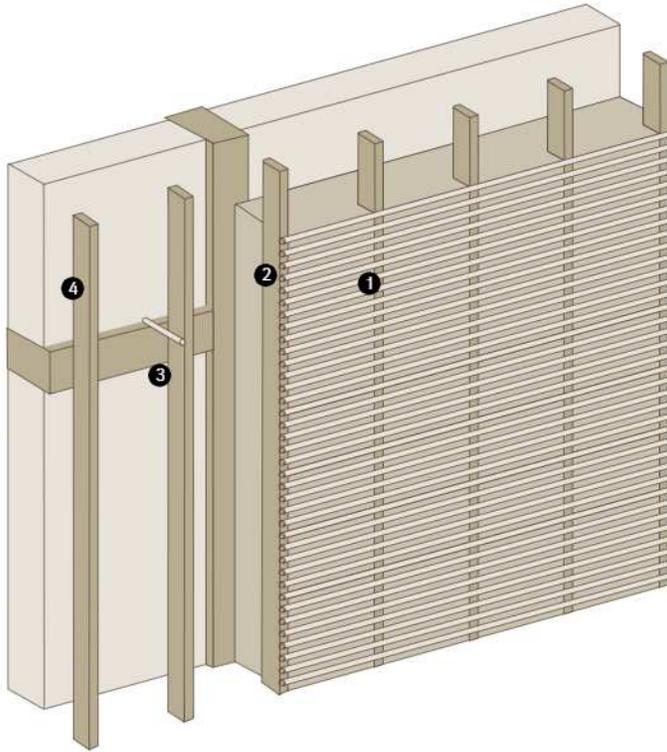


Abb. 14: Innenschalen aus feucht eingebautem Leichtlehm
1: Rohrgewebe St70, 2: Leichtlehm, 3: Befestigung, 4: Lattung
Quelle: Claytec 2020:12

Vorgesetzte Leichtlehmschalen haben den Vorteil, dass auf eine Dampfsperre verzichtet werden kann. Die von Minke (2017) beschriebene Innenschale aus feucht eingebrachtem Leichtlehm beziehen sich auf die Sanierung von Fachwerksbauten. Diese Außenwände haben „Ausfachungen aus Ziegelsteinen, Lehmsteinen oder aus einem Flechtwerk mit Strohlehmbewurf“ (Minke 2017:127). Da Gründerzeitbauten Außenwände aus Ziegelmauerwerk aufweisen, muss die Schalenstärke an die baulichen Gegebenheiten angepasst werden. Die an der Innenseite der Außenwand angebrachte Leichtlehmschale kann aufgrund seiner guten Wasserleitfähigkeiten und wegen seines großen Wasseraufnahmevermögens Luftfeuchtigkeit aufnehmen und durch die fehlende Dampfsperre nach innen und nach außen austrocknen. Hierbei ist es wichtig, dass keine Luftschicht zwischen der Leichtlehmebene und dem Ziegelmauerwerk entsteht, sondern dass

beide Konstruktionsebenen bündig anschließen, da ansonsten der kapillaren Feuchtetransport gestört wird und die Austrocknung nicht mehr garantiert wird (Minke 2017:128).

4.4.1 Bau der Leichtlehmschalen

Bei der Stärke der Innenschale ist die Austrocknung des feuchten Leichtlehms zu beachten. Ist die Schale zu dick, dauert der Trocknungsvorgang zu lange. Diese Feuchte kann sowohl, je nach Bauzustand, die Außenwand als auch die organischen Zuschläge und die konstruktiven Holzteile schädigen (Röhlen & Ziegert 2020:167). Hierbei kann es sinnvoll sein, mineralische Zuschläge zu verwenden da diese nicht die Gefahr der Schimmelpilzbildung oder der Verrottung bergen (Minke 2017:53). Wegen des Risikos einer Schimmelbildung ist die maximale Stärke von Leichtlehm mit organischem Faserzuschlag auf 30 cm limitiert, wobei eine beidseitige unbehinderte Trocknung garantiert werden muss (Claytec 2020:15). Nach den Lehmregeln zufolge begrenzt sich die maximale Dicke der Leichtlehmschale auf 15 cm. Ist die Außenwand aus einem kapillar leitfähigen Baustoff (bspw. Ziegelmauerwerk) mit einer Rohdichte $\leq 1600 \text{ kg/m}^3$, ist laut Röhlen & Ziegert eine Stärke $\leq 20 \text{ cm}$ zulässig (Röhlen & Ziegert 2020:166f.). Auch laut Schroeder (2019) sollte die Schalenstärke aus feuchtem Leichtlehm die 15 cm nicht überschreiten. Handelt es sich bei der zu dämmenden Außenwand um einen diffusionsoffenen und kapillar gut leitfähigem Baustoff, wie bspw. Ziegel, kann die Schalung auf maximal 20 cm erhöht werden (Schroeder 2019:514). Laut Minke (2017) sollte die Stärke der Leichtlehmschale unabhängig von den bauphysikalischen Bedingungen 15-25 cm betragen (Minke 2017:128). Die Unterkonstruktion muss fest mit der Außenwand verbunden sein. In der Hälfte der vertikalen Latten muss eine weitere Befestigung sein, damit die auf Zug belasteten Latten beim Verfüllen des Leichtlehms nicht nachgeben (Röhlen & Ziegert 2020:167).

Aufgrund der erheblich stärkeren Dämmung bieten sich schräge Fensterlaibungen an, diese minimieren den Verlust von Lichteinfall. Am Fenstersturz befinden sich Kanthölzer, um die Lasten der Innenschale abzuleiten. In den Raumecken sind jeweils zwei weitere vertikale Latten anzubringen, um die Schale beider Wände aufzunehmen (Röhlen & Ziegert 2020:167). Vertikale Installationschächte können durch Kanthölzer erzeugt werden, die nach der Verfüllung der Schale entfernt

werden. Die Schächte können jedoch auch durch zwei vertikale Latten erstellt werden, die im gewünschten Abstand stehen und nicht verfüllt werden (Röhlen & Ziegert 2020:168).

Die Schalung kann sowohl als temporäre Schalung als auch als verlorene Schalung ausgeführt werden. Eine temporäre Schalung muss ausreichende Stabilität aufzeigen damit sie sich während dem Einbringen des Leichtlehms nicht verformt. Zudem darf die Schalung nicht durch den feuchten Leichtlehm beschädigt werden. Um temporäre Schalungen anzufertigen eignen sich Schalbretter und Schaltafeln aus Holzwerkstoffen mit einer Stärke von 24 mm. Die temporäre Schalung wird an die vertikalen Latten befestigt und ist mit Laschen gegen Ausweichen zu sichern, falls die Stöße nicht auf den Latten liegen. Die Schalung wird unmittelbar nach dem Einbringen des Leichtlehms entfernt, damit dieser ungehindert austrocknen kann. Wird Blähtonleichtlehm verwendet, werden die Schalungen erst entfernt, wenn eine ausreichende Anfangsfestigkeit erreicht wurde (Röhlen & Ziegert 2020:168). Bei einer verlorenen Schalung verbleibt die Schale im Bauteil und fügt sich der ausgetrockneten Innenschale zusammen. Die Schalung muss also eine Trocknung des Lehmbaustoffs ermöglichen, ohne entfernt zu werden. Aus diesem Grund muss die Schalung ausreichend stabil, aber auch ausreichend luftdurchlässig sein. Schilfrohrgewebematten mit einer Halmdichte von ≤ 70 Stängeln/m eignen sich für verlorene Schalung. Auch schmale Bretter oder Latten können verwendet werden, soweit der Abstand ausreichend groß ist und der Lehm austrocknen kann. Die Schilfrohrmatte wird in horizontaler Ausrichtung an die vertikalen Latten befestigt. Die horizontalen Halme der Schale dienen gleichzeitig auch als Putzträger für den nachfolgenden Putz. Die Schilfrohrmatten haben den Vorteil, dass Fehlstellen gleich nach dem Verfüllen erkannt und ggf. ausgebessert werden können (Röhlen & Ziegert 2020:168).

Grundsätzlich werden Schaufeln und Forken verwendet, um den Leichtlehm einzufüllen. Je nach Leichtlehm können zudem Pumpen verwendet werden. Der Leichtlehm wird in die Schalung gestopft, ohne dass dabei die Lehmfüllung eingepresst wird und dadurch die Rohdichte erhöht wird. Der Leichtlehm ist so in die Schale einzubringen, dass keine größeren Hohlräume entstehen. Um die Bildung von Hohlräumen zu verhindern, werden die Schalen abschnittsweise eingefüllt und anschließend mit Stielen oder Latten verdichtet. Ziel der Verdichtung ist es ein homogenes Gefüge zu schaffen (Röhlen & Ziegert 2020:168). Die Schalung wird bis unter die Decke so weit

ausgeführt, wie die Verfüllung von oben möglich ist. Ist die Verfüllung von oben nicht möglich, wird der Leichtlehm raumseitig eingefüllt (Röhlen & Ziegert 2020:169).

4.4.2 Zur Herstellung der Schalung verwendete Leichtlehme

Für die Konstruktion der Schale können grundsätzlich alle Leichtlehme verwendet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verarbeitung von Strohleichtlehm einen größeren Zeitaufwand erfordert als andere Leichtlehme. Mineralische Leichtlehme können im Gegensatz zum Strohleichtlehm mit Estrichpumpen in die Schalung eingebracht werden. Somit sind sie auch lukrativer (Minke 2017:128). Holzleichtlehme können verwendet werden, um eine raumseitige Leichtlehm-schalung herzustellen. Die vertikale Lattung bestehen hierbei aus nicht imprägniertem Holz und hat einen horizontalen Abstand von 30-35 cm. Die Latten sind sowohl oben und unten, als auch auf halber Wandhöhe durch Zugsicherungen befestigt. Für die Schalung von Holzleichtlehm werden Schilfrohrgewebematten verwendet (Röhlen & Ziegert 2020:169). Die vertikale Lattenkonstruktion von Blähtonleichtlehm muss im Vergleich zur Holzleichtlehmschale stabiler ausgeführt sein, da das Gefüge aus Blähton einen schlechten inneren Zusammenhalt aufweist. Es sind auch mehr Zugsicherungen notwendig als bei anderen Leichtlehm. Röhlen & Ziegert (2020: 170) empfehlen die temporäre Schalung aus Schalbrettern oder Sperrholztafeln anzufertigen. Nachdem der Blähtonleichtlehm verfüllt wurde, wird die Schalung nicht gleich entfernt, sondern erst nach Erreichen einer benötigten Anfangsfestigkeit. Die temporäre Schalung wird schließlich zum Austrocknen des Leichtlehms entfernt. Ist das Raster ausreichend eng, kann auch ein Schilfrohr-gewebe als verlorene Schalung verwendet werden (Röhlen & Ziegert 2020:170). Für die Lattung von Leichtlehm mit Kieselgur können Kanthölzer 40/60 mm oder 40/80 mm, in einem horizontalen Abstand von ca. 60 cm, verwendet werden. Die verlorene Schalung wird als Sparschalung ausgeführt, auf die vor dem Verputz ein Putzträgergewebe befestigt wird (Röhlen & Ziegert 2020:171).

4.4.3 Trocknung der Schalung

Die verlorene Schalung muss eine Trocknung des Leichtlehm garantieren, weshalb ein Schilfrohr- gewebe als Schalung gut geeignet ist. Im Bauzeitplan muss die Trocknungszeit berücksichtigt wer- den, da eine Innenschale aus Holzleichtlehm mit 15 cm Stärke eine 12-wöchige Trocknungszeit ohne maschinelle Trocknungsunterstützung benötigt. Eine vollständige Austrocknung ist bei an- deren Leichtlehmsorten schneller erreicht. Die Trocknung muss nicht in den warmen Monaten erfolgen, sondern kann auch im Winter durch maschinelle Unterstützung gelingen. Im Winter muss die Baustelle jedoch temperiert und beheizt werden. Werden die Arbeiten im Winter aus- geführt, kann die kalte und trockene Außenluft sogar vorteilhaft für den Trocknungsprozess sein. Unabhängig von der Jahreszeit muss ein ständiger Durchzug gegeben sein, damit die feuchteauf- nahmefähige Außenluft den Lehmbaustoff austrocknen kann. Dennoch werden die Leichtlehm- arbeiten überwiegend während warmen Jahreszeiten ausgeführt (Röhlen & Ziegert 2020:171).

Da der Leichtlehm nicht alkalisch sondern chemisch neutral ist, kann sich temporärer Schimmel auf dem Leichtlehm bilden. Bei Schimmelbildung dauert die Trocknung zu lange und muss künst- lich beschleunigt werden. Um beurteilen zu können, wie weit der Trocknungsprozess vorange- schritten ist, muss Material aus tieferen Schichten des Bauteils betrachtet werden. Für die augen- scheinliche Prüfung kann die Farbe kleinerer getrockneter Leichtlehmreste als Referenz dienen. Genauere Beurteilungen können mittels der Darrprüfung ausgestellt werden (Röhlen & Ziegert 2020:171). Der Innenputz kann aufgetragen werden, wenn die Schalung augenscheinlich getrock- net ist (Claytec 2020:16). Die Innenschalen sollten hohlraum- und leckagefrei ausgeführt werden. Durch eine durchgehende Putzlagen kann luftdichte Ebene erreicht können, die jedoch nur gege- ben ist, wenn Spalten vermieden und Fehlstellen auszubessern werden (Röhlen & Ziegert 2020:165).

4.5 Innenschalen aus Leichtlehm-mauerwerk

Die Mauerwerksschale aus Leichtlehmsteinen und Leichtlehm-mauermörtel ist eine Dämmkon- struktion, die an der Innenseite der Außenwand befestigt wird. Lehm-mauermörtel trennt die

bestehende Außenwand und die 11.5 cm starke Mauerwerksschale (Abb. 15). Der Vorteil der Mauerwerksschalen ist dessen unkomplizierte Konstruktion, die auf gewohnter Handwerkstechnik basiert. Bei der Schale aus Leichtlehmsteinen handelt es sich um ein gewöhnliches Mauerwerk. Ein weiterer Vorteil ist die schnelle Weiterbearbeitung. Der Lehmmauermörtel zwischen dem Leichtlehmmauerwerk und der Außenwand verfüllt alle kleinen Hohlräume und Spalten die möglicherweise in der Außenwand liegen (Claytec 2020:18). Es wird ein hohlraumfreier Verbund zwischen der zu sanierenden Außenwand und der Mauerwerksschale hergestellt (Röhlen & Ziegert 2020:172). Ein Nachteil der Konstruktion ist – ähnlich wie bei Innenschalen aus feucht eingebautem Leichtlehm – der hohe Raumflächenverlust. Dieser ist besonders bei Gründerzeitbauten in Wien zu berücksichtigen, da der Raumverlust ein wichtiger Entscheidungsmerkmal für ein Dämmsystem darstellt. In diesem Abschnitt der Arbeit wird der Bau der Mauerwerksschale thematisiert, welcher sich von anderen Leichtlehmschalen durch seine gewöhnliche Mauerwerksverarbeitung absetzt.

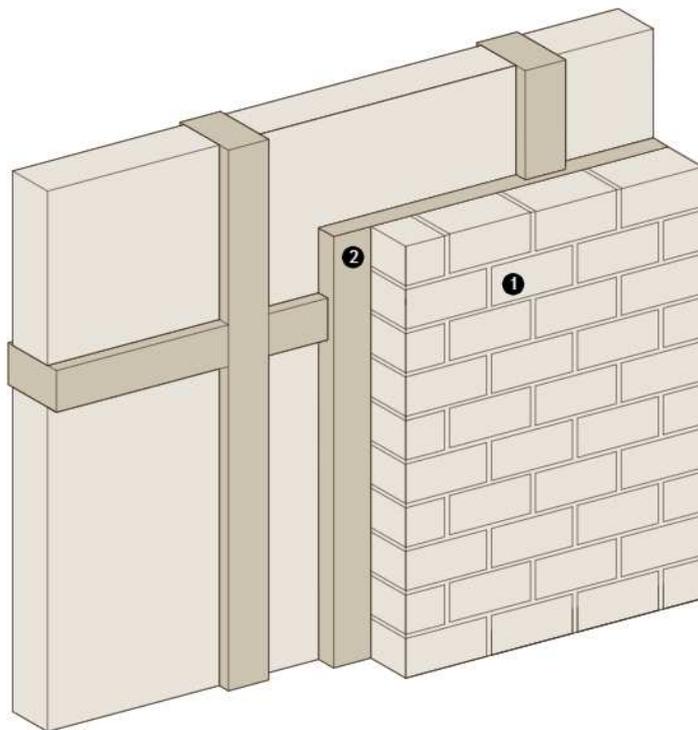


Abb. 15: Innenschalen aus Leichtlehmmauerwerk
1: Leichtlehmsteine, 2: Leichtlehm-Mauermörtel
Quelle: Claytec 2020:18

Kann die feucht eingebaute Innenschale gut bei unebenen Wandoberflächen verwendet werden, muss die zu sanierende Wandoberfläche vor der Errichtung der Mauerwerksschale eben sein. Um die unebene Oberfläche vorzubereiten, muss eine flächenausgleichende Schicht aufgetragen werden. Die Unebenheiten können mit Lehmputz- oder Mauermörtel ausgeglichen werden. Diese Schichten müssen getrocknet sein bevor das Mauerwerk erstellt wird. Die Schalenfuge zur Außenwand muss ausreichend groß sein, um eine hohlraumfreie Verfüllung mit Mörtel zu ermöglichen, jedoch nicht so groß, dass der Mörtel nicht schnell genug trocknen kann. Diffusionsoffene und kapillar leitfähige Außenwände und Innenschalen sind hilfreich für eine schnelle Austrocknung. Wird in den *Lehmbau Regeln* eine Maximalstärke von 3 cm angegeben, empfehlen Röhlen & Ziegert (2020) die Maximalstärke auf 1 cm zu limitieren (Röhlen & Ziegert 2020:172).

