

Diplomarbeit

Untersuchung zu bauphysikalischen Anforderungen bei einem Fachwerk-Neubau in Lehmbauweise

Vorgelegt am:	18.08.2017
Von:	Enrico Plohmann Stollberger Straße 57 09119 Chemnitz
Studiengang:	Bauingenieurwesen
Studienrichtung:	Hochbau
Seminargruppe:	HB 14
Matrikelnummer:	4001749
Praxispartner:	CIB – Generalübernehmer GmbH Carolastraße 7a 09111 Chemnitz
Gutachter:	Dipl.-Ing. (BA) Alexander Franke (CIB) Dipl.-Ing. (FH) Sandra Löffler (BA Glauchau)

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichenverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Einführung in den Lehmbau	2
2.1. Lehm als Baustoff	2
2.2. Geschichtlicher Überblick	2
3. Grundlagen.....	4
3.1. Aufbereitung von Lehm.....	4
3.2. Trocknung von Lehmstoffen.....	5
3.3. Verwendung von Lehmstoffen	6
3.3.1. Stampflehm.....	6
3.3.2. Leichtlehm	6
3.3.3. Lehmputz	7
3.3.4. Lehmsteine	7
3.3.5. Lehmplatten	8
4. Winterlicher Wärmeschutz.....	10
4.1. Grundlagen	10
4.2. Nachweis der Schichten auf Wärmedurchgang	10
4.2.1. Berechnungsgrundlage.....	10
4.2.2. Außenwand.....	12
4.2.3. Fußboden mit Fundament.....	14
4.2.4. Zwischendecke	16
4.2.5. Dach	18
4.3. Wärmebrücken.....	20
5. Sommerlicher Wärmeschutz.....	22
5.1. Grundlagen	22
5.2. Wärmespeicherfähigkeit	22
5.3. Wärmedämpfung	24
6. Feuchteschutz.....	27
6.1. Grundlagen	27
6.2. Tauwassernachweis der Außenwand mittels Glaser-Verfahren	28
6.2.1. Berechnungsablauf.....	28
6.2.2. Temperaturverlauf.....	29
6.2.3. Ermittlung der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke.....	31
6.2.4. Tauperiode.....	34
6.2.5. Verdunstungsperiode.....	35

6.3.	Tauwassernachweis des Fußbodenaufbaus.....	36
6.4.	Tauwassernachweis der Decke zu unbeheizten Räumen	37
6.5.	Tauwassernachweis des Daches.....	38
6.6.	Luftdichtheit	39
6.7.	Konstruktiver Schutz vor Feuchtigkeit.....	40
7.	Schallschutz	42
7.1.	Schallschutztechnische Kenngrößen	42
7.2.	Luftschallschutz	42
7.3.	Trittschallschutz der Holzbalkendecke	43
8.	Brandverhalten von Lehm.....	45
8.1.	Baustoffklasse.....	45
8.2.	Feuerwiderstandsklasse	45
9.	Schlussteil	47
	Quellenverzeichnis.....	48
	Anhangverzeichnis.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Feuchtigkeitsprofil	5
Abbildung 2	Wandaufbau.....	12
Abbildung 3	Fußbodenaufbau.....	14
Abbildung 4	Deckenaufbau	16
Abbildung 5	Dachaufbau.....	18
Abbildung 6	Tagestemperaturverlauf	25
Abbildung 7	Phasenverschiebung	26
Abbildung 8	Feuchtetransport.....	27
Abbildung 9	Temperaturverlauf.....	30
Abbildung 10	Schematischer Temperaturverlauf	31
Abbildung 11	Diffusionsdiagramm im Winter (Außenwand).....	34
Abbildung 12	Diffusionsdiagramm im Sommer (Außenwand).....	35
Abbildung 13	Diffusionsdiagramm Winter (Fußboden)	36
Abbildung 14	Diffusionsdiagramm Winter (Decke)	37
Abbildung 15	Diffusionsdiagramm Winter (Dach)	38
Abbildung 16	Bewertete Schalldämmmaße	43
Abbildung 17	Variante Stampflehm	51
Abbildung 18	Variante Lehm-Blähglas Schüttung.....	52

Abkürzungsverzeichnis

U-Wert	Wärmedurchgangs-Werte
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN	Deutsche Übernahme einer Europäischen Norm
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
EnEV	Energieeinsparverordnung
WBV	Wärmebrückenverlustkoeffizient
SLL	Strohleichtlehm
HLL	Holzleichtlehm
MLL	Mineralischer Leichtlehm

Formelzeichenverzeichnis

Bauphysikalische Kenngröße	Formelzeichen	Einheit
Wärmeschutz		
Auskühlzeit	t_a	h
Lufttemperatur, außen	Θ_e	°C
Lufttemperatur, innen	Θ_i	°C
Oberflächentemperatur, außen	Θ_{se}	°C
Oberflächentemperatur, innen	Θ_{si}	°C
Rohdichte	ρ	kg/m ³
Schichtdicke	d	m
Speicherkapazität, spezifische	c	Ws/(kg·K)
Temperaturamplitudendämpfung	C	h
Temperaturamplitudenverhältnis	TAV	-
Wärmebrückenansatz	ΔU_{WB}	W/(m ² ·K)
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/(m ² ·K)
Wärmedurchgangswiderstand	R_T	m ² K/W
Wärmedurchgangswiderstand, oberer Grenzwert	R'_T	m ² K/W
Wärmedurchgangswiderstand, unterer Grenzwert	R''_T	m ² K/W
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m·K)
Wärmestrom	Φ	W
Wärmestromdichte	q	W/m ²
Wärmeübergangswiderstand, außen	R_{se}	m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand, innen	R_{si}	m ² K/W
Feuchteschutz		
Luftfeuchte, relative	ϕ	%
Luftschichtdicke, wasserdampfdiffusionsäquivalente	s_d	m
Tauperiode	t_T	h
Tauwassermenge	$m_{W,T}$	kg/(m ² ·a)
Verdunstungsmenge	t_V	kg/(m ² ·a)
Verdunstungsperiode	$m_{W,V}$	h
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	μ	-
Wasserdampfpartialdruck	p_D	Pa
Wasserdampfsättigungsdruck	p_{sw}	Pa
Schallschutz		
Luftschalldämmmaß, bewertetes	R'_w	dB
Luftschalldämmmaß, resultierendes	$R'_{w,res}$	dB

1. Einleitung

Mit den Fähigkeiten der Geschäftemacherei verliert die Baukunst ihr Niveau. Dem Verbraucher wird eingeredet, jeder könnte sein Haus selbst bauen und durch einfache Videos schauen ist dies dann selbsterklärend. Aber nicht nur Laien, auch Baufirmen trauen sich mittlerweile jede Baukunst zu.

Ob Modernisierung oder Neubau, die häufigsten Probleme bei Fachwerkhäusern, sind die bauphysikalischen Gegebenheiten, die oft im Konflikt mit den erforderlichen Wünschen der Energieeffizienten Neuzeit stehen. Die heutigen Aspekte eines Neubaus drehen sich häufig nur um U-Werte, Wärmedämmung oder Energieeinsparung. Fachwerkhäuser sind Konstruktionen aus früheren Epochen, werden diese mit heutigen Standards und Erwartungen gebaut, kann das der Anfang von enormen Bauschäden sein. Eine historisch gewachsen und bewährte Fachwerkkunst soll einen modernen Standard haben, hoch gedämmt und Luftdicht.

Fachwerkhäuser sind zwar altbewährt, aber nach heutiger Sicht Schwachkonstruktionen, mit eigenen Besonderheiten. Der Wandaufbau ist in der Regel relativ undicht. Holz, Stein und Lehm arbeiten, das führt zu ewigen Rissen. Eine Fachwerkkonstruktion kann daher nie ganz dicht werden, was auch eigentlich kein Problem darstellt, ohne moderne Energieansprüche.¹

Der Baustoff Lehm war in der Geschichte immer dann begehrt, wenn andere Materialien nur schwer zu bekommen waren. In den Zeiten mit geringer Mobilität oder nach den Kriegen. Seit Beginn der Umweltbewegung Ende des 20. Jahrhunderts, haben ökologische Argumente immer mehr Wichtung bekommen. Das nachhaltige Denken ist auch in der Baubranche angekommen. Rohstoffe sollen geschont werden, Baustoffe sollen nachhaltig sein. Sozusagen soll das errichtete Haus bei einem Abbruch, komplett der Natur wieder gegeben werden können.

Ist die traditionelle Baukunst wettbewerbsfähig, mit der großen Industrie und Wirtschaft? Können natürliche Baustoffe die Energievorgaben erfüllen?

¹ online: RÜPKE, 2016 (15.06.2017)

2. Einführung in den Lehmbau

2.1. Lehm als Baustoff

In Nord- und Mitteleuropa hat der Lehmbau eine lange Tradition. Aus den klimatischen Gegebenheiten und der Notwendigkeit, die vorhandenen Materialien zu verwenden, entwickelten sich vielfältige Methoden, Lehm als Baustoff einzusetzen.

Eine der Besonderheiten von Lehm ist sein verschiedenartiges Vorkommen im Erdreich. In Unterschiedlichen Mengenverhältnissen, ist Lehm ein Gemisch aus Ton, Schluff, Sand, Kies oder Steinen. Das örtliche Lehmvorkommen bestimmte daher auch die jeweilige Bauweise.

Anders wie bei Kalk oder Zement bindet Lehm nicht chemisch ab, sondern erhärtet ausschließlich durch die Lufttrocknung. Daher hat es die besondere Eigenschaft, bei erneuter Wasserzugabe wieder plastisch und formbar zu sein. Dies beinhaltet zugleich eines seiner größten Schwächen, die Lehmbauten vor einer Zerstörung durch Regen oder Nässe zu schützen.

Bei entsprechender Aufbereitung des Lehms und einer ausreichenden Wanddicke, ist die Druckfestigkeit auch für tragende Wände ausreichend. In Nordafrika werden Häuser mit bis zu Zehn Geschossen aus Lehm gebaut. In Europa ist man da vorsichtiger und baut Lehm- oder Fachwerkhäuser bis zu 4 Geschossen.

Tragende Elemente werden oft mit Lehmsteinen oder Lehmstampf hergestellt, diese eine hohe Dichte von über 1700 kg/m^3 besitzen. Die wichtigste Technik ist daher der Lehmsteinbau, einer der ältesten Bauweisen. Die Städte der früheren Hochkulturen wie in Mesopotamien waren aus luftgetrockneten Lehmziegeln errichtet.

In regenreicheren Gebieten wurde Lehm als nichttragendes, raumabschließendes Ausfachungsmaterial eingesetzt. Die witterungsbedingten Lehmarbeiten sind hier im Innenbereich und durch das gedeckte Dach geschützt. Beispiele hierfür sind die mitteleuropäischen und japanischen Holzbaukonstruktionen mit Lehmausfachungen. Diese Technik reicht zurück auf die frühe Zelt- und Pfahlbauten, deren Wandgeflecht mit Lehm verstrichen wurde.²

2.2. Geschichtlicher Überblick

Archäologische Ausgrabungen zeigen das in Mitteleuropa im Neolithikum, auch Jungsteinzeit genannt vor etwa 12000 Jahren, Skelettwände mit Flechtwerk, welches mit Lehm bedeckt war, errichtet wurden. Somit haben auch die alten Germanen mit Holz und Lehm gebaut. Der Stein- und Ziegelbau wurde erst mit dem Einzug der Römer verbreitet.

Die Geschichte des Lehmbaus in Deutschland und den angrenzenden Ländern, ist im Wesentlichen die des Fachwerkbaus mit Lehmausfachungen. Massive Lehmhäu-

² vgl. VOLHARD, 2013, S. 13

ser bleiben eine Ausnahme und beschränken sich auf einzelne Regionen. Der Fachwerkbau ist bis Ende des 19. Jahrhunderts eine gebräuchliche Bauweise, wobei sich regional unterschiedliche Haustypen herausbilden. Der Lehm-Fachwerkbau wird immer wieder benachteiligt, gegenüber den Stein- und Ziegelbau, angesehen. Ein Argument ist der schlechte Feuerwiderstand, der im Städtebau des 18. Jahrhunderts häufig zum Verlust vieler Bebauungen führte. Der Steinbau kommt dem Bedürfnis nach Dauerhaftigkeit und Sicherheit, demnach mehr entgegen.