Um den Wärmedurchgang durch die Außenwand zu reduzieren, werden Steine und Mörtel mit möglichst wärmedämmenden Eigenschaften verwendet. Die Steine enthalten große Anteile an mineralischen oder organischen Zuschlägen. Auch die Leichtlehmörtel enthalten Zuschläge und haben eine Rohdichte zwischen ca. 1000 und 1200 kg/m³. Hat das Mauerwerk eine Rohdichte von ca. 800 kg/m³, ist der Wärmedämmwert der gesamten Innenschale ca. $\lambda = 0,21$ W/mK (Röhlen & Ziegert 2020:173). Die Schalenfuge zur Außenwand wird schrittweise mit den fortschreitenden Mauerarbeiten verfüllt. Zur Stabilisierung der Innenschale, muss diese an der Außenwand befestigt werden. Ist keine Befestigung vorhanden, kann das frische Mauerwerk durch die Verfüllung der Schalenfuge ausbrechen. Um solche Fehlstellen zu vermeiden, werden die Steine mit Flachankern oder mit Montagelochbänder in der Lagerfuge befestigt. An der Ziegelaußenwand werden die Anker mittels Dübel befestigt. Innenschalen mit einer Schlankheit $h/d > 15$ haben keine ausreichende Standsicherheit, weshalb die Schalen durch eine Verankerung an der Außenwand zu befestigen sind (Röhlen & Ziegert 2020:173).

Die Verarbeitung der Lehmsteine unterscheidet sich nicht von anderen Mauerwerkssteinen. Sind die Steine jedoch nur wenig saugend, braucht der Lehmörtel länger zum Austrocknen. Aus diesem Grund kann das Mauerwerk nicht zu hoch in einem Arbeitsschritt gemauert werden. Laut Röhlen & Ziegert (2020:174) ist bei saugfähigen Leichtlehmsteinen ist die Höhe auf 2 m pro Tag begrenzt. Besteht das Mauerwerk aus schlecht saugenden Steinen ist die zulässige Höhe erheblich

weniger, da ansonsten der noch weiche Lehmörtel der Belastung nachgeben würde. Auch ist aufgrund der geringen Druckfestigkeit des Lehmörtels wichtig, die Lagerfuge vollflächig zu vermörteln (Röhlen & Ziegert 2020:174). Laut Claytec sollten die Lager- und Stoßfugen nicht stärker als 1.0-1.5cm betragen, da ansonsten die Setzung des Mauerwerks zu stark sind (Claytec 2020:19). Es ist jedoch immer mit Setzungen des Mauerwerks zu rechnen, weshalb auf entstehende Spalten geachtet werden muss, die nach der Trocknung ausgebessert werden (Röhlen & Ziegert 2020:174). Der Innenputz kann aufgetragen werden, wenn die Innenschale augenscheinlich trocken ist. Durch das Verputzen der Innenschale werden kleine Fehlstellen und Spalten ausgebessert, so können kleine Undichtigkeiten vermieden werden (Claytec 2020:20).

Im Gegensatz zu der in Kapitel 4.4 beschriebenen Innenschale aus feucht eingebrachtem Lehm, ist die Stärke der Innenschale aus Leichtlehm-mauerwerk vorwiegend durch die Maße des verwendeten Mauerwerks definiert. Innenschalen aus feucht eingebrachtem Lehm können hingegen in unterschiedlichen Stärken eingesetzt werden. Die feucht eingebaute Leichtlehmschale kann bei diffusionsoffenen und kapillar gut leitfähigem Baustoff maximal 20 cm betragen (Schroeder 2019:514). Bei Gründerzeitbauten ist dennoch, aufgrund der erheblichen Wandstärke und Rohdichte von gründerzeitlichen Ziegelmauerwerk, wahrscheinlich Vorsicht geboten und die Stärke der Inneschale sollte wahrscheinlich eher im unteren Bereich der empfohlenen Stärken angeordnet werden.

4.6 Angemörtelte Dämmplatten

Dämmplatten in Lehmörtelverbund verursachen aufgrund ihrer guten Dämmwirkung und die dadurch resultierende geringe Schichtstärke nicht nur einen geringen Raumflächenverlust sondern zudem kurze Trocknungszeiten (Claytec 2020:3). Mit einer Dämmstärke von 40 mm oder 60 mm kann bereits eine maßgeblich verbesserte Wärmedämmung erzielt werden. Bei Dämmstoffdicken von 80 mm muss jedoch zunehmend mit problematischer Feuchtigkeit gerechnet werden (Claytec 2020:5).

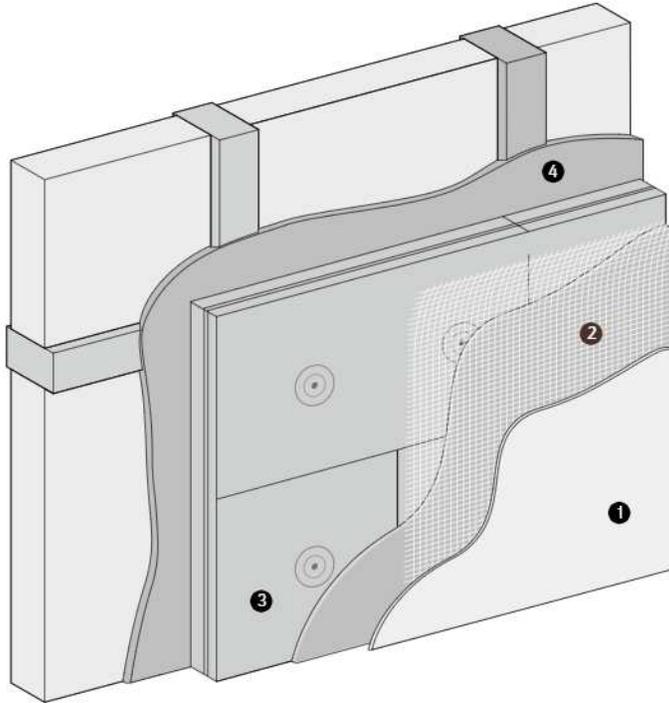


Abb. 16: Angemörtelte Dämmplatten

1: Lehm-Oberputz fein mit Anstrich, 2: Lehmklebe- und Armierungsmörtel oder Lehm-Oberputz fein mit Flachs- und Glasgewebe, 3: Innendämmplatte, 4: Ausgleichsputz falls notwendig Lehmklebe- und Armierungsmörtel

Quelle: Claytec 2020:2

Bei dieser Dämmkonstruktion werden diffusionsoffene Dämmstoffe verwendet, die in einem Lehmmörtelbett an der Innenseite der Außenwand verlegt werden (Abb. 16). Die meisten der verwendeten Dämmstoffe sind keine Lehmbaustoffe, eignen sich jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften, um einen Verbund mit Lehmbaustoffen herzustellen. Nachdem die Wärmedämmplatten an der Innenseite der Außenwand befestigt sind, lässt sich der Lehmputz auf die Platten aufgetragen. Da Lehmmörtel diffusionsoffen sind, kann die Behinderung des Wasserdampfstroms zwischen den Platten und der Bestandswand vernachlässigt werden. Aus diesem Grund eignet sich der raumseitig angebrachte Lehmmörtel auch besonders bei kapillar leitfähigen Dämmplatten (Röhlen & Ziegert 2020:175).

4.6.1 Anmörteln und Fixieren der Platten

Bevor die Platten angebracht werden, muss sichergestellt werden, dass die Oberflächen für die Montage der Dämmplatten ausreichend eben sind. Ist dies nicht der Fall, ist eine

Ausgleichsschicht erforderlich. Bevor die Platten montiert werden, darf das zu dämmende Bauteil nicht mehr feucht sein (Claytec 2020:7). Auch der Putz zur Ausgleichung der Oberfläche muss vor dem Auftragen des Mörtels vollständig getrocknet sein. Ist die Ausgleichslage dicker als der gewöhnliche Auftrag einer Klebelage von 3 cm, empfiehlt sich Lehmdämmputz. Die Ausgleichsschicht kann jedoch auch gleich als Mörtelbett für das Aufkleben der Dämmplatten dienen, soweit diese ≤ 1 cm ist (Röhlen & Ziegert 2020:175).

Ist die Ausgleichsschicht ausgetrocknet, werden die Platten mittels einer dünnen Lage Lehmputzmörtel oder Lehmkleber aufgeklebt. Damit der Lehmörtel vollflächig die Dämmplatten abdeckt, muss dieser ausreichend dick aufgebracht werden. Dieser darf aus Trocknungsgründen jedoch nicht dicker als 3 cm sein (Röhlen & Ziegert 2020:175). Der Kleber wird mittels einer Zahnspatel auf der Rückseite der Platten aufgetragen. Der Lehmkleber kann aber auch gleich auf den Untergrund aufgetragen werden, jedoch nicht bei stark saugfähigen Untergründen. Der Mörtel kann auch, um einen vollflächigen Verbund herzustellen, sowohl auf die Plattenrückseite als auf den Außenwanduntergrund aufgetragen werden (Röhlen & Ziegert 2020:176). Die Platten werden schließlich so fest an die Wand gepresst, bis die Lagendicke des Mörtels nur noch 5 mm beträgt. Der vollflächige Verbund ist notwendig um eine Hinterströmung der Platten und somit mögliche Durchfeuchtungsprobleme zu verhindern (Röhlen & Ziegert 2020:175). Um einen vollflächigen Verbund zu garantieren, werden die Platten meistens gleich nach dem Anpressen mittels Schrauben und Unterlegscheiben an die Außenwand und Mörtelbett befestigt (Röhlen & Ziegert 2020:176). Bei einem Ziegelmauerwerk werden die Dämmplatten mit langen Schraubdübeln befestigt. Hierbei – sowie im generellen bei Massivmauerwerken – sollen die Dübel ca. 60 mm in die Wand eindringen. Die Platten werden so angeordnet, dass keine vertikalen Fugen zwischen den Dämmplatten entstehen, wobei der Versatz der Platten mindestens 25 cm betragen muss (Claytec 2020:8). Es sind mindestens 5 Befestigungspunkte/m² vorzusehen. Wurden die angebrachten Platten an der Außenwand befestigt, müssen die Platten noch kurz antrocknen, bevor sie verputzt werden können (Röhlen & Ziegert 2020:176).

4.6.2 Verwendete Dämmplatten

Für die Innendämmung können verschiedene Dämmplatten zum Einsatz kommen. Dämmstoffe aus pflanzlichen Rohstoffen dürfen keiner konstanten Feuchtigkeit ausgesetzt sein, ansonsten bedarf es spezieller Maßnahmen. Sind horizontale oder vertikale Feuchtigkeitssperren aus bautechnischen Gründen nicht möglich, kann die Innenseite mit Kalziumsilikat- oder Schaumglasplatten saniert werden (Claytec 2020:5). Besonders Kalziumsilikatplatten eignen sich aufgrund ihrer Saugfähigkeit und Kapillarität als Maßnahme um ausfallendes Tauwasser zu vermeiden (Maier 2011:250). Dieses Feuchtetransportvermögen hat der Dämmstoff aufgrund seiner feinporigen Struktur. Die Platten sind nicht wasserlöslich, haben eine druckfeste Oberfläche und lassen sich unkompliziert verarbeiten (Gänßmantel 2016a:141). Laut Maier (2011) haben wissenschaftliche Studien gezeigt, dass bei der Verwendung von Kalziumsilikatplatten keine Schimmelbildung zwischen der Dämmebene und der Außenwand zu befürchten ist (Maier 2011:250). Auch in der Praxis hat sich der Dämmstoff bewährt und es hat sich gezeigt, dass bereits geringe Dämmstärken einen schimmelpilzfreien Wandaufbau garantieren (Gänßmantel 2016a:141). Die Platten werden aufgrund der Alkalität und der Kapillarität sowohl bei thermischen, als auch bei feuchtetechnischen Sanierungen eingesetzt (Röhlen & Ziegert 2020:178). Bei denkmalgeschützten Bauten bieten sich bereits geringe Dämmstärken von 20 mm an, die Platten können bis zu 160 mm dick sein (Gänßmantel 2016a:142).

Ein weiterer verwendeter Dämmstoff sind Mineralschaumdämmplatten. Die Platten sind je nach Dämmstoff kapillaraktiv und haben eine poröse Oberfläche. Ihre Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit sind geringer als bei Kalziumsilikatplatten. Mineralschaumdämmplatten können demnach die gleiche Wärmedämmung bei geringerer Materialstärke erzielen. Die Mineralschaumdämmplatten werden meist nicht wie andere Dämmstoffen durch ein Dübel an der Außenwand befestigt, sondern lediglich durch den Verbund mit Lehmörtel an der zu dämmenden ebenen Oberfläche angebracht (Röhlen & Ziegert 2020:178).

Ist das Bauteil nicht feuchtigkeitsbelastet, eignen sich Holzwolle-Platten (HW-Platten). Holzwolle ist ein sehr diffusionsoffener, aber kaum kapillar leitfähiger Baustoff. Ebenfalls eignen sich

Schilfrohrplatten, ein Dämmstoff der aus parallel zueinander angeordneten und durch verzinkte Drähte zusammengebunden Schilfhalm besteht (Röhlen & Ziegert 2020:177). Schilfrohrplatten verfügen über einen geringen PEI und werden als einziger Naturdämmstoff vollkommen unbehandelt verwendet. Schilfrohrplatten haben eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von $0,055 \text{ W/mK}$ und bieten aufgrund ihrer spezifischen Wärmespeicherkapazität sommerlichen Wärmeschutz (Gänßmantel 2016b:156). Die Platten sind höchst diffusionsoffen und haben fast keine kapillare Leitfähigkeit. Ein Nachteil der Platten ist, dass sie als Dämmstoffe nicht geprüft sind (Röhlen & Ziegert 2020:177).

Holzfaserdämmplatten (HFD-Platten) können ebenfalls als Innendämmung in Kombination mit Lehmörtel verwendet werden. Dieser, aus feinen Holzfasern zusammengesetzte, Dämmstoff ist diffusionsoffen und hat eine geringe kapillare Leitfähigkeit (Röhlen & Ziegert 2020:177f). Die feuchtepuffernde Wirkung des Dämmstoffes kann sich im Kontext von Lehm besonders entfalten und folglich für ein angenehmes Raumklima sorgen. Diese Eigenschaft der Platten wird durch den Lehmputz unterstützt, da der Lehmputz keine diffusionshemmende Schicht darstellt. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von HFD-Platten ($0,040 \text{ W/mK}$) können bereits geringe Dämmstärken eine gute Dämmwirkung erzielen (Sprengard 2016a:150). HFD-Platten haben den Vorteil, dass sie sowohl gute Dämm- als auch Speichereigenschaften aufweisen. Sie eignen sich demnach gut um die Wärmespeichereigenschaft (Kapitel 4.2.1) der Außenwände zu bewahren (Hegger u. a. 2007:159). Im Gegensatz zu den Kalziumsilikatplatten können HFD-Platten aufgrund ihrer Flexibilität Unebenheiten an der Wandoberfläche ausgleichen (Sprengard 2016a:150).