Die eigentliche Ursache, dass Mitte des 19. Jahrhunderts der Lehm- und Fachwerkbau in Vergessenheit gerät, ist das beginnende Industriezeitalter. Häuser mit mehreren Geschossen und hoher Spannweite, sowie Fassadenschmuck und Gesimse, entsprechen nicht der Lehmbauweise. Der Massenwohnungsbau und Industriebau erreicht Dimensionen, bei denen natürliche Materialien wie Holz oder Lehm, keine Bedeutung mehr finden.

Nach dem Ersten Weltkrieg werden kohlegebundene Baustoffe knapp, Transportmöglichkeiten sind beschränkt und Facharbeiter rar. In wenigen Jahren werden vor allem in Siedlungen auf dem Land, mehr als 20.000 neue Lehmbauten errichtet. Es bildet sich der „Deutsche Ausschuss zur Förderung der Lehmbauweise“. Lehr- und Beratungsstellen werden eingerichtet, sowie Ausbildungen zu Lehmfacharbeitern durchgeführt. Erste wissenschaftliche Forschungen und Materialprüfanstalten tragen dazu bei, dass sich das Brandverhalten oder die Druckfestigkeit der Lehme verbessert. Der Aufschwung des Lehmbaus bleibt jedoch bis auf wenige Nachkriegsjahre beschränkt, bis sich der Zustand der Baustoffindustrie normalisiert hat.³

Spätestens seit der Energiekrise 1973 ist deutlich geworden, dass der steigende Wohlstand moderner Industrieländer, auf das Fließen der Ölquellen angewiesen ist. Ein Umdenken in der Bevölkerung hat begonnen, die Umwelt zu schonen und auf natürliche Baustoffe zurückzukommen. Das Bauen mit Lehm, Holz und Pflanzenfasern ist wieder im Aufschwung, denn es benötigt nur eine Energiequelle, die Sonne. Lehm trocknet ausschließlich an der Luft und die Pflanzenfasern sowie auch das Holz, wachsen natürlich nach. Ausgedientes Material kann der Natur überlassen werden, ohne dabei die Umwelt zu schaden.

Lehm ist in der heutigen Zeit, vor allem in Verbindung mit tragenden Holzskeletten, eine sehr gute Alternative in vielen Bereichen.⁴

³ vgl. VOLHARD, 2013, S. 17

⁴ vgl. VOLHARD, 2013, S. 33

3. Grundlagen

3.1. Aufbereitung von Lehm

Das Ziel der Aufbereitung des Lehms, ist die Herstellung einer homogenen Masse, die für die Weiterverwendung bestimmter Bautechniken dient. Hierbei genügt die Zugabe von Wasser, bis die erforderliche Konsistenz vorhanden ist. Lehm besteht aus verschiedenen, geologisch gewachsenen Schichtungen, diese aufgebrochen und miteinander vermischt werden. Durch die Aufbereitung können, die im Feinstkorn enthaltenen Tonmineralien, zusätzlich Wassermoleküle anlagern, wodurch ein höherer Haftverbund entsteht. Im Allgemeinen werden zwei Verfahren angewendet, die natürliche und mechanische Aufbereitung.

Bei der natürlichen Aufbereitung wird der Baulehm den örtlichen Witterungseinflüssen ausgesetzt. Durch Sonnen- und Frosteinwirkung sowie durch Faulung und Gärung der organischen Bestandteile, wird der Lehm in seiner Struktur verändert („aufgeschlossen“). Dieses Verfahren erfordert viel Sorgfalt und könnte über mehrere Jahre dauern. Um diese Aufbereitung etwas zu beschleunigen, kann der Lehm zeitweise mit Wasser versetzt werden, wodurch Quellvorgänge ausgelöst werden, die eine Lockerung der Tonmineralien bewirken. In der keramischen Industrie wird der Lehm in Sumpfbecke eingefüllt und mit Wasser übergossen. Dieser Vorgang wird üblicherweise als Sumpfen bezeichnet.

Ein anderes wichtiges Verfahren ist die chemische Aufbereitung. Hierbei wird der Lehm mittels einfacher Geräte oder Muskelkraft zerkleinert, gebrochen oder zerstampft. Anschließend wird dieser gesiebt, um unbrauchbare Steine oder Baumwurzeln zu entfernen. Nach dem Sieben wird der Lehm gemahlen. Je nach gewünschtem Zustand, ist der in Form von Rohmehl oder Granulat, zur Weiterverarbeitung auslieferbar.

Bevor der Lehm in die gewünschte Form gefüllt oder gepresst wird, kann er noch mit Zusätzen versehen werden. Die Vielfalt der natürlichen Zuschläge ist groß. Sie verändern die physikalischen Eigenschaften des Lehms, verringern zum Beispiel das Schwinden beim Austrocknen, erhöhen die Zugfestigkeit oder bringen mehr Stabilität gegenüber Erosion. Als natürliche Zuschlagstoffe können Sand, Kies und Blähton verwendet werden oder auch Strohhäcksel, Späne oder Tierhaare.

Zusatzstoffe wie Gips, Salz, Algen oder auch früher häufig verwendet, Molke, Urin und Blut erhöhen die Druck und Abriebfestigkeit, sowie die Witterungsstabilität der Lehmteile. Des Weiteren gibt es auch synthetisch hergestellte Zuschlag- und Zusatzstoffe, allerdings benötigen diese zur Herstellung viel Energie und können dem Naturkreislauf nicht problemlos wieder zurückgeführt werden.⁵

⁵ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 94

3.2. Trocknung von Lehmbaustoffen

Lehmbaustoffe oder Lehmbauteile weisen unmittelbar nach der Formgebung eine geringe Festigkeit auf. Erst im Trocknungsverlauf verbessern sich die statischen und bauphysikalischen Eigenschaften. Die Dauer der Austrocknung ist abhängig von mehreren Faktoren, unter anderem dem Anfangswassergehalt, die vorherrschende Witterung und den lokalen Bedingungen für die natürliche Austrocknung. Der Prozess läuft ideal, wenn die Geschwindigkeit der Verdunstung des Porenwassers an der Bauteiloberfläche und der Feuchtetransport aus dem Inneren des Bauteils gleich sind. Bei starker Sonneneinstrahlung im Sommer, kann dieses Gleichgewicht schwanken. Durch die Bauteilgeometrie oder äußerliche Bedingungen, kann ein gleichmäßiger Strahlungseinfall nicht gewährleistet werden. Aber auch Inhomogenität, durch eine schlechte Vermischung der Stoffe während der Aufbereitung, können zu ungleichmäßige Austrocknungsbedingungen führen. In der Folge können sich Risse an der Bauteiloberfläche bilden und die Optik und Statik benachteiligen.

Es gibt verschiedene Arten der Trocknung, die energiefreundlichere, ist die natürliche Trocknung an der Luft ohne künstliche Wärmezufuhr, aber auch die zeitintensivere Form. In der nachfolgenden Abbildung ist der Trocknungsverlauf eines Wandabschnittes aus Stampflehm, durchgeführt an der Bauhaus-Universität Weimar, zu sehen. Dargestellt ist der Wassergehalt einer 50 cm starken Stampflehmwand nach einer sechsmonatigen Trocknung. Das Wassermenge ist im Kern der Wand, gleich dem des Einbaus.

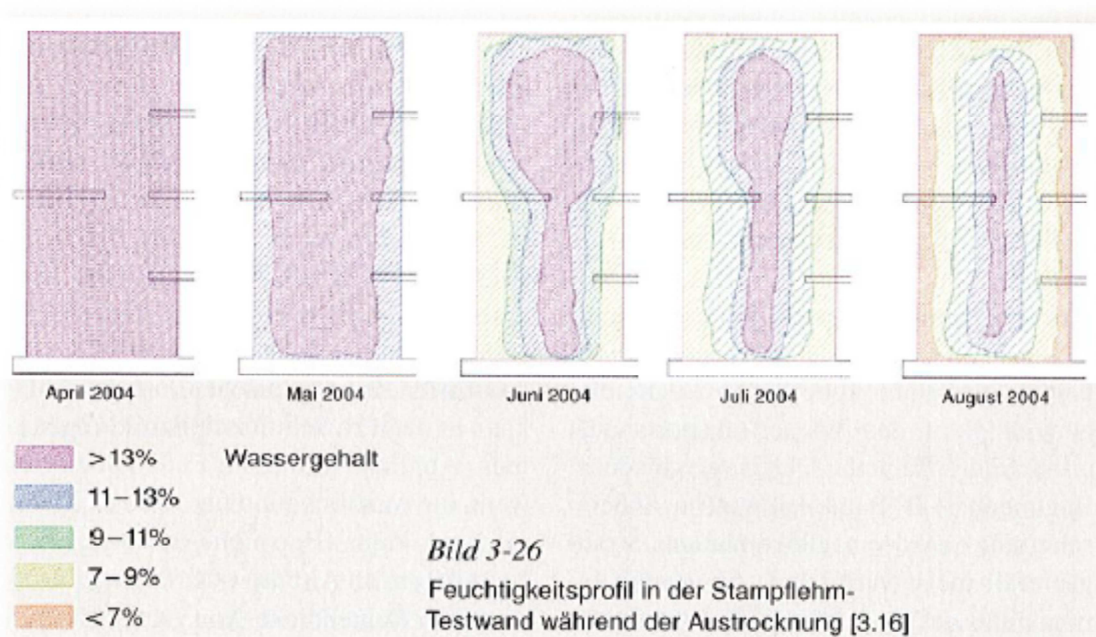


Abbildung 1: Feuchtigkeitsprofil

(SCHROEDER, 2010, S. 112)

Das erfordert auch für die Hersteller, einen großen Kosten- und Zeitfaktor. Eine künstliche Trocknung in Trocknungskammern, bietet eine zumindest Energiesparende Möglichkeit, die Trocknungszeit zu verringern. Bei der praktischen Bauausführung wird meist eine zusätzliche Trocknung durch Belüftungssysteme, verwendet. Im Winter ist das wegen der Frostgefahr ohnehin erforderlich.

Die Art der Trocknung hat im Prüfwesen eine weitere Bedeutung. Die DIN 18952-2 empfiehlt, für die Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der Trockendruckfestigkeit, die künstliche Trocknung bei 80°C bis zur Restfeuchte.⁶

3.3. Verwendung von Lehmbaustoffen

3.3.1. Stampflehm

Stampflehm ist ein formloses Gemenge aus Baulehm, Wasser und gegebenenfalls Zuschlägen. Die Trockenrohdichte liegt je nach Gemisch zwischen 1.700 und 2.200 kg/m³. Bei tragenden Wandkonstruktionen ist eine weit gestufte Körnungslinie notwendig. Es eignen sich deshalb gemischtkörnige Baulehme mit Grobkornanteil, besonders gut. Die Bindekraft ist bei Stampflehm im Bereich von schwach bis mittelbindig klassifiziert. Der Zusatz von Kalk und Zement als Bindemittel, gehört zur üblichen Lehmbaupraxis.

Stampflehm kann mittels Schalungen, für tragende oder nichttragende Bauteile sowie Fußböden, verwendet werden. Ebenfalls ist die Vorfertigung von gepressten Lehmsteinen oder großformatigen Wandelemente möglich. Die erforderlichen Prüfungen beziehen sich auf die Trockenrohdichte sowie die Trockendruckfestigkeit und Schwindmaße an einer Bauteilprobe.⁷

3.3.2. Leichtlehm

Leichtlehm ist eine Mischung aus Baulehm, organischen oder mineralischen Zuschlägen und Wasser. Die Einteilung der Leichtlehme erfolgt nach ihrer Trockenrohdichte:

- leichte Mischungen: 300 – 800 kg/m³
- schwere Mischungen: 800 – 1200 kg/m³

Die Baustoffbezeichnung kennzeichnet den dominierenden Zuschlagstoff:

- Strohleichtlehm (SLL): mit Strohfasern (organisch)
- Holzleichtlehm (HLL): mit Holzhackschnitzel (organisch)
- Mineralischer Leichtlehm (MLL): mit Blähton als mineralischer Leichtzuschlag

⁶ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 110

⁷ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 115

Die Aufbereitung der schweren Mischungen erfolgt manuell, analog zum Stampflehm oder mechanisiert. Bei leichten Mischungen wird der Zuschlagstoff mit einer feinen Schicht von Tonmineralien umhüllt. Dazu wird der Baulehm in geeigneten Mischern zu flüssiger Konsistenz aufbereitet. Langfasrige Zuschläge wie Stroh, werden in Lehmschlämme übergossen oder in diese getaucht. Danach muss der Lehm einige Stunden ruhen, um eine erforderliche Steifigkeit zu erlangen.