Wärmedämmlehm-Platten bestehen im Gegensatz zu den anderen angemörtelten Dämmplatten aus Lehm und Leichtzuschlägen. Die Platten haben meist eine Dämmstärke zwischen 40 und 100 mm. Wärmedämmlehm-Platten werden meist verarbeitungsfertig geliefert, können demnach im Gegensatz zu den Leichtlehmschalen schnell verarbeitet werden und müssen vor ihrer Weiterbearbeitung nicht austrocknen (Gänßmantel 2016c:148). Im Bereich der Plattenstöße wird durch einen Kontaktdämmörtel zwischen den Platten ein Verbund hergestellt (Gänßmantel 2016c:149).

4.6.3 Weiterbehandlung der Dämmplatten

Es lassen sich keine allgemein gültige Trocknungszeiten für den Verputz anführen, vielmehr ist die ausreichende Festigkeit des Mörtelbetts zwischen den Dämmplatten und der Außenwand ausschlaggebend. Wird auf die Platten eine Dünnlagenbeschichtung aufgetragen, muss eine 3 mm dicke Schicht mit Lehmklebe- und Armierungsmörtel aufgetragen werden. Bevor der Putz auf die getrocknete Oberfläche aufgetragen werden kann, wird ein Flachs- oder Glasgewebe in den noch nassen Lehmklebe- und Armierungsmörtel eingearbeitet. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Dicklagenbeschichtung auf die Platten aufzutragen. Bei dieser Methode beträgt die Gesamtaufbaudicke max. 15 mm. Die zu dämmende Wand kann ebenfalls nach dem Anbringen der Platten als Wändflächenheizung ausgeführt werden. Die Flächen sind nur mit diffusionsoffenen Anstrichen zu versehen, weshalb Verfließungen auf die absolut notwendigen Bereiche zu limitieren sind (Claytec 2020:9).

Angemörtelte Dämmplatten haben erstens den Vorteil, dass bereits bei geringen Stärken eine gute Dämmwirkung nachgewiesen wird (Claytec 2020:5). Somit wird der Raumverlust minimiert und es verbleibt mehr Raumfläche um wirtschaftlich zu nutzen, was in Wien bei erhöhten Mietpreisen von Vorteil sein kann. Ein zweiter Vorteil ist die Verfügbarkeit verschiedener Dämmplatten, die flexibel je nach Gegebenheit und Anforderungen verwendet werden können. Auf der Kehrseite wirken sich Dämmplatten im Kontext von Lehmsanierung allerdings teilweise kontraproduktiv aus, weil ja nach verwendetem Dämmstoff einige Vorteile von Lehmbaustoffen verloren gehen. Teilweise werden die Eigenschaften von Lehm dennoch durch den Lehmmörtel und Lehmputz erhalten.

4.7 Lehmputz

Nachdem die Dämmmaßnahmen an der Innenseite der Außenwand angebracht wurden, kann die Innenseite anschließend mit einem Lehmputz beschichtet werden. Der Lehmputz trägt im Gegensatz zu den dämmenden Sanierungsmaßnahmen zur Raumgestaltung bei. Es gilt im folgenden Kapitel einerseits die bauphysikalischen Eigenschaften des Lehmputzes zu erläutern und zu

untersuchen, welchen Einfluss diese auf Nutzer*innen haben. Nachdem die allgemeinen Eigenschaften aufgezählt wurden, werden in einem weiteren Schritt die unterschiedlichen Lehmputzsorten und deren Zusammensetzung, sowie Einsatzbereiche, aufgelistet.

Lehmputze zeichnen sich besonders durch ihre Offenporigkeit der Oberflächen und die wesentliche Fähigkeit zur Feuchtaufnahme und -abgabe aus (Röhlen & Ziegert 2020:49). Der Lehmputz ist besonders wegen seines Sorptionsverhalten und dessen vorteilhaften Einfluss auf die Behaglichkeit der Nutzer*innen von Vorteil. Die Sorption von Wasserdampf ist besonders stark bei Baustoffen mit einem hohen Anteil an sehr feinen Poren (Abb.17) (Hegger u. a. 2007:159).

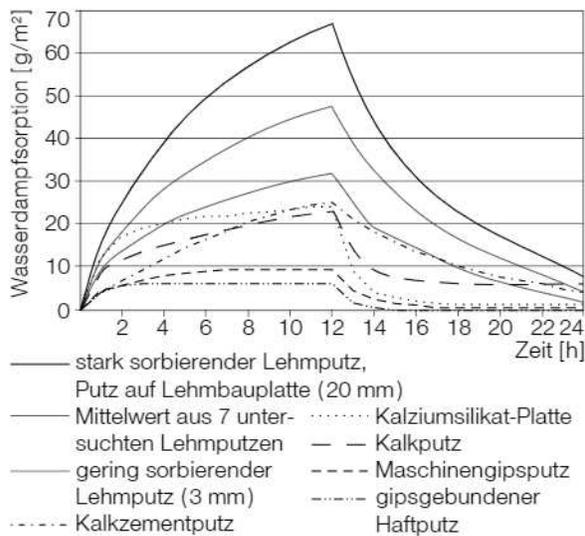


Abb. 17: Sorption von Wasserdampf verschiedener Wandbeschichtungen bei einem Feuchtesprung von 50 auf 80%
 Quelle: Hegger u. a. 2007:159

Die verwendete Lehmputzschicht sollte sowohl an die klimatischen als auch an die nutzungsbedingten Bedingungen angepasst sein. Es sollte sowohl die Lehmputzsorte als auch -stärke an die Bedingungen angepasst sein. Lehmputzschichten von 2 mm benötigen bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte erheblich weniger Zeit die Gleichgewichtsfeuchte zu erreichen, als dies eine 15 mm Lehmputzschicht bei der gleichen relativen Luftfeuchtigkeitserhöhung tut (Abb. 18) (Hegger u. a. 2007:159). In Räumlichkeiten mit einem potentiell hohen Feuchteeintrag, kann demnach die Schichtdicke des Lehmputzes an die Raumnutzung angepasst werden.

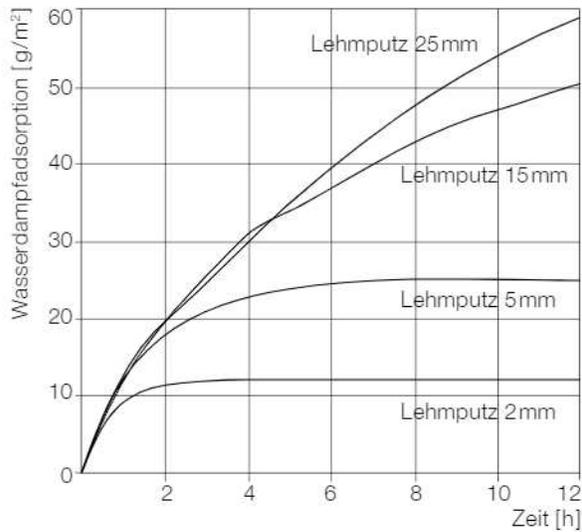


Abb. 18: Sorption von Wasserdampf unterschiedlicher Lehmputze in Abhängigkeit ihrer Schichtdicke
Quelle: Hegger u. a. 2007:159

Der Vorteil von Lehmputz begrenzt sich allerdings nicht nur auf das Sorptionsverhalten und den Einfluss auf das Raumklima. Als Naturbaustoff hat Lehm einen ressourcenschonenden Produktlebensweg und wirkt sich demnach positiv auf die ökologische Beurteilung der Baumaßnahmen aus. Auch im Bereich der Denkmalpflege sind Lehmputze geeignet, insbesondere, weil Lehm wasserlöslich ist und sich zu einem späteren Zeitpunkt zerstörungsfrei vom Baubestand entfernen lässt (Röhlen & Ziegert 2020:49).

Im Kontext der Sanierung von Gründerzeitbauten sind Lehmputze nur im Innenbereich einsetzbar, so dass die Wasserempfindlichkeit unproblematisch ist. Lehmputz lässt sich – und das ist ein weiterer Vorteil – nachträglich bearbeiten, was darauf zurückzuführen ist, dass er nicht chemisch abbindet, sondern an der Luft trocknet. Auch unter einem ästhetischen Gesichtspunkt gestaltet sich Lehm vielseitig: farbiger Ton und Erdfarbpigmente ermöglichen eine große Farbpalette, die als Eigenfarbe des Lehmputzes nicht künstlich erzeugt werden muss. Zudem bieten japanische Lehmputze durch Faserbeimischungen vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten (Volhard 2016:169). Die mechanische Festigkeit von Lehmputz ist etwas niedriger als die von Kalkzementputz, ist jedoch vergleichbar mit der Festigkeit von Kalk- oder Gipsputzen (Röhlen & Ziegert 2020:49). Lehmputze setzen sich aus Lehm oder Ton und optional aus Zusatzstoffen zusammen. Pflanzliche oder mineralische Zusatzstoffe können fettem, stark bindemittelhaltigem Lehm beigemischt werden, um die Schwindrissbildung möglichst zu begrenzen. Die Zusatzstoffe wirken sich jedoch nicht nur

abmagernd auf fetten Lehm aus, sondern können ebenfalls als Bewehrung innerhalb des Lehmputzes fungieren und die Wärmedämmeigenschaften verbessern (Röhlen & Ziegert 2020:53).

Der Lehmputzmörtel kann in unterschiedlichen Methoden aufgetragen werden. Der Mörtel kann „angeworfen, maschinell angespritzt und aufgezogen“ werden (Volhard 2016:171). Das Aufziehen ist besonders bei dünnen Aufträgen vorteilhaft, aber auch bei normalen Auftragsstärken ist diese Methode angemessen und materialsparend. Bei dickeren Aufträgen, wie bspw. bei einer Ausgleichsschicht, eignet sich das Anwerfen besser. Normale Auftragsstärken betragen ca. 15 mm, dicke Aufträge können jedoch auch 30 mm betragen. Ansonsten kann der Mörtel auch in mehreren Schichten aufgezogen oder angespritzt werden. Lehmmörtelputz kann ebenfalls als Untergrund für Kalkputze verwendet werden, welche einen ebenen und gleichmäßig saugenden Untergrund voraussetzen (Volhard 2016:171).

4.7.1 Lehmputzsorten

Die verwendeten Lehmputze unterscheiden sich bezüglich ihrer Eigenschaften und ihrem Einsatzbereich. Auch wenn die Lehmputze bezüglich der energetischen Performance der Außenwand weniger relevant ist, ist es dennoch wichtig in diesem Kapitel die unterschiedlichen Lehmputze zu erläutern. Sie sind ausschlaggebend dafür, wie die Sanierungsmaßnahmen an der Außenwand auf die Benutzer*innen wirken. Die Oberflächenoptik und Haptik des Lehmputzes können durch unterschiedliche Parameter beeinflusst werden. Ausschlaggebend sind einerseits die verwendeten Farben, die Körnungen des Baustoffes, die Oberflächenbearbeitung, aber auch der Einsatz von Zusatzstoffen (Röhlen & Ziegert 2020:49). Lehmsandputz unterscheidet sich vom Kalkmörtel lediglich dadurch, dass Lehm als Bindemittel verwendet wird. Durch den Lehm hat der Lehmsandputz die Eigenschaft, dass er nicht chemisch abbindet, sondern an der Luft trocknet (Volhard 2016:171). Durch das Hinzufügen von Pflanzenfaser wird der Zusammenhalt des Gefüges verstärkt und kann als Bewehrung innerhalb des Lehmputzes dienen. Gemische ohne Pflanzenfaser haben grundsätzlich einen höheren Sandanteil, wodurch sie wiederum weniger günstige mechanische Eigenschaften aufweisen (Röhlen & Ziegert 2020:54). Lehmputz gibt es ebenfalls als Lehm-

Fertigmörtel, welcher nur durch die Hinzugabe von Wasser aufgebracht werden muss und durch die entfallende Arbeitszeit besonders praktisch und ökonomisch ist (Volhard 2016:178).

Bevor der Oberputz aufgetragen wird, welcher für die Optik der Wand ausschlaggebend ist, wird je nach Wandoberfläche ein Unterputz aufgetragen. Unterputze werden aufgrund ihrer Zusammensetzung nicht für die Oberflächengestaltung verwendet, sondern bilden den Untergrund für den Oberputz. Unterputze enthalten meist grobe Bestandteile und bestehen aus fettem Lehm. Durch diese Zusammensetzung mit einem erhöhten Bindemittelanteils haftet der Unterputz zwar besser an der zu verputzenden Oberfläche, neigt allerdings zur Schwindrissbildung (Röhlen & Ziegert 2020:55). Der etwa 15 mm dicke Unterputz beinhaltet Grobsand sowie in manchen Fällen zusätzlich Stroh, Grobheu oder Spreu. Ist der Faseranteil nicht zu hoch, kann der Unterputz mit der Maschine aufgespritzt werden, ansonsten lässt er sich ebenfalls händisch anwerfen. Anschließend wird er geglättet und eine dünne Schicht Oberputz wird aufgetragen. Der Oberputz wird mit einem feinen Sand und kann, je nach erforderlichen Eigenschaften, zusätzlich mit Feinfaser vermischt werden. Im Falle heterogener oder weicher Untergründe kann zur Stabilisierung zusätzlich eine flächige Armierung mit Gewebe in die Oberfläche der Unterputzes eingearbeitet werden. Die Armierung kann ebenfalls dann in die Putzschicht eingearbeitet werden, wenn mit Vibrationen im Bauteil zu rechnen ist (Volhard 2016:172). In diesem Fall ist von *Armierungsputz* die Rede (Röhlen & Ziegert 2020:55).

Faserlehmputz ist ein Unterputz mit erhöhten elastischen Eigenschaften, der aufgrund seiner geringen Wärmeableitung als warmer Lehmputz gilt. Dem Unterputz können Zusatzstoffe wie Strohhäcksel, Grobsand oder auch Stroh hinzugefügt werden, welche den Putz magern und stabilisieren (Volhard 2016:174). Der Unterputz wird nass aufgetragen, so dass die Dicke 2-5 cm beträgt. Nachdem der Putz aufgetragen wurde, wird dieser auf der Oberfläche aufgezogen bis die Putzschicht 5 mm beträgt. Auf den Unterputz kommt anschließend eine dünn aufgezogene Oberputzschicht, die bei Bedarf nachbehandelt werden kann (Volhard 2016:175).

Lehmdämmputze, einem weiteren Unterputz, werden Zusatzstoffe wie Bims oder Blähglasgranulat beigemischt. Lehmdämmputze wirken – wie der Name bereits andeutet – wärmedämmend

und weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 0,17-0,19 W/mK auf. Die Putze werden unter Innendämmplatten, auf Fensterlaibungen, Wärmebrücken oder als flächige Mineraldämmung verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit des Lehmputzes beträgt 0,17-0,19 W/mK (Röhlen & Ziegert 2020:55).

Leichtlehmunterputz ist Strohleichtlehm der als Unterputz verwendet wird. Der Leichtlehmputz lässt sich anwerfen oder aufziehen und anschließend mit einem Brett glätten. Leichtlehmunterputz braucht aufgrund der Strohfasern kein zusätzliches Putzgewebe. Der Putz kann in einem Arbeitsgang 5-50 mm dick aufgetragen werden und so Unebenheiten auf der Oberfläche beseitigen. Bevor ein Lehm- oder Kalkputz aufgetragen wird, muss die Oberfläche des Unterputzes aufgeraut werden (Volhard 2016:175). Dies entsteht grundsätzlich durch das kreuzweise Ritzen mit einer Kelle. Der Kalkfeinputz kann als Oberputz fungieren und als solcher abschließend 5 mm dick aufgetragen werden (Volhard 2016:176). Feinputze sind dünnlagige Oberputze die sich durch eine feine Körnung (meist < 1 mm) kennzeichnen (Röhlen & Ziegert 2020:55). Vor dem Anbringen der Kalkfeinputzes muss die Oberfläche des Unterputzes angefeuchtet werden, damit ein guter Verbund zwischen beiden Schichten hergestellt wird. Dem Kalkmörtel kann ebenfalls feine Fasern und gröberer Sand (≤ 4 mm) beigemischt werden. Die Kalkputze können ebenfalls im Außenbereich angewendet werden (Volhard 2016:176).

Ist eine andere Optik und Haptik als die des Lehmputzes erwünscht, kann der Putz übertapeziert oder überstrichen werden. Zur besseren Haftbarkeit von Anstrichen und Tapeten auf dem Lehmputz, sollte magerer Lehm vermieden werden, zudem kann eine Grundierung vorteilhaft sein. Für die Grundierung werden wenig-flüssige Schlämme aus feinem Sand und Weißkalk eingerieben. Auch der Tapetenkleister sollte nicht zu dünnflüssig sein, da Lehmputz sich ansonsten lösen könnte (Volhard 2016:178).