Die Verwendung von Leichtlehm ist vielseitig. Er kann für nichttragende Bauteile verwendet werden, ebenso für Ausfachungen von Fachwerk- und Holzständerkonstruktionen sowie als Vorsatzschale für geformte Lehmsteine und -platten.⁸

3.3.3. Lehmputz

Für Lehmputz eignen sich schluffig, sandige Baulehme mit einem ausreichenden Kornanteil zur Schwindmaßbeschränkung. Bei mageren Baulehmen kann das durch den Zusatz von Tonmineralien erreicht werden. Zudem können Faserstoffe beigefügt werden, diese wirken als Bewehrung gegen Rissbildung beim Austrocknen. Übliche Faserstoffe sind Pflanzenfaser, Sägemehl oder auch feine Tierhaare. Zur besseren Witterungsbeständigkeit wurden den Lehmputzen früher Kalk, Kuhdung, Molke oder Tierblut hinzugefügt. Diese traditionellen Zusätze haben sich in ihrer Gebrauchstauglichkeit bewährt und können auch heute wieder eine Rolle spielen.

Die Verwendung von Lehmputz ist vielseitig und kann zum Beispiel als Unterputz, für unebene Untergründe oder als Kleber für Dämmplatten, eingesetzt werden. Dieser kann mit einer Stärke von 20 mm problemlos aufgetragen werden. Ebenso ist Lehm auch als Oberputz oder Deckputz geeignet und kann mit Anstrichstoffen aus einer Bindemittelkombination von Tonmehl und Zellulose eingefärbt werden.⁹

3.3.4. Lehmsteine

Lehmsteine sind quaderförmig geformte Baustoffe mit definierten Abmessungen und Eigenschaften. Steine mit einer Trockenrohdichte unter 1200 kg/m³, werden als Leichtlehmsteine bezeichnet. Seit 2013 werden Lehmsteine in der DIN18945, in drei Klassen eingeteilt. Die Anwendungsklasse 1 kennzeichnet die Steine, die mit Kalkputz verputzt wurden und zum Beispiel als Sichtfachwerk bei bewitterten Fassaden, sich eignen. Diese können bei ausreichender Trockendruckfestigkeit, für tragendes Mauerwerk eingesetzt werden. Dabei sind nur Vollsteine, gegebenenfalls mit Grifflöchern, zugelassen. Diese müssen eine homogene Struktur, eine ausreichende Frost- und Witterungsbeständigkeit sowie ein geringes Quellverhalten aufweisen. Steine der Klasse 2 werden für witterungsgeschütztes Außenmauerwerk oder für nichttragende Innenbauteile verwendet. Diese können ebenfalls für tragendes Mauerwerk

⁸ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 118

⁹ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 122

eingesetzt werden. Wobei ein herstellungsbedingter Lochanteil auf 15 % beschränkt ist. Leichtlehmsteine der Anwendungsklasse 3 eignen sich für den Trockenbau als Deckenaufleger oder zum Stapelbau. Die Steine dürfen für nichttragendes Mauerwerk, mit einer beliebigen Lochung, verwendet werden.

Bei tragender Anwendung müssen die Lehmsteine Anforderungen der Trockenrohdichte und der Trockendruckfestigkeit erfüllen.¹⁰

Die Formate der Lehmsteine werden nach der DIN 4172 „Maßordnung im Hochbau“ geregelt. Die Maße sind so festgelegt, dass diese kompatibel mit anderen Steinen oder Ziegel sind. Dargestellt in der nachfolgenden Tabelle.

Bezeichnung	Anwendungs- klasse	Format [cm]	Bedarf pro m ² (d=11,5) [Stück]
NF 800	AK 1	24 x 11,5 x 7,1	50
DF	AK 2	24 x 11,5 x 5,2	66
NF	AK 2	24 x 11,5 x 7,1	50
2DF gelocht	AK 2	24 x 11,5 x 11,3	33
3DF gelocht	AK 3	24 x 17,5 x 11,3	24

(online: DÖBEL, 2016)

3.3.5. Lehmplatten

Lehmplatten sind plane, plattenförmige Baustoffe. Die Abmessungen sind unterschiedlich und nicht geregelt. Ebenso die Plattenstärke, die sich je nach Verwendung, von 16 bis 100 mm, unterscheidet. Dünne Lehmbauplatten liegen in der Größenordnung, bei üblichen Trockenbauplatten.

Lehmbauplatten werden meist, mit Sand gemagerte Tonmehle oder Trockenlehme mit hoher Bindekraft, hergestellt. Die Platten werden unter Anwendung spezieller Technologien, wie Bandpressen oder Strangpressen, hergestellt. Die Plattenränder sind entweder stumpf umlaufend oder als Nut und Feder, ausgebildet.

Trockener Lehm kann nur geringe Zug- und Biegezugkräfte aufnehmen. Die Lehm- baustoffe, aus denen die Lehmplatten hergestellt werden, müssen deshalb einen hohen Faseranteil besitzen. Eine weitere Möglichkeit sind sandwichartige Platten, mit integrierten Bewehrungsmatten aus pflanzlichen Fasern.