4.7.2 Verwendung von Lehmputzen zur Salzreduktion

Einen besonderen Stellenwert nehmen Lehmputze im Kontext der Salzreduktion ein. Vor dem Hintergrund des oftmals vorzufindenden Zusammenhangs zwischen Salz- und Feuchteschäden

lässt sich die Vermutung äußern, dass Lehmputz möglicherweise besonders hilfreich bei der Sanierung von gründerzeitlichen Kellergeschossen ist, die oftmals Feuchtigkeitsprobleme aufzeigen (Kapitel 3.2). Die aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk transportiert bauschädliche Salze zur Verdunstungszone und trocknet schließlich an der Oberfläche aus – es kommt zu Ausblühungen. Die Salze an der Wandoberfläche kristallisieren und sprengen dabei durch die Volumenvergrößerung den Porenraum (Maier 2011:121). Eine Methode zur Entfernung der Bausalze liegt im Auftragen von Opferputz, einem saugfähigem Kalk- oder Entsalzungsmörtel der sich nach einigen Monaten mit dem aufgesogenen Salzen wieder entfernt lässt (Giebeler u. a. 2008:127). An dieser Stelle ist jedoch zu vermerken, dass sich die Schadenbekämpfung durch Opferputz nur dann langfristig bewährt, wenn das Mauerwerk bereits erfolgreich trockengelegt wurde da es ansonsten zu erneuten Ausblühungen kommen kann. Wird die Feuchtequelle nicht unterbunden, stellt das Auftragen von Opferputz lediglich eine kurzfristige Lösung dar und es kommt binnen drei bis zehn Jahre zu erneuten Ausblühungen (Röhlen & Ziegert 2020:328). Lehmputze können als Opferputze eingesetzt werden. Im Gegensatz zu anderen Opferputzen haben Lehmputze den Vorteil, dass der Entsalzungserfolg visuell erkennbar ist, wodurch der Entsalzungserfolg gut überwacht werden kann. Darüber hinaus sind die Kosten für Lehmputz geringer als die von anderen Salzreduktionsmaterialien (Röhlen & Ziegert 2020:327).

5. Über den potentiellen Stellenwert von Lehm in der Sanierung von Gründerzeitbauten

In diesem Kapitel gilt es zu überprüfen, wie die in Kapitel 4 beschriebenen Lehmbaustoffe im Einsatz zur thermischen Sanierung in Kontext von gründerzeitlichen Gebäuden in Wien Einsatz finden können. Die aktuelle Datenlage zum Einsatz von Lehmbaustoffen zur Sanierung von Gründerzeitbauten fällt mager aus. Im Kontext der vorliegenden Arbeit lassen sich für bauphysikalische Eigenschaften sowie zur aktuellen Einsatzbereichen von Lehmbaustoffen im Kontext von Sanierungsarbeiten von Gründerzeitbauten dennoch Einschätzungen vernehmen. Diese, im folgenden ausformulierten Einschätzungen lassen sich als Deduktionen und Synthesen der theoretischen Auseinandersetzungen aus dem vorherigen Kapitel verstehen.

5.1 Referenzprojekte

Wie bereits in Kapitel 3 festgehalten, kann durch den Einsatz einer Innendämmung bei der energetischen Sanierung von denkmalgeschützten und historischen Gebäuden die Energieeffizienz des Bestandsgebäudes erheblich verbessert werden. Gleichzeitig ermöglichen Innendämmungen die Konservierung historischer Fassaden. Dennoch gilt die Innendämmung nicht als Standardsanierungsmaßnahme. Im Gegenzug dazu werden Gebäudehüllen in erster Linie durch Außendämmungen saniert. Gründe hierfür wurden ausführlicher an einer früheren Stelle dieser Arbeit, insbesondere im Zusammenhang mit Herausforderungen, Schwächen und potentiellen Komplikationen von Innendämmungen, thematisiert (Kapitel 3.1.2). Eine hochwertige energetische Sanierung eines Gründerzeitgebäudes stellt in Wien eher die Ausnahme dar (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013:16). In Wien steht die niedrige Sanierungsrate von Altbauten im Zusammenhang mit dem hohen erforderlichen Planungsaufwand, der mit der Sanierung eines denkmalgeschützten Gründerzeithauses einhergeht (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013:22). Im folgenden Abschnitt werden einige Sanierungsprojekte angeführt um darzustellen, wie Lehmbaustoffe im Kontext von Gebäudedämmungen eingesetzt werden. In diesen Projekten kommen angemörtelte Dämmplatten und Leichtlehmschalen zur

Verwendung. Als Kontrast wird zudem das Demonstrationsprojekt Kaiserstraße 7 vorgestellt. Im Leitprojekt *Gründerzeit mit Zukunft* (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013) kamen keine Lehmbaumstoffe zum Einsatz, so dass exemplarisch an diesem Projekt veranschaulicht werden kann, wie denkmalgeschützte Gebäude in Wien saniert werden können. Überdies kann hierdurch ein, für die vorliegende Arbeit wertvoller Vergleich zwischen unterschiedlichen Dämmsystemen (Lehm vs. andere Baustoffe) vollzogen werden.

5.1.1 Sanierung Kaiserstraße 7 in Wien

Begonnen mit einem Sanierungsprojekt eines Wiener Gründerzeithauses in dem kein Lehm zur Verwendung kam. Im Kontext des Demonstrationsprojekt Kaiserstraße 7, 1070 Wien wurde im Zuge des Leitprojektes *Gründerzeit mit Zukunft* ein gründerzeitliches Gebäude mit denkmalgeschützter Fassade energetisch saniert (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2013:11). Das ehemalige Klostergebäude wurde 1907 errichtet und die Sanierungsmaßnahmen unterlagen neben ökologischen Ansprüchen, zudem dem Anliegen, den zeitgemäßen Gebäudestandart zu erhalten. Konkreter rückte die Aufmerksamkeit dabei besonders auf den Erhalt der historischen Fassade (Abb. 19) (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2018:16). Bei der Sanierung wurde nicht auf herkömmliche Sanierungsmaßnahmen zurückgegriffen, sondern es wurde nach innovativen Lösungen gesucht, die als Grundlage für zukünftige Sanierungsprojekte dienen sollen. Das Sanierungsprojekt sollte demonstrieren, wie Gründerzeitbauten trotz denkmalgeschützten Fassaden heutigen Standards zur Energieeffizienz und zum Komfort gerecht werden können (Trimmel u. a. 2014:15).



Abb. 19: Straßenseitige Fassade Kaiserstraße 7
Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2018:16

Aufgrund der denkmalgeschützten straßenseitigen Fassade wurde die Außenwand innenseitig gedämmt. Aufgrund von hygrothermischen Simulationen wurde festgestellt, dass eine 8 cm Innendämmung mit der bestehenden Außenmauer verträglich ist und es zu keinem Anstieg des Wassergehalts im Mauerwerk kommt. Es wurde sich aufgrund dieser Berechnungen auf eine 5 cm Dämmstärke aus kapillaraktiven Mineralschaumplatten geeinigt (Trimmel u. a. 2014:19).

Die meisten Dämmplatten werden in Kombination mit allen Bestandteilen des Systems, wie bspw. Kleber und Putz, angeboten (Gänßmantel 2016a:142). Mineralschaumplatten werden grundsätzlich durch einen mineralischen Klebemörtel an die zu dämmende Wand verklebt. Anschließend wird eine Armierungsschicht auf die Platten aufgetragen, bevor eine Oberflächenbehandlung aufgetragen wird (Kolbe 2016:144). In der Kaiserstraße wurde ein 1 cm Gipsputz auf die Dämmplatten aufgebracht (Schöberl u. a. 2011:42) Wie bereits in Kapitel 4.6.2 erwähnt, eignet sich auch Lehmörtel zur Befestigung der Platten an der Wandoberfläche. Als Oberbeschichtung kann auch ein Lehmputz, dessen Eignung in Kapitel 4.7 angeführt wird, eingesetzt werden.

Im dritten Obergeschoss wurde an der Südwand eine 10 cm Mineralschaumdämmung angebracht, die im Rahmen des Projektes *Gründerzeit mit Zukunft* mittels einer Temperatur- und Feuchtemessung überwacht wurden, um eine erhöhte Feuchtigkeitsbelastung rechtzeitig zu erkennen. Durch dieses Monitoring wurde analysiert, ob auch eine 10 cm Mineralschaumplatte eingesetzt werden kann, ohne die Feuchtebelastung zu erhöhen. Die Resultate sind relevant für die

Dimensionierung von Dämmschichten in zukünftige Sanierungsprojekten (Trimmel u. a. 2014:20). Diese Analysen führten zu der Erkenntnis, dass keinerlei kritische Feuchteansammlungen im Mauerquerschnitt entstehen (Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie 2018:48).

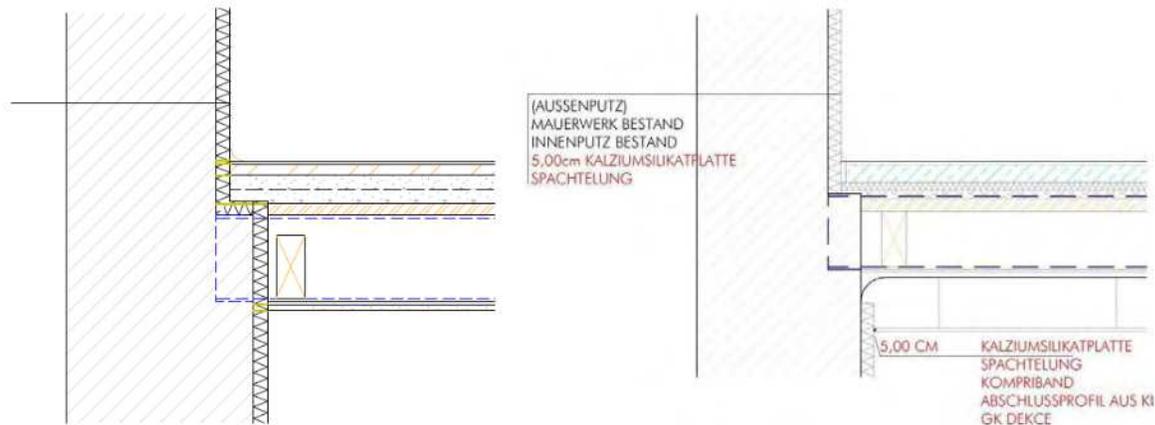


Abb. 20: links: Bereich der Tram-Traverse lt. Projektantrag, rechts: Tatsächlich umgesetzte Innendämmung
Quelle: AKP zit. n. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2014:20

Aus dem Projektantrag geht hervor, dass anfangs die Innendämmung im Bereich der Tram-Traverse hinter dem Streichbalken durchlaufend angebracht werden sollte (Abb.20). Dieses Detail wurde jedoch nicht wie geplant umgesetzt, da der Abstand der Streichbalken zur Außenwand für die Einfügung einer Innendämmung zu gering ist. Durch die Unterbrechung der Dämmebene im Bereich der Tram-Traverse entsteht eine Wärmebrücke, die bewusst in Kauf genommen wurde, um die punktuelle Feuchteproblematik am Balkenkopf zu entschärfen (Trimmel u. a. 2014:20).

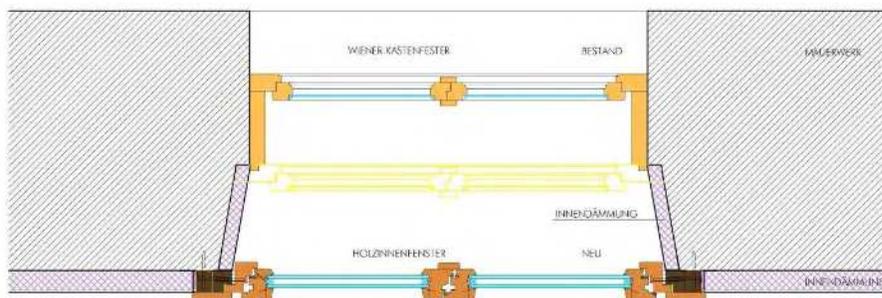


Abb. 21: Anschlussdetail des Innenfenster und der Innendämmung
Quelle: Architekten Kronreif Trimmel&Partner zit. n. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2014:21

Um die historischen Kastenfenster thermisch zu sanieren und das Erscheinungsbild der historischen Fassade dennoch zu erhalten, wurden die originalen Außenflügel bautischlermäßig

instandgesetzt. Der historische Innenflügel wurde entfernt und es wurden neue Holzfenster mit Wärmeschutzverglasung hinzugefügt (Abb.21) (Trimmel u. a. 2014:21). Die hofseitige Fassade ist nicht denkmalgeschützt, weshalb in diesem Bereich eine Außendämmung aus Mineralwolle verwendet werden konnte (Trimmel u. a. 2014:23).

Das Demonstrationsprojekt Kaiserstraße 7 zeigt, wie Innendämmungen eingesetzt werden können, ohne den Baubestand zu beschädigen. Es wurde versucht durch dieses Projekt neue Erkenntnisse zu sammeln, um ähnliche Dämmsysteme und innovative Lösungen in zukünftigen Sanierungen von historischen Bauten einsetzen zu können. Diese Erkenntnis bezieht sich jedoch in erster Linie auf die Innendämmung mit Mineralschaumdämmplatten. Exemplarisch entlang diesem Referenzprojekt kann also gezeigt werden, wie aktuell innovative Lösungsansätze verwendet werden, um denkmalgeschützte Gebäude in Wien energetisch zu sanieren.

5.1.2 Sanierung einer Cottagevilla in Wien Währing

Das zweite Referenzprojekt das in der vorliegenden Arbeit thematisiert wird, bezieht sich auf eine Sanierung eines Gründerzeithauses, wo für die Innendämmung u.a. Lehmverputz zur Verwendung kam. Dieses Referenzprojekt wurde im Zuge einer Diplomarbeit (Wegerer 2010) dokumentiert. Wie bereits in Kapitel 4.6 erwähnt, kann Lehmmörtem mit unterschiedlichen pflanzlichen Dämmstoffen kombiniert werden, um einen Verbund herzustellen. In diesem Referenzprojekt wurde eine nachträgliche Wärmedämmung in Form von Schilfdämmplatten mit Lehmverputz an der Innenseite einer Außenwand befestigt. Bei dem Gründerzeitgebäude handelt es sich um eine Cottagevilla in Wien Währing, die zwischen 1870 und 1880 erbaut wurde. Das Gebäude befindet sich einer Schutzzone und konnte aufgrund der historischen Fassade nicht außengedämmt werden. Die Außenwände des zweigeschossigen Gründerzeithauses bestehen aus einem Vollziegelmauerwerk und weisen im Erdgeschoss inklusive der anfallenden Putzschichten eine Wandstärke von 50 cm auf (Wegerer 2010:66).

Um vorhandene Wärmebrücken zu entschärfen, wurden zunächst alle losen Putzstellen abgeschlagen und die Ecken der zu dämmenden Wand mit einem Thermoputz verfüllt. Der Putz auf

der Wandoberfläche wurde grob abgezogen um eine ebene Oberfläche für die anzubringenden Dämmplatten zu erzeugen (Wegerer 2010:67). Diese Arbeitsschritte wurden also vor die tatsächliche Montage der Schilfdämmplatten gestellt. Durch Temperatur- und Feuchtesensoren in der Dämmkonstruktion wurde das Dämmsystem analysiert. Die untersuchten Parameter sollten einerseits Auskunft über das Dämmverhalten der Schilfdämmplatten, aber auch über das Verhalten des Lehmputzes in Verbund mit dem Schilfdämmplatten bezüglich der Feuchtigkeitsbelastung liefern. Die Ergebnisse der Analyse wurden durch das tatsächliche Nutzerverhalten beeinflusst und lieferten somit realitätsgetreue Daten (Wegerer 2010:67).

Die verwendeten Schilfdämmplatten betragen 125 cm Breite, 100 cm Länge und 5 cm Dicke (Wegerer 2010:74). Die Platten wurden mit einem Versatz von 30 cm angebracht (Wegerer 2010:75) und anschließend mittels Tellerdübel an der Wandoberfläche befestigt (Wegerer 2010:68). Bevor der Faserlehm als Putzschicht aufgetragen werden konnte, musste zunächst eine Lehmschlämme als Grundierung aufgetragen werden. Dies ist notwendig, da ansonsten der Lehmputz nur schlecht an den Platten haften bleibt. Der Lehmputz wird in mehreren 5 bis 15 mm dicken Schichten aufgetragen. Die Vielschichtigkeit ist notwendig, um eine ebene und rissfreie Putzoberfläche zu erzeugen. Die erste Putzschicht muss nach ihrem Auftragen vollkommen austrocknen bevor die nächste hergestellt werden kann (Wegerer 2010:77f.). Zudem muss darauf geachtet werden, dass jede Putzschicht ausreichend schnell austrocknet, da ansonsten aufgrund der im Faserlehm eingearbeiteten Stroh- und Hanffaser, Schimmelpilz entstehen kann (Wegerer 2010:80). Bei der zweiten von insgesamt drei Putzschichten wurde im Referenzprojekt zusätzlich ein Armierungsgewebe in den Lehm eingearbeitet (Wegerer 2010:79). Auf den Lehmputz wurde anschließend eine diffusionsoffene Kaseinfarbe aufgetragen (Wegerer 2010:80).

Die dreijährige Bemessungen haben zudem gezeigt, dass das Nutzerverhalten einen erheblichen Einfluss auf die hygrothermischen Prozesse in der wärme gedämmten Wandkonstruktion hat (Wegerer 2010:87). Eine besondere Bedeutung nimmt ein adäquates Lüftungsverhalten ein, ohne das ein Risiko von Schimmelpilzbildung ansteigt (Wegerer 2010:106). In Simulationen mittels Software wurde festgestellt, dass sich das Risiko einer Schimmelpilzbildung auch bei einer Dämmstärke von 12 cm nicht wesentlich erhöht. Dies könnte auf den wirksamen Verbund der

diffusionsoffenen Schilfplatte mit dem kapillaraktivem Lehmputz zurückzuführen sein. Die Feuchtepufferung aufgrund der Sorption des Lehmputzes kann auch noch dazu beitragen, dass sich keine Feuchtigkeit ansammelt (Wegerer 2010:109). Auf der Grundlage der ermittelten Daten kann dementsprechend festgehalten werden, dass Schilfdämmplatten ein potentieller Baustoff für die schadensfreie Dämmung gründerzeitlichen Ziegelmauerwerken darstellen. Durch Schilfplatten könnte eine gute Dämmwirkung erreicht werden, da laut den Simulationen zumindest theoretisch auch größere Dämmstärken möglich sind.

5.1.3 Altbau in Duisburg Hochfeld



Abb. 22: Gründerzeithaus in Duisburg Hochfeld
Quelle: FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018

Das dritte Beispielprojekt ist ein Gründerzeithaus aus dem Baujahr 1911 (FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018). Im Zuge einer Kernsanierung in den Jahren 2009/2010 wurde an die Außenwand eine Innendämmung angebracht. Durch die südliche Ausrichtung der zu dämmenden Außenwand (Abb. 22) wirkt die Sonneneinstrahlung in den kalten Monaten auf das Mauerwerk ein. Diese kann genutzt werden, um den Wärmedurchgang möglichst gering zu halten. Die Fensterlaibungen wurden abgeschrägt mit dem Ziel, den Lichteinfall durch die Sanierungsmaßnahmen nicht zu reduzieren (Röhlen 2016:313).

Als Dämmstoff wurden HFD-Platten verwendet, die mittels Lehmkleber und zusätzlichen Dübeln einen Verbund mit der Außenwand herstellen. Zusätzlich wurde eine Wandheizung verwendet, damit die Verwendung eines Heizkörpers entfällt und mehr nutzbare Wohnfläche verbleibt (Röhlen 2016:314). Die Wandheizung wurde in einen Lehm-Unterputz eingearbeitet, armiert und anschließend mit einem weißen Lehm-Designputz überzogen (Abb. 23) (FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018).



Abb. 23: Einputzen der Wandflächenheizung
Quelle: FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018

Für die Sanierung des Gebäudes wurden Dämmstärken von 40 oder 60 mm als eignend eingestuft. In den Bereichen mit dünneren Außenwänden, wurden 80 mm dicke Dämmplatten verwendet (Röhlen 2016:314). Durch die Sanierungsmaßnahmen konnte der Energieverbrauch maßgeblich reduziert werden. Die Wandoberflächen sind aufgrund der Innendämmung und der Wandheizung warm, somit kann die Raumtemperatur im Vergleich zu ungedämmten Gebäuden mindestens 2°C niedriger gehalten werden, ohne dass an Behaglichkeit eingebüßt werden muss. Durch den Verbund der diffusionsoffenen HFD-Platten und dem sorptionsfähigen Lehmputz kommt es auch bei einem unzureichenden Luftaustausch nicht zu Feuchtigkeitsschäden. Innerhalb der Nutzungsdauer von fünf Jahren wurden im Referenzprojekt keine Schäden festgestellt (Röhlen 2016:315). Das Projekt hat gezeigt, dass eine Innendämmung durch eine Kombination von HFD-Platten, Wandheizung und Lehmputz, sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll sein kann (FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018).

5.1.4 Umbau einer Scheune in Offenbach

Das vierte, und für die Diskussion über die Verwendung von Lehmbaustoffen zur energetischen Altbausanierung möglicherweise relevanteste, Referenzprojekt ist der *Umbau einer Scheune in Offenbach* von den Architekten Ute Schauer und Franz Volhard. Für die Dämmung von Ziegelmauerwerken lassen sich Lehmbaustoffe unterschiedlich einsetzen. So können bspw. Innenschalen aus feucht eingebautem Leichtlehm (Kapitel 4.4) und Innenschalen aus Leichtlehm-mauerwerk (Kapitel 4.5) eingesetzt werden. Bei beiden Konstruktionen besteht die Innenschale aus Leichtlehm und ermöglicht die Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand. Vor dem Hintergrund der spärlichen Datenlage zur Umsetzung der Innendämmung mit Lehmbaustoffen an Außenwänden aus Ziegelmauerwerk stellt der *Umbau einer Scheune in Offenbach* ein besonders interessantes und für die vorliegende Arbeit relevantes Referenzobjekt dar. Entlang dieses Beispiels kann analysiert werden, wie die Errichtung einer Leichtlehmschale umgesetzt werden kann.

Die Außenwände der Scheune bestehen aus einem Ziegelmauerwerk, das durch eine Innendämmung in Form einer Leichtlehmschalung saniert wurde. Durch diese Sanierungsmaßnahme konnte die Fassade ihre ursprüngliche Struktur beibehalten. Bei der Sanierung wurde eine 16 cm starke Innenschale aus Strohleichtlehm an die bestehende Außenwand aus Ziegelmauerwerk befestigt (Abb. 24). Die 24 cm dicke Ziegelwand wurde an der Innenseite durch eine Holzkonstruktion verstärkt und mit Leichtlehm ausgefacht. Die Leichtlehmschale wurde mit Kalkfeinputz auf einem Lehmunterputz verputzt. Um keinen Lichteinfall zu verlieren, haben die Fenster eine schräge Laibung erhalten (Vollhard 2016:244; Schauer & Volhard 1997:892).

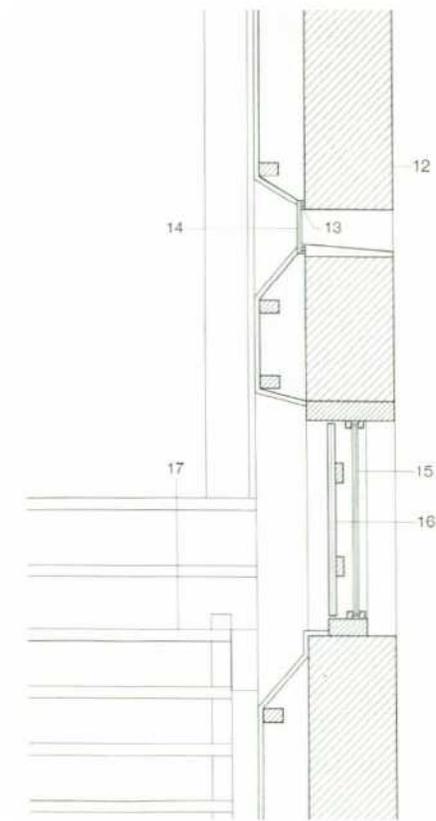


Abb. 24: Querschnitt durch Ziegelmauerwerk mit Leichtlehmschale
12: Ziegelwand 24cm; Leichtlehm Wärmedämmung 14cm; Lehm-Unterputz; Kalkinnenputz, 13: Silikonstrang, 14: Einfachverglasung, 15: Isolierverglasung, 16: Holzklappladen, 17: Scheunentreppe
Quelle: Schauer & Volhard 1997:895

Bei dem von Ute Schauer und Franz Volhard saniertem Gebäude handelt es sich zwar um eine Scheune, die sich u.a. aufgrund größerer Wandstärken von großen Wohnhäusern unterscheidet. Nichtsdestotrotz lassen sich aufgrund der Materialität der Außenwände Parallelen zu Gründerzeitbauten herstellen. Die Einbaustärke der Leichtlehmschale beträgt 16 cm, was dementsprechend grundsätzlich mit den Empfehlungen von Röhlen & Ziegert (2020) und Schroeder (2019) übereinstimmt. Laut Röhlen & Ziegert (2020) sollte die Einbaustärke der Leichtlehmschale nämlich ≤ 15 cm betragen, falls der Leichtlehm nur raumseitig austrocknen kann. Verfügt das Ziegelmauer über eine Rohdichte $\leq 1600 \text{ kg/m}^3$, oder sonstigen kapillar leitfähigen Baustoffen, ist eine Stärke ≤ 20 cm zulässig (Röhlen & Ziegert 2020:167). Auch Schroeder (2019) zufolge sollte die Schalenstärke auf 15 cm begrenzt werden. Nur wenn die zu dämmende Außenwand aus einem diffusionsoffenen und kapillar gut leitfähigem Baustoff besteht, wie bspw. Ziegel, kann die Schalung auf maximal 20 cm erhöht werden (Schroeder 2019:514). Aufgrund der Ziegelaußenmauer können die Leichtlehmschalen theoretisch bis zu maximal 20 cm betragen, es gilt jedoch

besonders bei Gründerzeitbauten die Dimensionierung der Leichtlehmschale an die Außenwand anzupassen, um den historischen Baubestand zu schützen. Leichtlehmschale können demnach auch in der Baupraxis zur Dämmung von Ziegelmauerwerk eingesetzt werden, auch wenn mit dieser Konstruktion im Gegensatz zu der Verwendung von Dämmplatten größere Dämmstärken einhergehen.

5.1.5 Dachausbau Wien

Im Verlaufe dieser Arbeit wurde sich nur sehr wenig mit der Thematik der Dachausbauten von Gründerzeitbauten beschäftigt, dennoch ist dieses Referenzprojekt von Relevanz, da der Dachausbau im Zuge einer Sanierung in Wien eine entscheidende Rolle spielt. Das *Fünfhaus* vom Architekten Andreas Breuss in ein im Jahr 2014 fertiggestellter Dachausbau in Wien (Abb. 25). Beim Dachausbau wurde besonderen Wert auf die Berücksichtigung des gründerzeitlichen Baubestandes und auf eine möglichst ökologische Bauweise gelegt. Es wurde ebenfalls darauf geachtet, die bestehende Infrastruktur zu respektieren, indem der Lichteinfall der darunterliegenden Wohnungen und der Höfen möglichst wenig durch den Dachaufbau beeinflusst wird (Breuss 2014).



Abb. 25: Dachausbau *Fünfhaus* Wien
Quelle: Breuss 2014

Der Dachausbau wurde in einer Holz-Lehm-Bauweise errichtet. Diese Bauweise eignet sich besonders aufgrund ihrer großen Speichermasse für einen Dachausbau (Gruber 2017:32). Ein

Dachausbau ausschließlich in Holzbauweise ist in Wien jedoch eher ungewöhnlich, da bei den meisten Bauvorhaben eine Stahlkonstruktion zum Einsatz kommt. Die Holzbauweise erlaubt im Gegensatz zur Stahlkonstruktion einen schnelleren Arbeitsfortschritt, was dem Architekten Andreas Breuss erlaubte binnen kurzer Zeit das Dach regendicht zu machen, wodurch auf jegliche bituminöse Abdichtungen verzichtet werden konnte (Gruber 2017:33f.).



Abb. 26: Befestigung der Schilfplatten an der Holzschalung
Quelle: Breuss 2014

Für die Dämmung des Daches wurden 30 cm dicke Holzfaserdämmplatten verwendet, die nicht nur wärmedämmend wirken, sondern – ebenfalls wie in Kapitel 4.2.1 erwähnt – der sommerlichen Überhitzung entgegenwirken können. Die Trennwände der Wohnung bestehen aus einer Holzständerkonstruktion die mit Schilf und Lehm ausgefacht wurden (Abb. 26) (Gruber 2017:34). Beim Wandaufbau werden die Schilfplatten an die Holzschalung befestigt und dienen als Trägermaterial für zwei Schichten Lehmputz, in die eine Wandheizung eingearbeitet wurde. Anschließend wurde auf die zwei ersten Lehmputzschichten eine weitere Lehmputzschicht aufgetragen, die als luftdichte Ebene dient (Gruber 2017:35). Der Lehmputz ist besonders hinsichtlich der in Kapitel 4.2.3 und 4.7 beschriebenen Fähigkeit zur Feuchtaufnahme und -abgabe von Vorteil. Das Projekt von Breuss zeigt, wie Lehmbaustoffe im Dachgeschossaufbau eingesetzt werden können und wie gleichzeitig die immer relevanter werdende Thematik der sommerlichen Überhitzung behandelt werden kann.

5.2 Vergleich von Lehmbaustoffen und konventionellen Baustoffen zur Sanierung

Damit Innendämmungen aus Lehmbaustoffen und aus konventionellen Dämmstoffen aussagekräftig und auf differenzierter Weise verglichen werden können, muss zuerst ein spezifischer Referenzpunkt festgelegt werden. Es muss also zunächst definiert werden, in welcher Hinsicht die Baustoffe verglichen gehören. Die Unterschiede, die im Verlauf dieser Arbeit festgehalten wurden, befassen sich überwiegend mit den Eigenschaften bauphysikalischer und ökologischer Natur. Im folgenden Abschnitt werden zuerst die Lehmbaustoffe im Einsatz zur Innendämmung hinsichtlich der ökologischen Bewertung den konventionellen Dämmstoffen gegenübergestellt. Unter den konventionellen Dämmstoffen werden Baustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften und Einsatzbereichen aufgelistet, die nach dem derzeitigen Stand der Technik verwendet werden. In einem weiteren Schritt werden jene bauphysikalischen Eigenschaften aufgelistet, durch welche sich Lehmbaustoffe von konventionellen Dämmstoffen unterscheiden.

5.2.1 Vergleich bezüglich ökologischer Eigenschaften

Um die Nachhaltigkeit von Sanierungsmaßnahmen (Kapitel 3.1.5) beurteilen zu können, müssen bei Bauvorhaben laut Hegger u.a. (2007) sowohl ökonomische, ökologische als auch gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden (Hegger u. a. 2007:190). Auch wenn mehrere Parameter betrachtet werden müssen, um die Nachhaltigkeit eines Bauvorhabens beurteilen zu können, steht laut Schroeder (2019) eine nachhaltige Bauweise in direktem Zusammenhang mit der Verwendung ökologischer Baustoffe. Mitunter ein Aspekt der im Zuge einer nachhaltigen Bauweise respektiert werden muss, ist der niedrige Energieaufwand bei der Gewinnung der Rohstoffe und Herstellung der Bauteile (Schroeder 2019:24). Ein rein quantitativer, also numerischer Vergleich zeigt einen deutlich geringeren Komplexitätsgrad auf als ein qualitativer Vergleich, indem ebenso soziologische Dimensionen berücksichtigt werden. Ohne also die soziale Dimension zu verkennen und ohne eine Komplexitätsreduktion provozieren zu wollen, konzentriert sich der vorliegende Abschnitt auf den Primärenergieaufwand, die Bewertung nach *O13 Index* (Kapitel 3.1.6) und die Entsorgung einiger Baustoffe.

Wie bereits in Kapitel 3.6.2 erwähnt, berücksichtigt der *O13 Index* mehrere Öko-Indikatoren zur Beurteilung der Ökobilanz von Baustoffen. Beim PENERT handelt es sich um den gesamten Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, sowohl als Energieträger als auch als Rohstoff (Abb. 27) (Hauer 2020:125). Wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt, haben natürliche Baustoffe wie Lehm grundsätzlich im Vergleich zu industrialisierten Baustoffen einen niedrigen Primärenergieinhalt (PEI). Greift man demnach bei einer Gebäudesanierung auf Lehmbaustoffen zurück, kann der PEI-Wert der Konstruktion möglichst gering ausfallen. Eine Leichtlehmausfachung hat einen PEI von 11 kWh/m³. Durch mineralische Zuschläge, wie bspw. Blähton, kann der PEI von Leichtlehm erhöht werden, da Blähton einen PEI von 300 kWh/m³ aufweist (Minke 2017:38). Auch bezüglich des Globalen Erwärmungspotentials (GWP) und des Versauerungspotentials (AP) stellt Lehm kein große Belastung für die Umwelt dar (Hauer 2020:128).