Dicke Lehmbauplatten eignen sich für tragende Trennwände ohne Unterkonstruktion oder als Ausfachung von Dachschrägen. Dünne Platten werden zur Ver- und Beklei-

¹⁰ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 125

dung von Bauteilen im Innenbereich oder für nicht tragende Trennwände mit Unterkonstruktion, verwendet. Eine spezielle Bauform, sind die Lehmbauplatten mit integrierten Heizschlangen für Wandheizungen, als Hohlkammerplatten.¹¹

¹¹ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 127

4. Winterlicher Wärmeschutz

4.1. Grundlagen

Der bauliche Mindestwärmeschutz wird in der DIN 4108 „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden“ geregelt und durch die Energieeinsparverordnung 2014/16 (EnEV) ergänzt. In der die Anforderungen an den energetischen Mindestwärmeschutz und die Grenzwerte formuliert sind.

In unseren Regionen muss der Wärmeschutz an Gebäuden, auf diverse klimatische Bedingungen reagieren. Ziel ist es, ein ganzjährig angenehmes Raumklima zu erschaffen. Im bauphysikalischen Sinn, teilt sich der Wärmeschutz in den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz auf. Der winterliche Wärmeschutz hat die Aufgabe, die Verluste an Wärmeenergie in einem Gebäude zu reduzieren, den Bewohnern eine hygienisch einwandfreie Lebensweise zu ermöglichen und einen dauerhaften Schutz der Baukonstruktion gegen Feuchteeinwirkungen sicherzustellen. Allerdings muss immer vorausgesetzt werden, dass die Bewohner entsprechend der Nutzung, ausreichend lüften oder heizen.

Die verschiedenen physikalischen Vorgänge, die beim winterlichen Wärmeschutz eine Rolle spielen, sollten thematisch gemeinsam betrachtet werden. So sollte unter Anderem unbedingt auf die Vermeidung von Tauwasser geachtet werden, da es ab einer gewissen Menge, unweigerlich zur Schimmelbildung führt. Eine weitere wichtige Betrachtung sind die Wärmebrücken, die vor allem an Fensterleibungen oder bei Innenkanten von Außenwänden, auftreten können.¹²

4.2. Nachweis der Schichten auf Wärmedurchgang

4.2.1. Berechnungsgrundlage

Der Wärmedurchgangskoeffizient kennzeichnet den Wärmestrom, der bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch eine Fläche von 1 m² fließt. Somit dient der U-Wert als Maß für die Wärmedurchlässigkeit eines Bauteils. Der Wärmedurchgangskoeffizient U eines ebenen Bauteils, aus thermisch inhomogenen Schichten, kann aus dem Wärmedurchgangswiderstand R_T ermittelt werden. Dieser bildet sich, als arithmetischer Mittelwert, aus den oberen und unteren Grenzwerten. Zur Berechnung der Grenzwerte, ist eine Aufteilung des Bauteils in Schichten erforderlich. Dafür muss das Bauteil in thermisch homogene Teile zerlegt werden. Zudem wird die jeweilige Wärmeleitfähigkeit λ und die Dicke d , flächenanteilmäßig zu den Widerständen gerechnet.¹³

¹² online: BAUNETZ MEDIA GMBH, 2016 (21.07.2017)

¹³ vgl. LIERSCH, 2015, S. 59

Schicht a: Gefach $f_a = \frac{l_a}{l_{ges}}$

$$R_{Ta} = R_{si} + R_{1a} + \dots + R_{se}$$

Schicht b: Riegel $f_b = \frac{l_b}{l_{ges}}$

$$R_{Tb} = R_{si} + R_{1b} + \dots + R_{se}$$

Unter der Annahme eines eindimensionalen Wärmestroms senkrecht zu den Oberflächen des Bauteils, wird der obere Grenzwert des Wärmewiderstandes ermittelt.

Oberer Grenzwert: $R'_T = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}}}$

Zur Bestimmung des unteren Grenzwertes wird angenommen, dass alle Ebenen parallel zu den Oberflächen des Bauteiles, isotherm sind. Hierbei sind die Schichten wieder anteilmäßig zur Gesamtfläche den Widerständen angerechnet.¹⁴

Unterer Grenzwert: $R''_T = R_{si} + \frac{d_1}{\bar{\lambda}_1} + \dots + R_{se}$

$$\bar{\lambda}_1 = f_a \cdot \lambda_{a1} + f_b \cdot \lambda_{b1}$$

Nachfolgend muss der Wärmedurchgangskoeffizient mit den zulässigen Werten nach DIN 4108-2 sowie der EnEV 14/16, abgeglichen werden. Diese Nachweise müssen unter anderem für den Kontakt des Bauteils mit Außenluft, Erdreich und zu unbeheizten Räumen, geführt werden.

Wärmedurchgangswiderstand: $R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}$

Wärmedurchgangskoeffizient: $U = \frac{1}{R_T}$

¹⁴ vgl. LIERSCH, 2015, S. 61

4.2.2. Außenwand

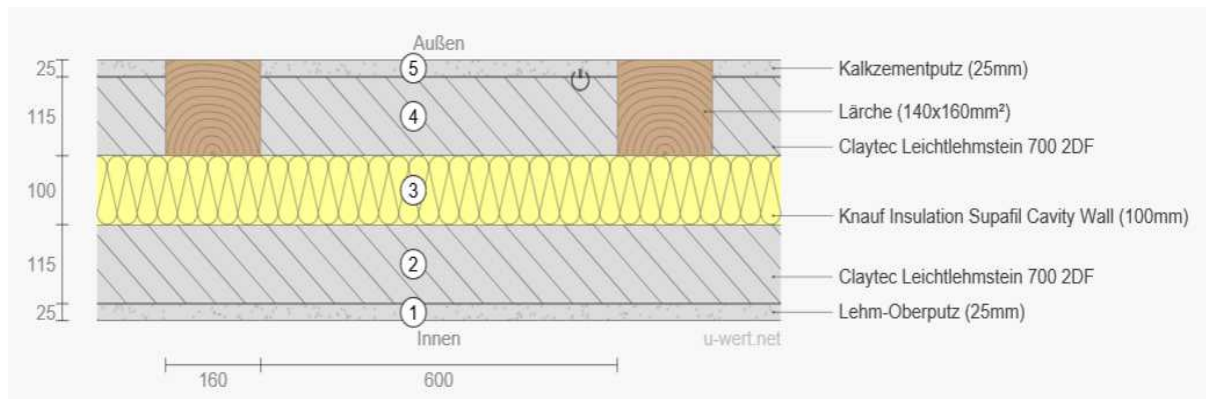


Abbildung 2: Wandaufbau

	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ	ρ [kg/m³]
	Innen			0,130		
1	Lehmoberputz	0,025	0,910	0,027	10/10	1500
2	Leichtlehmsteine	0,115	0,210	0,548	5/10	700
3	Dämmschüttung	0,100	0,035	2,857	1/2	35
4a	Leichtlehmsteine	0,115	0,210	0,548	5/10	700
4b	Lärchenholz	0,160	0,130	1,077	20/50	460
5	Kalkzementputz	0,025	1,000	0,025	15/35	1800
	Außen			0,040		
	Gesamt	0,380				