Baustoff	PENERT [MJ/kg]	GWP Summe 100 [kg CO ₂ equ./kg]
Holzwohle-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
Strohdämmung	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

Abb. 27: Öko-Indikatoren von Dämmstoffen
Quelle: Hauer 2020: 59

Oftmals werden für Sanierungen Dämmstoffe wie expandiertes Polystyrol (EPS), extrudiertes Polystyrol (XPS) oder Schaumglas verwendet. Die nicht erneuerbare Primärenergie von EPS bei einer Dämmstärke von 120 mm beträgt 142 kWh/m², die von XPS 113 kWh/m² und die von Schaumglas 286 kWh/m³. Der PEI der aufgelisteten Baustoffe beinhaltet sowohl die Dämmstoffplatten als auch deren Befestigung an der Wandoberfläche (Hegger u. a. 2007:263). Demnach ist der PEI

dieser Dämmstoffe wesentlich höher als der einer Leichtlehmausfachung. Im gleichen Kontext muss jedoch erwähnt werden, dass Dämmstoffe über den ganzen Lebenszyklus betrachtet werden müssen (Hegger u. a. 2007:152). Dem PEI sollte bezüglich der Beurteilung von Dämmmaterialien keine zu große Relevanz beigemessen werden, da auch Dämmstoffe, die bei der Herstellung viel Energie benötigen und sich bereits nach kurzer Zeit energetisch amortisieren. Wie genau die Amortisation für Dämmstoffe ausfällt, ist abhängig von dem U-Wert der zu dämmenden Wand (Sprengard 2016b:88).

Neben den Leichtlehmschalen stellen angemörtelte Dämmplatten (Kapitel 4.6) eine Dämmmethode dar, die den Einsatz von Lehmbaustoffe ermöglichen. Wie bereits erwähnt, können Dämmstoffe wie Kalziumsilikatplatten oder HFD- Platten verwendet werden, um eine gute Dämmwirkung bei einem möglichst geringem Raumverlust zu erhalten. Der nicht erneuerbare Primärenergieanteil unterscheidet sich je nach Dämmstoff. Grundsätzlich brauchen Lehmbaustoffe weniger Energie, um hergestellt zu werden und sind zudem keine erdölbasierenden Baustoffe. Um jedoch die Ökologie des verwendeten Dämmsystems über die gesamte Lebensdauer zu bewerten, braucht es eine Lebenszyklusanalyse (Kapitel 3.1.6). Wie bereits in Kapitel 3.1.6 beschrieben, kann durch ein ökologisches Bewertungssystem berechnet werden, inwiefern Lehm tatsächlich einen ökologischen Vorteil gegenüber anderen Baustoffen hat. Ein solches Berechnungsverfahren ist bspw. der *O13 Index*. Hierbei handelt es sich um eine quantitative Methode der Ökobilanzierung, die Baustoffe, Konstruktionen und Gebäude anhand einer Punktezah bewertet, wobei eine höhere Punktezah für eine größere Einwirkung auf die Umwelt steht (Abb. 28) (Hauer 2020:130).

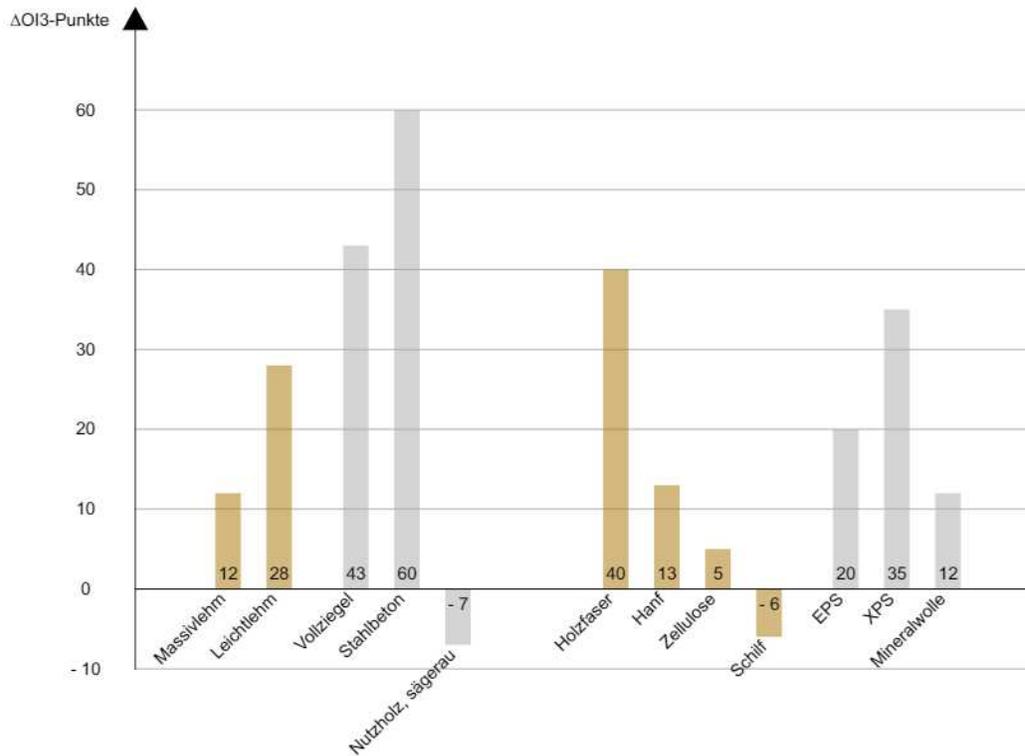


Abb. 28: Δ OI3-Punktebewertung einiger Baustoffe (d = 20cm)
Quelle: Hauer 2020: 136

Bemerkenswert ist, dass ebenfalls Dämmstoffe die grundsätzlich als ökologische Baustoffe eingeschätzt werden in diesem Bewertungsverfahren mit einer hohen Punktzahl versehen werden. Exemplarisch kann an dieser Stelle auf Holzfaserplatten verwiesen werden, diese weisen zwar einen geringen GWP- jedoch einen verhältnismäßig hohen PENRT auf (Abb. 27). Schilfrohrplatten haben eine wesentlich günstigere ökologische Bewertung als Holzfaserplatten. Bei gleicher Dämmstärke wird Holzfaser laut OI3 Index mit 40 Punkte bewertet, Schilf hingegen mit einem Negativwert von -6 (Abb. 28) (Hauer 2020:136).

Der *OI3 Index* berücksichtigt ebenfalls den *Entsorgungsindikator EI*, ein Bewertungsverfahren das die Entsorgung von Baustoffen hinsichtlich ökologischer Kriterien berücksichtigt (Hauer 2020:124). Der Entsorgungsindikator bewertet Baustoffe, Konstruktionen und Bauwerke hinsichtlich des derzeit vorherrschenden Entsorgungsweges sowie auch hinsichtlich des Verwertungspotentials, das durch eine Verbesserung der derzeitigen Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt des Abbruchs möglich wäre. Bewertet wird durch eine Punktzahl von 1 bis 5, wobei eine niedrige

Punktzahl mit einem hohen Recyclingpotential einhergeht (Hauer 2020:160). Grundsätzlich haben Lehmbaustoffe einen weniger problematischem Entsorgungsprozess als synthetische Baustoffe. Die oftmals erdölbasierende Baustoffe können zusätzlich aufgrund eines untrennbaren Materialverbunds nicht problemlos entsorgt werden (Schroeder 2019:25).

<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

Abb. 29: *Entsorgungsindikator EI* von verschiedenen Baustoffen
 Quelle: Hauer 2020: 162

Der oftmals verwendete EPS-Dämmstoff wird in der Entsorgungseinstufung mit der Note 5 definiert (Abb. 29). Der vorhin bereits genannte und grundsätzlich als ökologisch wahrgenommene Holzfaser ermöglicht keinen ökologisch-optionalen Entsorgungsprozess und wird mit Note 4 bewertet (Hauer 2020:162). Als Vergleich kann bspw. auf Schilf verwiesen werden, der mit der Note 3 für die Entsorgungseinstufung und mit der Note 2 für den Verwertungspotential besser als andere Dämmstoffe abschneidet (Abb. 28).

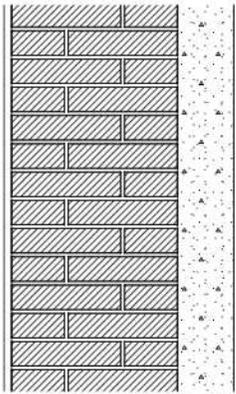
Lehm schneidet sowohl in der Entsorgungseinstufung als auch hinsichtlich seines Verwertungspotentials gut ab (Hauer 2020:162). Zudem können die Dämmplatten, die durch einen Lehmmörtel an die zu dämmende Wand befestigt werden, dadurch dass Lehm nicht chemisch abbindet, zu einem späteren Zeitpunkt wieder problemlos entfernt werden (Hauer 2020:123). Demnach kann festhalten werden, dass sich die Verwendung von Lehmbaustoffe grundsätzlich positiv auf die

ökologische Bewertung von Dämmsystemen auswirkt. Bevor allerdings Sanierungsmaßnahmen ausgewählt werden können, die besonders ökologisch sind, braucht es projektspezifische Lebenszyklusanalysen. Diese Bewertungen von Baumaterialien sollten bereits früh in den Planungsprozess integriert werden um eine möglichst optimale Lösung hinsichtlich der Ökologie zu erhalten und ungeeignete Baumaterialien zu vermeiden (Hauer 2020:158).

5.2.2 Vergleich bezüglich bauphysikalischer Eigenschaften

Werden Lehmbaustoffe mit konventionellen Baustoffen verglichen, müssen zweitens die Unterschiede bezüglich deren bauphysikalischer Eigenschaften erwähnt werden. Ein Vorteil der innen-dämmenden Leichtlehmschale ist die Kombination dessen Wärmedämm- und Wärmespeichereigenschaften (Kapitel 4.2.1), die bei sonstigen Dämmstoffen nur schwer vorzufinden sind. Die meisten Dämmstoffe haben eine gute Dämmwirkung, können jedoch schlecht Wärme speichern. Holzfaserplatten sind ebenfalls ein Baustoffe mit einer guten Dämm- und Speicherwirkung und eignet sich wie im Kapitel 4.6 beschrieben um einen Verbunds mit Lehmbaustoffen herzustellen (Hegger u. a. 2007:159). Um zu veranschaulichen wie sich der Wandaufbau solcher Innendämmsysteme zusammensetzt, werden anschließend eine Innenschale aus feucht eingebautem Leichtlehm, Innenschale aus Leichtlehm-mauerwerk und eine Innendämmung durch angemörtelte Dämmplatten dargestellt (Abb. 30-32). Anhand der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialschichten konnte der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der gesamten Wandkonstruktion berechnet werden. Die Werte wurden aus der MASEA-Datenbank entnommen, einer Materialdatensammlung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik. Als Außenputz wurden die Werte eines Kalkputzes verwendet. Dieser hat eine Wärmeleitfähigkeit von $0,70 \text{ W/mK}$. Für die Bestandswand wurde die Wärmeleitfähigkeit eines einschaligen Ziegel-mauerwerks mit einer Rohdichte von 1800 kg/m^3 verwendet. Das Ziegel-mauerwerk weist eine Wärmeleitfähigkeit von $0,70 \text{ W/mK}$ auf. Die Außenwand wurde exemplarisch mit 44 cm dimensioniert. Die unteren Geschosse von Gründerzeitbauten können jedoch größere Wandstärken aufzeigen. In der Datenbank wurde für den Lehmputz eine Wärmeleitfähigkeit von $0,65 \text{ W/mK}$ und für den Lehm-mörtel von $0,58 \text{ W/mK}$ angegeben. Für die HFD-Platte wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W/mK}$ angenommen. Laut Röhlen und Ziegert (2020) hat Blähton-leichtlehm mit einer Rohdichte zwischen 600 und 700

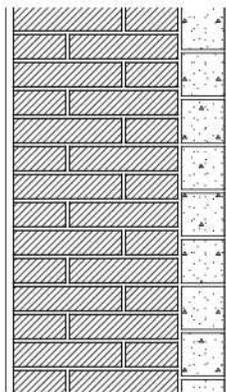
kg/m^3 eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,17 und 0,21 W/mK (Röhlen & Ziegert 2020:170). Laut Röhlen und Ziegert (2020) hat die gesamte Konstruktion der Innenschale aus Leichtlehm-mauerwerk eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,21 W/mK (Röhlen & Ziegert 2020:173).



Material	d [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Außenputz	0,020 m	0,70 W/mK
Mauerwerk	0,440 m	0,70 W/mK
Blähton-Leichtlehm	0,150 m	0,17 W/mK
Lehmputz	0,015 m	0,65 W/mK
U-Wert		0,577 W/m²K

Abb. 30: Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient einer Innenschale aus feucht eingebautem Leichtlehm

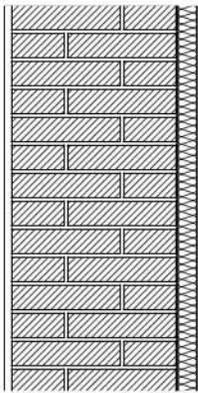
Auch wenn die heutigen Energiestandards mit der Innenschale aus Leichtlehm nicht erreicht werden, lässt sich der U-Wert der Außenwand dennoch halbieren. Bei dem berechneten Beispiel wurde der U-Wert des bestehenden Mauerwerks von 1,176 W/m²K auf 0,577 W/m²K reduziert (Abb.30).



Material	d [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Außenputz	0,020 m	0,70 W/mK
Mauerwerk	0,440 m	0,70 W/mK
Leichtlehm-Mauermörtel	0,010 m	0,21 W/mK
Leichtlehmsteine	0,115 m	0,21 W/mK
Lehmputz	0,015 m	0,65 W/mK
U-Wert		0,692 W/m²K

Abb. 31: Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient einer Innenschale aus Leichtlehm-mauerwerk

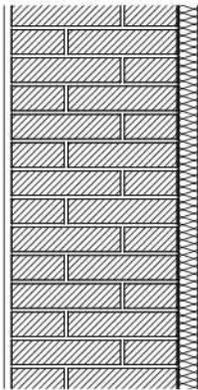
Durch eine Innenschale aus Leichtlehm-mauerwerk wurde der U-Wert der Bestandaußenwand 0,692 W/m²K verringert (Abb. 31).



Material	d [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Außenputz	0,020 m	0,70 W/mK
Mauerwerk	0,440 m	0,70 W/mK
Lehmklebe- und Armierungsmörtel	0,005 m	0,65 W/mK
HFD-Platte	0,050 m	0,04 W/mK
Lehmklebe- und Armierungsmörtel	0,003 m	0,65 W/mK
Lehmoberputz	0,005 m	0,65 W/mK
U-Wert		0,477 W/m²K

Abb. 32: Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient einer Innendämmung durch HFD-Platten

Die größte Verbesserung des U-Werts wurde mit einer angemörtelten Dämmplatte erreicht. Dieses Dämmsystem reduziert den berechneten U-Wert der Außenwand von 1,176 W/m²K auf 0,477 W/m²K (Abb.32). Ein weiterer Vorteil dieses Innendämmsystems ist die, im Vergleich zu den Leichtlehmschalen, geringe Dämmstärke.



Material	d [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Außenputz	0,020 m	0,70 W/mK
Mauerwerk	0,440 m	0,70 W/mK
Contact-Dämm-Mörtel	0,003 m	0,18 W/mK
Korkdämmlehm-Platte	0,050 m	0,05 W/mK
Lehmklebe- und Armierungsmörtel	0,003 m	0,65 W/mK
Lehmoberputz	0,005 m	0,65 W/mK
U-Wert		0,539 W/m²K

Abb. 33: Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient einer Innendämmung durch Korkdämmlehm-Platten

Eine ähnliche Dämmwirkung wie durch angemörtelte HDF-Platten kann ebenfalls durch Wärmedämmlehm-Platten erreicht werden. Durch Wärmedämmlehm-Platten wird der U-Wert der Außenwand auf 0,539 W/m²K reduziert (Abb.33). Wärmedämmlehm-Platten ermöglichen die Verwendung von Dämmplatten, ohne dass dabei auf die vorteilhaften Eigenschaften von Leichtlehm verzichtet werden muss. Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten wurden die technischen Daten von Korkdämmlehm-Platten, einer Weiterentwicklung der Wärmedämmlehm-Platten des Herstellers Cellco®, übernommen. Diese Platten verfügen über eine Rohdichte von 200 kg/m³, was wesentlich geringer ist als die einer feucht eingebrachten Leichtlehmschale.