Nachweis EnEV 2014: Außenwand

Oberer Grenzwert:

$$\text{Schicht a: } f_a = \frac{0,60}{0,76} = 0,79$$

$$\text{Schicht b: } f_b = \frac{0,16}{0,76} = 0,21$$

$$R_{Ta} = 0,13 + 0,027 + 0,548 + 2,857 + 0,548 + 0,025 + 0,04 = 4,175$$

$$R_{Tb} = 0,13 + 0,027 + 0,548 + 2,857 + 1,077 + 0,04 = 4,679$$

$$R'_T = \frac{1}{\frac{0,79}{4,175} + \frac{0,21}{4,679}} = 4,272$$

Unterer Grenzwert:

$$\bar{\lambda}_1 = 0,79 \cdot 0,91 + 0,21 \cdot 0,91 = 0,91$$

$$\bar{\lambda}_2 = 0,79 \cdot 0,21 + 0,21 \cdot 0,21 = 0,21$$

$$\bar{\lambda}_3 = 0,79 \cdot 0,035 + 0,21 \cdot 0,035 = 0,035$$

$$\bar{\lambda}_4 = 0,79 \cdot 0,21 + 0,21 \cdot 0,13 = 0,193$$

$$\bar{\lambda}_5 = 0,79 \cdot 1,00 + 0,21 \cdot 0,13 = 0,817$$

$$R''_T = 0,13 + \frac{0,025}{0,91} + \frac{0,115}{0,21} + \frac{0,10}{0,035} + \frac{0,115}{0,193} + \frac{0,025}{0,817} + 0,04 = 4,228$$

Wärmedurchgangswiderstand: $R_T = \frac{4,272 + 4,228}{2} = 4,250 \text{ m}^2\text{K/W}$
Wärmedurchgangskoeffizient: $U = \frac{1}{4,250} = 0,235 < 0,28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Der Innenputz ist ein einheitlicher Lehm-Oberputz. Dieser wirkt feuchteausgleichend auf das Raumklima, lässt sich einfach verarbeiten und eignet sich gut für diffusionsoffene Konstruktionen. Jedoch ist die Oberfläche nicht wasserfest, nur wenig wischfest und im Gesamten, weniger strapazierfähig als andere Putze.

Die Leichtlehmsteine sind für die Anwendung nach Klasse 1a, für Vorsatzschalen und zur Ausmauerung der Gefache in Fachwerkhäusern, besonders gut geeignet.

Um einen guten Wärmedurchgangswert zu erreichen, ist es nach Berechnungen nicht ausreichend gewesen, den Wandaufbau mit Stampflehm oder mit Lehm-Blähglas zu konstruieren (siehe Anhang 1 und 2). Daher ist es erforderlich wärmedämmende Materialien in die Konstruktion zu integrieren. Lehmputzplatten bieten aufgrund ihrer geringen Dicke nur bedingte Erfolge. Die Wärmeeinsparung wird deutlich besser, bei Verwendung von Dämmschüttungen. Ein sehr effektives Produkt wird von dem Hersteller Knauf Insulation angeboten. Das ist ein bauaufsichtlich, zugelassener mineralischer Dämmstoff, einblasbar in Hohlräume und resistent gegen Schimmelbefall. Gemäß der DIN EN 13501-1 ist Knauf Insulation Supafil Cavity Wall, als Material der Baustoffklasse A1 nichtbrennbar eingestuft.

Der Außenputz besteht aus Kalk und Zement, da Lehmputze sowie Kalkputze, aufgrund ihrer geringen Dauerhaftigkeit, nicht für den Außenbereich geeignet sind. Zudem sind Kalkzementputze auch etwas härter und dichter.

Alle Riegel und Ständer des Außenfachwerkes sind aus Lärchenholz hergestellt. Lärche ist sehr robust und für den Außenbereich gut geeignet.¹⁵

¹⁵ online: PLAG, 2017 (14.07.2017)

Unterer Grenzwert:

$$\bar{\lambda}_1 = 0,83 \cdot 0,13 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,13$$

$$\bar{\lambda}_2 = 0,83 \cdot 0,40 + 0,17 \cdot 0,40 = 0,40$$

$$\bar{\lambda}_3 = 0,83 \cdot 0,04 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,06$$

$$\bar{\lambda}_4 = 0,83 \cdot 0,14 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,14$$

$$\bar{\lambda}_5 = 0,83 \cdot 0,13 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,13$$

$$\bar{\lambda}_6 = 0,83 \cdot 0,40 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,35$$

$$\bar{\lambda}_7 = 0,83 \cdot 1,40 + 0,17 \cdot 1,40 = 1,40$$

$$R''_T = 0,17 + \frac{0,01}{0,13} + \frac{0,002}{0,40} + \frac{0,14}{0,06} + \frac{0,016}{0,14} + \frac{0,024}{0,13} + \frac{0,002}{0,35} + \frac{0,10}{1,40} + 0,04 = 3,00$$