Eine Innendämmung aus Lehmbaustoffen hat nicht nur eine wärmedämmende Wirkung, sondern gleicht ebenfalls aufgrund seiner wärmespeichernden Wirkung Temperaturschwankungen aus und reguliert das Raumklima. Für Innendämmungen scheinen Lehmbaustoffe dementsprechend geeignet, weil die Speichermasse des Baubestandes beibehalten bleibt.

Bei der Planung einer Innendämmung muss stets die damit einhergehende Tauwasser-Problematik berücksichtigt werden (Kapitel 3.1.2). Obwohl das Risiko der Tauwasserentstehung infolge einer Wärmebrücke durch einbindende Bauteile aufgrund der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit bei historischen Bauten zwar eher gering ist (Kapitel 4.2.6), erscheint die Verwendung von sorptionsfähigen Baustoffen wie Lehm dennoch vorteilhaft. Nicht nur sorgen solche Baustoffe für ein angenehmes Raumklima, sondern zudem wirken sie durch ihre Pufferwirkung einer kritisch hohen Raumluftfeuchtigkeit entgegen und vermeiden die Entstehung von Oberflächentauwasser (Röhlen & Ziegert 2020:164). Lehmbaustoffe eignen sich ebenfalls bei Bestandsgebäuden mit Holzbalkendecken, da Dämmsysteme aus Lehmbaustoffen einen geringen Dampfdiffusionswiderstand aufweisen und dadurch die vorhandene Baufeuchte weiterhin nach außen abgeführt wird (Giebeler u. a. 2008:122).

Grundsätzlich muss aufgrund der verwendeten Dämmstoffe eine Dampfsperre an der Innenseite angebracht werden um den Feuchtigkeitstransport vom Innenraum durch die Dämmebene hindurch entgegenzuwirken (Hegger u. a. 2007:88). Fehlerhaft angebrachte Dampfbremsen sind jedoch keine Seltenheit und führen dazu, dass die Feuchtigkeit ungehindert in die Dämmebene eindringt und dort nicht mehr austrocknen kann. Nicht nur verliert die Wärmedämmung dadurch ihre Dämmwirkung, zusätzlich entstehen Bauschäden. Laut Giebeler u. a. (2008) sollten daher Dämmstoffe verwendet werden, die ohne Dampfbremse auskommen (Giebeler u. a. 2008:124). Da Lehmbaustoffe Wasserdampf absorbieren und an die Raumluft abgeben können, benötigt es keine Dampfsperre. Auch andere saugfähige und kapillaraktive Dämmstoffe, wie bspw. Kalziumsilikatplatten, können ohne Dampfbremse verwendet werden (Maier 2011:250). An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass Leichtlehmschalen demnach viele Kriterien, die an Innendämmstoffe gerichtet sind, erfüllen. Zum einen bleibt die Konstruktion schadensfrei, zum anderen verbessert sich durch Lehm die zusätzliche Wärmedämmung und Wärmedämpfung die Behaglichkeit in den Räumlichkeiten.

5.3 Implikationen für die Sanierungspraxis mit Lehmbaustoffen

Nachdem die Einsatzbereiche von Lehmbaustoffen zur energetischen Sanierung in Kapitel 4 beschrieben wurden, rücken potentielle Implikationen für die Sanierungspraxis von Gründerzeitbauten in Wien in den Vordergrund der Aufmerksamkeit. Grundsätzlich eignen sich mehrere Innendämmkonstruktionen zur Dämmung von Altbauten, im Kontext von Wien sind jedoch einige der erläuterten Methoden besser umsetzbar als andere.

Einerseits können Leichtlehmschalen (Kapitel 4.4 und 4.5), bestehend aus Lehm und organischen oder mineralischen Zuschlägen zur Dämmung von Außenwänden zum Einsatz kommen. Besonders mineralische Leichtlehme sind in Bezug auf das Schwindverhalten und die Festigkeit des Baustoffs vorteilhaft. Auch besteht bei der Austrocknung, anders als beim Strohleichtlehm, keine Gefahr der Schimmelpilzbildung oder Verrottung (Minke 2017:53). Zusätzlich erreichen organische Leichtlehme bei Rohdichten unter 700 kg/m^3 nur eine unzureichende Festigkeit (Minke 2017:52). Diese geringen Rohdichten sind möglicherweise allerdings in einigen Fällen notwendig, weil anders keine ausreichende Wärmedämmung erreicht werden kann. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, führt die Verwendung von mineralischen im Gegensatz zu den organischen Zuschlägen zu einem Verlust an Wärmekapazität. Organische Stoffe besitzen trotz ihres geringen Gewichtes eine höhere spezifische Wärme als Lehmbaustoffe und können demnach die Wärmekapazität von Lehm erhöhen (Hegger u. a. 2007:158). Nichtsdestotrotz ist auch mineralischer Leichtlehm in Bezug auf seine wärmedämpfende Eigenschaft als vorteilhaft einzustufen. Durch die wärmedämpfenden Eigenschaften von Lehmbaustoffen wird die Speichermasse der Außenwand nicht von der Raumtemperatur getrennt und das Raumklima lässt sich optimieren. Konventionelle Dämmstoffe haben grundsätzlich bessere wärmedämmende Eigenschaften, verfügen jedoch nicht über die gleichen wärmespeichernde Eigenschaften (Volhard 2016:199). Neben vorteilhaften wärmedämpfenden Eigenschaften eignet sich Leichtlehm überdies im Kontext der Tauwasserproblematik (Kapitel 4.2.3) als Innendämmung. Mineralische Leichtlehme haben im Gegensatz zu den organischen Leichtlehm einen erhöhten Wasserdampfdiffusionswiderstand, wodurch das Risiko

der Tauwasserbildung wiederum reduziert wird, was bei einer schadensfreien Innendämmung einer historischen Außenwand von großer Wichtigkeit ist.

Durch die längere Trocknungsdauer von feuchten Lehmbauteilen entstehen im Vergleich zu herkömmlichen Innendämmsystemen längere Bauzeiten die wiederum in höheren Baukosten resultieren (Hauer 2020:169). Aufgrund aufwändiger Konstruktionen ist es schwierig die Lohnkosten gering zu halten und die Innendämmung wirtschaftlich vorteilhaft zu gestalten. Um die Errichtungsdauer zu minimieren und somit die Wirtschaftlichkeit zu optimieren, muss der Bauablauf möglichst genau geplant werden (Hauer 2020:169). Dies ist besonders relevant für Leichtlehmschalen, die eine längere Trocknungszeit voraussetzen. Einige Dämmsysteme brauchen länger um errichtet zu werden, wie bspw. Leichtlehm-mauerwerk, dessen maximale Bauhöhe auf 2 m pro Tag begrenzt ist (Röhlen & Ziegert 2020:174). Durch den Einsatz von Maschinen lässt sich der Arbeitsaufwand allerdings verringern. Mineralische Leichtlehme haben gegenüber organischen Leichtlehm den Vorteil, dass sie pumpfähig sind, wodurch sie schneller bearbeitbar und ökonomischer sind (Minke 2017:53). Dies könnte bei der Sanierung von Altbauten in Wien eine entscheidende Rolle spielen, da die Bauvorhaben durch die verkürzte Arbeitszeit wirtschaftlich lukrativer sind. Hierauf macht u.a. auch Minke (2017) aufmerksam der erwähnt, dass für die gewerbliche Ausführung der mineralische Leichtlehm aufgrund der Verarbeitbarkeit wirtschaftlicher ist. Zusätzlich kommt es bei mineralischen Zuschlägen nicht zur Schimmelbildung bei der Austrocknung, diese können auch bei geringen Rohdichten schädlingfrei verbleiben. Somit gelten die mineralischen Leichtlehme als risikoloser, wodurch sie für die gewerbliche Nutzung besser geeignet sind (Minke 2017:213). Es scheint demnach als seien mineralische Leichtlehme insbesondere auch hinsichtlich ihrer schnelleren Verarbeitung vorteilhafte Baumaterialien zur Dämmung von Gründerzeitbauten. Es ist im gleichen Kontext zu erwähnen, dass soweit möglich auf vorgefertigte Produkte zurückgegriffen werden sollte (Hauer 2020:171f.). Durch die Verwendung von vorgefertigten Lehmbauteilen, wie bspw. Leichtlehmsteine, wird die Bauzeit – und somit ebenfalls der Lohnkostenanteil – möglichst gering gehalten. Oft haben die Materialkosten erheblich weniger Einfluss auf die Preisgestaltung des Bauvorhabens als die mit dem Arbeitsaufwand verbundenen Lohnkosten (Hauer 2020:176). Bei der Planung steht demnach die Intention im Vordergrund, den Arbeitsaufwand möglichst gering zu halten, um folglich die Herstellungskosten zu minimieren.

Angelehnt an diese Überlegungen kann festgehalten werden, dass angemörtelte Dämmplatten (Kapitel 4.6) im Vergleich zu feucht eingebrachten Leichtlehmschalen die im Bauwesen konkurrenzfähigere Lösung darstellen. Der zentrale Grund hierfür sind die fertigen Bauteile, die keine lange Trocknungszeiten benötigen und somit viel Zeit einsparen. Im Vergleich zu den Leichtlehmschalen verfügen die Dämmplatten aufgrund ihrer guten Dämmwirkung über geringe Schichtstärken, was wiederum zu einem geringen Raumflächenverlust führt (Claytec 2020:3). Die Dämmplatten, die aus einem organischen oder mineralischem Material bestehen, eignen sich aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften für die Herstellung eines Verbunds mit Lehmbaustoffen (Röhlen & Ziegert 2020:175). Als Dämmmaterial können Mineralschaumdämmplatten, Kalziumsilikatplatten, Schilfrohrplatten, Holzfaserdämmplatten (HFD-Platten) und Holzwolle-Platten (HW-Platten) verwendet werden. Besonders Kalziumsilikatplatten sind aufgrund ihrer Saugfähigkeit und Kapillarität insofern geeignet für Innendämmungen, als dass sie ausfallendem Tauwasser entgegenwirken. Durch die Verwendung von Kalziumsilikatplatten kommt es nicht zur Schimmelbildung zwischen der Dämmebene und der Außenwand (Maier 2011:250). Hegger u. a. (2007) weisen darauf hin, dass aufgrund der Eigenschaft von Kalziumsilikatplatten, Wasserdampf aufzunehmen und dieses wieder zu einem späteren Zeitpunkt abzugeben, auf eine Dampfsperre verzichtet werden kann (Hegger u. a. 2007:88). Ein weiterer Vorteil der Platten ist die schnelle und einfache Verarbeitung (Gänßmantel 2016a:141). Dies ist besonders von Vorteil, wenn man die Verarbeitung der Kalziumsilikatplatten mit der aufwändigen Herstellung von Leichtlehmschalen vergleicht. Die HFD-Platten haben den Vorteil, dass sie neben den Dämmeigenschaften auch gute Speichereigenschaften aufweisen (Hegger u. a. 2007:159). Sie dürfen jedoch im Gegensatz zu den Kalziumsilikatplatten nicht durch Feuchtigkeit belastet werden. Angemörtelte Dämmplatten stellen besonders im Kontext von Gründerzeitbauten in Wien eine gute Dämmmethode dar. Durch die geringen Dämmstärken geht weniger nutzbare Raumfläche verloren, was besonders in Großstädten mit hohen Quadratmeterpreisen relevant ist. Durch die Dämmplatten werden einige der Vorteile von Lehmbaustoffen verloren, andere Eigenschaften werden jedoch durch die Verwendung von Lehmörtel und Lehmputz (Kapitel 4.7) erhalten. Es können ebenfalls Wärmedämmlehm-Platten als Dämmstoff verwendet werden. Durch Leichtlehm kann eine Dämmwirkung erzielt werden, ohne dass lange Trocknungszeiten entstehen. Leichtlehmkonstruktionen

ermöglichen also eine schnelle Verarbeitung (Gänßmantel 2016c:148). Wie bereits in Kapitel 5.2.2 dargestellt, kann durch Wärmedämmlehm-Platten auch bei geringen Dämmstärken eine gute Dämmwirkung erreicht werden.

Über den Verputz von Dämmplatten und Leichtlehmschalen hinaus, eignet sich Lehmputz ebenfalls als Opferputz zur Salzreduktion (Kapitel 4.7.2). Grundsätzlich sind Trockenlegungsmaßnahmen bei gründerzeitlichen Gebäuden aufgrund des uneinheitlich Mauerwerks nur schwer umsetzbar (Giebeler u. a. 2008:135). Auch wenn die Trockenlegung technisch ausführbar ist, sollten Gründerzeitkeller dennoch nicht trockengelegt werden, da das Mauerwerk durch die Abdichtungsmaßnahmen beschädigt werden kann (Giebeler u. a. 2008:135). Wurden keine Trockenlegungsmaßnahmen durchgeführt, die den Feuchtetransport und die damit einhergehende Salzbelastung unterbinden, stellt das Auftragen einer Opferputzes nur eine kurzfristige Lösung dar. Es muss demnach abhängig vom Baubestand abgewogen werden, ob es sich lohnt einen Lehmputz aufzutragen, damit für einen Zeitraum von drei bis zehn Jahren keine Ausblühungen erkennbar sind (Röhlen & Ziegert 2020:328).

Hinsichtlich der Materialkosten setzt sich das Dämmsystem der angemörtelten Dämmplatten aus dem Dämmstoff sowie aus Lehmputz und Lehmmörtel zusammen. Lehmputze und Lehmmörtel sind hinsichtlich der Materialkosten deutlich günstiger als Kalkputze und -mörtel, die auf den Liter berechnet etwas mehr als das Doppelte kosten. Trotz dem niedrigen Rohstoffpreises und der einfachen Verarbeitung führt die lange Trocknungszeit von Lehmputz zu erhöhten Kosten (Hauer 2020:175). Die Trocknungszeit muss – wie bereits erwähnt – aus Kostengründen in den Bauablauf einkalkuliert werden. Zusätzlich kann der Putzauftrag durch die Verwendung von Trockenputzplatten auf mehrere Millimeter reduziert werden, was wiederum die Trocknungszeiten minimiert und somit ebenfalls die Kosten senkt (Hauer 2020:175). Die Gesamtkosten eines Bauteils können ebenfalls über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, wobei ebenfalls die Langlebigkeit der Baustoffe und die Sanierungszyklen eine Rolle spielen. Lehmbaustoffe müssen aufgrund ihrer langen Lebensdauer im Gegensatz zu anderen Baumaterialien deutlich weniger Sanierungszyklen durchlaufen, was wiederum die Instandhaltungskosten geringhält. In aktuellen Kostenberechnungen wird dieser Faktor jedoch kaum berücksichtigt. Auch zukünftige Entsorgungskosten werden

bei den Kostenberechnungen kaum berücksichtigt. Dies erscheint besonders fatal, weil die Entsorgung problematischer Baustoffe und untrennbarer Verbundsysteme eine zentrale Herausforderung für zukünftige Zeiten darstellt. Für Lehmprodukte werden die Entsorgungskosten wohl auch in Zukunft sehr gering bleiben (Hauer 2020:176).

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der jeweiligen Vor- und Nachteile der beschriebenen Dämmsysteme, dient die folgende grobe und plakative Tabelle (Abb. 33).

	Dämmwirkung	Speicherwirkung	Raumverlust	Arbeitsaufwand	Bauschäden Risiko	Umweltbelastung	Kosten
Innenschale aus feucht eingebautem Leichtlehm / aus Leichtlehm-mauerwerk							
Organischer Leichtlehm	gering	hoch	hoch	hoch	hoch	gering	hoch
Mineralischer Leichtlehm	gering	mäßig	hoch	mäßig	gering	mäßig	mäßig
Angemörtelte Dämmplatten							
Kalziumsilikatplatten	hoch	gering	gering	gering	gering	gering	gering
HFD-Platten	hoch	hoch	gering	gering	mäßig	hoch	gering
Schilfrohrplatten	hoch	hoch	gering	gering	mäßig	gering	gering
Wärmedämmlehm-Platten	hoch	hoch	gering	gering	mäßig	gering	gering

Abb. 34: Gegenüberstellung von Innendämmsystemen

Es muss hervorgehoben werden, dass für die Sanierungspraxis die Berechnung des Feuchte-schutznachweises notwendig ist. Berechnungen nach Glaser-Verfahren würden ergeben, dass die Dämmkonstruktionen aufgrund der errechneten Bauteilfeuchte unzulässig sind. Die berechneten Werte würden jedoch über den tatsächlichen Werten liegen, da es Softwareprogramme zur hygrothermischen Bauteilsimulation braucht um die tatsächlichen Feuchtebelastung zu ermitteln (Weller u. a. 2012:195). Nur durch diese Simulation kann die für die Austrocknung relevante kapillare Feuchteleitung berücksichtigt werden (Weller u. a. 2012:203). Wie bereits in Kapitel 4.2.4 erwähnt, kann durch Programme wie DELPHIN und WUFI berechnet werden, ob die Feuchtebelastung der Dämmkonstruktion nicht zu hoch ist und ob die Dämmung nach DIN 4108-3 zulässig

ist. Diese Berechnungen sind jedoch sowohl von der geographischen Lage des Gebäudes als auch von bauphysikalischen Bedingungen des Baubestandes abhängig. Die Dämmsysteme müssen demnach an den bauphysikalischen Bedingungen des zu dämmenden Gebäudes angepasst werden (Röhlen & Ziegert 2020:160).

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Betrachtet man den derzeitigen Baubestand in Wien, wird ersichtlich, dass die Gründerzeitbauten das Stadtbild Wiens maßgeblich prägen. In Wien wurden fast ein Drittel der Wohnungen vor 1919 erbaut (STATISTIK AUSTRIA 2013:32). Aufgrund der niedrigen Sanierungsrate kann man davon ausgehen, dass die energetische Sanierung eines Gründerzeithauses derzeit die Ausnahme darstellt. Im Zuge von thermischen Sanierungen werden meist synthetische Baustoffe eingesetzt, die mit einem hohen Energieaufwand bei der Herstellung einhergehen und problematisch bei dessen Entsorgung sind (Schroeder 2019:25). Ausgehend von der Problemdarstellung, dass es einerseits in Wien ein großes Sanierungspotential des Baubestandes gibt und andererseits die konventionellen Dämmsysteme problematisch hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit sind, wurde die Einsatzmöglichkeiten von Lehmstoffen zur thermischen Sanierung von Gründerzeitbauten erläutert.

Um den Einsatz von Lehmstoffen zur energetischen Sanierung von Gründerzeitbauten thematisieren zu können, muss sowohl der historische und architektonische Kontext als auch die aktuelle Sanierungspraxis berücksichtigt werden. Erst nachdem ein Überblick von aktuellen Sanierungsmaßnahmen im Kontext von Gründerzeitbauten verschaffen wurde, können diese auf den Einsatz von Lehmstoffen übertragen werden. Auch wenn die derzeitige Datenlage zur Altbau- sanierung mit Lehmstoffen es nicht erlaubt, in Bezug auf Gründerzeitbauten endgültige Schlüsse zu ziehen, lässt sich dennoch das Potential im Einsatz von Lehmstoffen erkennen. Auch wenn die Verwendung von Lehmstoffen im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen bei gleicher Dämmstärke grundsätzlich in einer geringeren Wärmedämmung resultiert, bieten Lehmstoffe mehrere Vorteile in Bezug auf die bauphysikalischen Problemstellungen einer Innendämmung. Einerseits bieten Lehmkonstruktionen einen Lösungsansatz für die thermische Entkoppelung, die mit einem konventionellen Dämmsystem einhergeht. Lehmstoffe erhalten die Speichereigenschaft des Mauerwerks und können somit den sommerlichen Wärmeschutz verbessern und das Raumklima regulieren. Lehmstoffe können ebenfalls die Problematik des Tauwasserausfalls entschärfen. Zur Anfertigung einer Leichtlehmschale können sowohl mineralische als auch

organische Leichtlehme verwendet werden. Mineralische Leichtlehme sind im Vergleich zu den organischen Leichtlehme vorteilhaft bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit, was besonders in Hinblick auf eine möglichst ökonomische Sanierung und eine gewerbliche Nutzung des Baustoffs von Bedeutung ist (Minke 2017:213).

In Bezug auf eine möglichst wirtschaftliche Innendämmung scheint jedoch die Verwendung von angemörtelten Dämmplatten den besten Lösungsansatz darzustellen. Die Platten können im Vergleich zu den Leichtlehmschalen ohne Schalung und lange Trocknungszeiten an der Außenwand befestigt werden (Gänßmantel 2016a:141). Gleichzeitig ist der Raumflächenverlust durch die guten Dämmwirkung des Dämmmaterials gering (Claytec 2020:3). Unter einer Auswahl unterschiedlicher Dämmplatten bietet sich bspw. Kalziumsilikatplatten an, da dieser Baustoff aufgrund seiner materialspezifischen Eigenschaften ausfallendem Tauwasser entgegenwirkt (Maier 2011:250). Muss das Dämmmaterial möglichst gute Speichereigenschaften besitzen, können HFD-Platten verwendet werden (Hegger u. a. 2007:159). Durch die Verwendung von Dämmplatten gehen einige der Vorteile von Lehmbaustoffen verloren, dadurch dass ein Verbund mit Lehmörtel hergestellt wird, werden diese jedoch partiell erhalten. So kann durch den Lehmputz auf den Dämmplatten das Raumklima positiv beeinflusst werden (Hegger u. a. 2007:159). Die bauphysikalisch und ökologisch vorteilhaften Eigenschaften von Leichtlehm können ebenfalls durch die Verwendung von Wärmedämmlehm-Platten beibehalten werden. Wärmedämmlehm-Platten stellen somit einen möglichst wirtschaftlichen Lösungsansatz zur Dämmung mit Lehmbaustoffen dar. Aufgrund dieser vielfältigen Dämmmöglichkeiten muss bei der Planung entschieden werden, welche Eigenschaften die Innendämmung aufweisen muss und welcher Dämmstoff am besten geeignet ist. Neben dem Feuchteschutznachweis, ist ebenfalls die ökologische Bewertung der unterschiedlichen Dämmsysteme von Relevanz.

Im Zusammenhang mit der tatsächlichen Umsetzung und Planung von Innendämmsystemen aus Lehmbaustoffen ist die Berechnung des Feuchtigkeitsnachweises von großer Relevanz. Umgesetzt wurden bislang nur wenige Innendämmungen aus Lehmbaustoffen, weshalb es bei der Planung entscheidend ist eine hygrothermischen Bauteilsimulation durchzuführen. Diese Berechnungen sind erforderlich, um einen Nachweis zu erhalten, dass die Konstruktion austrocknen

kann und nicht durch Feuchtigkeit beschädigt wird. Diese Berechnungen wurden im Zusammenhang dieser Arbeit nicht berücksichtigt, sind jedoch ausschlaggebend, um zu überprüfen wie gut Lehmbaustoffe zur Dämmung von gründerzeitlichem Mauerwerk eingesetzt werden kann. Neben der bauphysikalischen Eignung von Lehmbaustoffen zur Innendämmung von Gründerzeitbauten müssen die Dämmsysteme ebenfalls unter ökologischen Gesichtspunkten bewertet werden. Diese Arbeit unterliegt der Annahme, dass der Einsatz von Lehmbaustoffen ökologische Vorteile birgt. Um jedoch beurteilen zu können, inwiefern Lehmbaustoffe aus einer ökologischen Sicht tatsächlich die bessere Alternative zu konventionellen Dämmstoffen darstellen, braucht es weitere Untersuchungen in Form von Lebenszyklusanalysen der Sanierungsszenarien. Diese Arbeit kommt zum Schluss, dass sich die Verwendung von Lehmbaustoffen grundsätzlich gut auf die ökologische Bewertung von Sanierungsmaßnahmen auswirkt, es muss jedoch projektspezifisch überprüft werden, ob Lehmbaustoffe über die Lebensdauer des Gebäudes tatsächlich die ökologischste Dämmmethode darstellen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 01: STATISTIK AUSTRIA 2013:32	4
Abb. 02: Bobek & Lichtenberger 1978:70	11
Abb. 03: Bobek & Lichtenberger 1978:122	12
Abb. 04: Bobek & Lichtenberger 1978:109	14
Abb. 05: Giebeler u. a. 2008:136	15
Abb. 06: Giebeler u. a. 2008:137	17
Abb. 07: Giebeler u. a. 2008:47	30
Abb. 08: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2018:25	30
Abb. 09: Giebeler u. a. 2008:136	40
Abb. 10: Maier 2011: 285	42
Abb. 11: Minke 2017: 38	46
Abb. 12: Volhard 2016: 207	51
Abb. 13: Krus 2009:9 zit. n. Gänßmantel 2016d:282	54
Abb. 14: Claytec 2020:12	69
Abb. 15: Claytec 2020:18	74
Abb. 16: Claytec 2020:2	77
Abb. 17: Hegger u. a. 2007:159	82
Abb. 18: Hegger u. a. 2007:159	83
Abb. 19: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2018:16	90
Abb. 20: AKP zit. n. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2014:20	91
Abb. 21: Architekten Kronreif Trimmel&Partner zit. n. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2014:21	91
Abb. 22: FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018	94
Abb. 23: FVID Fachverband Innendämmung e.V. 2018	95
Abb. 24: Schauer & Volhard 1997:895	97
Abb. 25: Breuss 2014	98
Abb. 26: Breuss 2014	99
Abb. 27: Hauer 2020: 59	101
Abb. 28: Hauer 2020: 136	103
Abb. 29: Hauer 2020: 162	104
Abb. 30: Autor	106
Abb. 31: Autor	106

Abb. 32: Autor	107
Abb. 33: Autor	107
Abb. 34: Autor	113

Quellenverzeichnis

Abrihan, Cristian (2013): Wien. Dekorative Fassadenelemente in der Gründerzeit zwischen 1840 und 1918. Werkstattbericht Nr. 133, Magistratsabteilung 18 - Stadtentwicklung und Stadtplanung, Wien.

Online unter URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008347.pdf> [letzter Zugriff: 24.04.2020]

Bauer, Achim (2016): Kombination mit anlagentechnischen Komponenten. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 237-243.

Blaschek, Jasmine Alia (2015): Ausgerechnet Lehm. Praktische Perspektiven für den Lehmbau in Österreich. Diplomarbeit: Technische Universität Wien, Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege.

Bobek, Hans / Lichtenberger, Elisabeth (1978): Wien. Bauliche Gestalt und Entwicklung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts. Wien u.a.: Böhlau

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.) (2018): Gründerzeit mit Zukunft. Dokumentation und Monitoring von vier Demonstrationsgebäuden. Wien

Online unter URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-44-gruenderzeit-zukunft.pdf [letzter Zugriff: 2.06.2020]

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.) (2013): Gründerzeit mit Zukunft. Subprojekt 2: Grundlagen und Machbarkeitsstudien. Wien

Online unter URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/endbericht_1301a_gruenderzeit_mit_zukunft.pdf [letzter Zugriff: 2.06.2020]

Trimmel, Günther/ Bruckner, Nicole/ Smole, Katharina (2014): KA 7 – Kaiserstraße: Innovative Sanierung eines denkmalgeschützten Gründerzeit- gebäudes mit Innendämmung. Wien

Online unter URL: http://www.gruenderzeitplus.at/downloads/Endbericht_Kaiserstrasse.pdf [letzter Zugriff: 14.07.2020]

CLAYTEC e. K. (2020): Innendämmung. Innendämmung aus CLAYTEC HFD Innendämmplatte. Innenschale aus Leichtlehm. Innenschale aus Leichtlehmsteinen.

Fachverband Innendämmung e. V. (Hrsg.) (2016): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller

FVID Fachverband Innendämmung e.V. (2018) Ökonomie trifft Ökologie. Innendämmung-Wandheizung-Lehmputz (Praxis-Projektbericht 4/2018).

Online unter URL: <https://fvid.de/index.php/aktuelles/praxisberichte/112-praxis-projektbericht-4-2018> [letzter Zugriff: 26.06.2020]

Giebler, Giebler/ Fisch, Rainer/ Krause, Harald/ Musso, Florian/ Petzinka Karl-Heinz/ Rudolphi, Alexander (2008): Atlas Sanierung. Instandhaltung Umbau Ergänzung. Basel u.a.: Birkhäuser.

Gänßmantel, Jürgen (2016): Wärmedämmlehme. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 133-134.

Gänßmantel, Jürgen (2016a): Kalziumsilikat-Platten. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 141-143.

Gänßmantel, Jürgen (2016b): Wärmedämmlehm-Platten. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 148-149.

Gänßmantel, Jürgen (2016c): Sonstige Materialsysteme. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 155-159.

Gänßmantel, Jürgen (2016d): Aus Schäden lernen. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 279-188.

Hauer, Beatrix (2020): Lehm Urban. Anwendungsmöglichkeiten von Lehm im städtischen Wohnungsbau am Beispiel Wien. Diplomarbeit: Technische Universität Wien, Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege.

Hegger, Manfred/ Fuchs, Matthias/ Stark, Thomas/ Zeumer, Martin (2007): Energie Atlas. Nachhaltige Architektur. München: Kösel

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (2018): Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude Online unter URL: https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/OI3_Berechnungsleitfaden_V4.0_20181025.pdf [letzter Zugriff: 25.04.2020]

Kolbe, Georg (2016): Kalziumsilikat-Hydrat-Platten. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 143-145.

Magistrat der Stadt Wien (2014): Smart City Wien. Rahmenstrategie. Online unter URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/b008380.html> [letzter Zugriff: 12.03.2020]

Magistratsabteilung 18 Stadtentwicklung und Stadtplanung (2014): STEP 2025. Stadtentwicklungsplan Wien

Online unter URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008379a.pdf> [letzter Zugriff: 12.03.2020]

Maier, Josef (2011)²: Energetische Sanierung von Altbauten. Stuttgart: Fraunhofer IRB

Minke, Gernot (2017)⁹: Handbuch Lehm- und Ziegelbau. Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag.

Otto Immobilien (2020): Erster Wiener Zinshaus-Marktbericht – Frühjahr 2020. Wien

Online unter URL: https://www.otto.at/getmedia/1e33007a-5e9e-489a-91a2-757f6f5f2f1a/OTTO-ZHMB-F2020_web.pdf.aspx [letzter Zugriff: 23.04.2020]

Röhlen, Ulrich (2016): Altbau in Duisburg Hochfeld. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 313-315.

Röhlen, Ulrich/ Ziehert, Christof (2020)³: Lehm- und Ziegelbau-Praxis. Planung und Ausführung. Berlin: Beuth.

Schauer, Ute/ Volhard, Franz (1997) Umbau einer Scheune in Offenbach. In: DETAIL 06/1997. S. 892-895

Online unter URL: <https://inspiration.detail.de/Download/document-download/id/58b58aafb17b7>

Schöberl, Helmut/ Lang, Christoph/ Hofer, Richard (2011): Thermische Sanierung von Gründerzeitgebäuden. Innendämmung. Wien

Online unter URL: http://www.gruenderzeitplus.at/downloads/Gruenderzeit-mit-Zukunft_MBS_Innendaemmung_final.pdf [letzter Zugriff: 15.07.2020]

Schroeder, Horst (2019): Lehm- und Ziegelbau. Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Sprengard, Christopf (2016a): Holzfaserplatten (WF). In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 149-151.

Sprengard, Christopf (2016b): Wärmedämmstoffe. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 77-113.

Standards der Baudenkmalpflege (2015)²: Standards der Baudenkmalpflege. Wien: Bundesdenkmalamt

Online unter URL: <https://bda.gv.at/publikationen/standards-leitfaeden-richtlinien/standards-der-baudenkmalpflege/> [letzter Zugriff: 14.07.2020]

STATISTIK AUSTRIA (2013): Census 2011 – Gebäude- und Wohnungszählung.

Online unter URL: https://www.statistik.at/web_de/services/publikationen/7/index.html?includePage=detailedView§ionName=Wohnen&pubId=674 [letzter Zugriff: 12.03.2020]

UmweltbundesamtGmbH (2019): Klimaschutzbericht 2018.

Online unter URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0702.pdf> [letzter Zugriff: 14.03.2020]

Volhard, Frank (2016)⁸: Bauen mit Leichtlehm. Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm. Basel: Birkhäuser Verlag

Wegerer, Paul (2010): Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Diplomarbeit: Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Weller, Bernhard/ Fahrion, Marc-Steffen/ Jakubetz, Sven (2012): Denkmalpflege und Energie. Wiesbaden: Springer Fachmedien

wohnfonds_wien (2016): Sanieren von Althäusern. Der Weg zu mehr Wohnqualität.

Online unter URL: https://www.wohnfonds.wien.at/media/file/Publikationen/sanieren_von_althaeusern_2016.pdf [letzter Zugriff: 21.04.2020]

Worch, Anatol (2016): Diffusionsverhalten. In: Fachverband Innendämmung (Hrsg.): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details - Beispiele. Köln: Rudolf Müller, S. 120-131.