Wärmedurchgangswiderstand: $R_T = \frac{3,323+3,00}{2} = 3,162 \text{ m}^2\text{K/W}$
Wärmedurchgangskoeffizient: $U = \frac{1}{3,162} = 0,316 < 0,35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Der Fußbodenaufbau kann sehr unterschiedlich sein. Früher sind Fachwerkhäuser komplett Luftumspült gewesen, sozusagen standen die Fußbodenhölzer auf Steine oder ähnliche Fundamente, in einer Höhe von bis zu 50cm. Dieser Hohlraum schützt das Holz vor Durchfeuchtung und somit auch von Fäulnis oder andere feuchteabhängige Schäden. Das wird immer noch so gebaut, allerdings mit einer schmaleren Luftschicht, auf Beton- oder Bruchsteinfundamenten und mit Mauerwerk umfasst. Die Dämmschüttung besteht aus Holzfasern. Anwendbar als Einblasdämmung in Hohlräumen, sowie gepresst als Dämmplatten. Das Produkt ist Umweltfreundlich, nicht toxisch und enthält auch keinerlei bedenkliche Stoffe oder Zusätze. Allerdings anders wie bei Lehmschüttungen, muss nach der Dämmschicht, in Richtung Innenbereich eine Dampfsperre eingebaut werden. Ansonsten kann sich Tauwasser bilden, welches von den Holzfasern aufgesaugt wird und es zu einer Schimmelbildung kommen kann.¹⁶

¹⁶ online: PLAG, 2017 (18.07.2017)

4.2.4. Zwischendecke

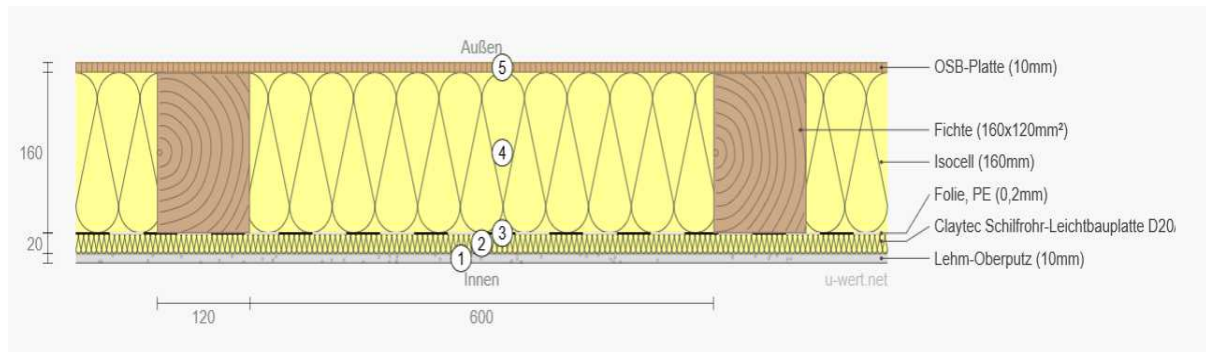


Abbildung 4: Deckenaufbau

	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ	ρ [kg/m³]
	Innen			0,100		
1	Lehmputz	0,010	0,910	0,011	5/10	1500
2	Schilfrohrplatte	0,020	0,065	0,308	3/5	145
3	PE-Folie	0,002	0,400	0,001	-	930
4a	Zellulose	0,160	0,040	4,000	1/2	60
4b	Fichtenholz	0,160	0,130	1,231	20/50	450
5	OSB-Platte	0,010	0,130	0,077	30/300	650
	Außen			0,100		
	Gesamt	0,200				

Nachweis EnEV 2014: Decke zu unbeheizten Räumen

Oberer Grenzwert:

$$\text{Schicht a: } f_a = \frac{0,60}{0,72} = 0,83$$

$$\text{Schicht b: } f_b = \frac{0,12}{0,72} = 0,17$$

$$R_{Ta} = 0,10 + 0,011 + 0,308 + 0,001 + 4,000 + 0,077 + 0,10 = 4,597$$

$$R_{Tb} = 0,10 + 0,011 + 0,308 + 0,001 + 1,231 + 0,077 + 0,10 = 1,828$$

$$R'_T = \frac{1}{\frac{0,83}{4,597} + \frac{0,17}{1,828}} = 3,656$$

Unterer Grenzwert:

$$\bar{\lambda}_1 = 0,83 \cdot 0,91 + 0,17 \cdot 0,91 = 0,91$$

$$\bar{\lambda}_2 = 0,83 \cdot 0,065 + 0,17 \cdot 0,065 = 0,065$$

$$\bar{\lambda}_3 = 0,83 \cdot 0,40 + 0,17 \cdot 0,40 = 0,40$$

$$\bar{\lambda}_4 = 0,83 \cdot 0,04 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,055$$

$$\bar{\lambda}_5 = 0,83 \cdot 0,13 + 0,17 \cdot 0,13 = 0,13$$

$$R''_T = 0,10 + \frac{0,01}{0,91} + \frac{0,02}{0,065} + \frac{0,002}{0,40} + \frac{0,16}{0,055} + \frac{0,01}{0,13} + 0,10 = 3,510$$

Wärmedurchgangswiderstand: $R_T = \frac{3,656 + 3,510}{2} = 3,583 \text{ m}^2\text{K/W}$
Wärmedurchgangskoeffizient: $U = \frac{1}{3,583} = 0,28 < 0,35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Die Schilfrohr-Leichtbauplatte dient hauptsächlich als Träger für den Lehmputz. Allerdings besitzt diese, im Gegensatz zu einfachen Schilfrohrplatten, auch gute wärmedämmende Eigenschaften, was dazu führt, dass die Dämmwirkung des gesamten Systems besser wird.

Ähnlich wie beim Fußbodenaufbau muss, aufgrund der Zellulosefasern, ebenfalls eine Dampfsperre eingebaut werden, damit kein Tauwasserausfall eintritt. Die Zellulosefasern werden durch ein Recycling-Verfahren aus Tageszeitungspapier hergestellt und mittels spezieller Technik in die Hohlräume geblasen. Die Fasern sind nicht toxisch, enthalten keine bedenklichen Stoffe oder Zusätze und wirkend auch nicht Hautreizend. Beim Einbringen der Fasern verfilzen diese sich innerhalb der Konstruktion, zu einer passgenauen und fugenfreien Dämmmatte.¹⁷

¹⁷ online: PLAG, 2017 (21.07.2017)

4.2.5. Dach

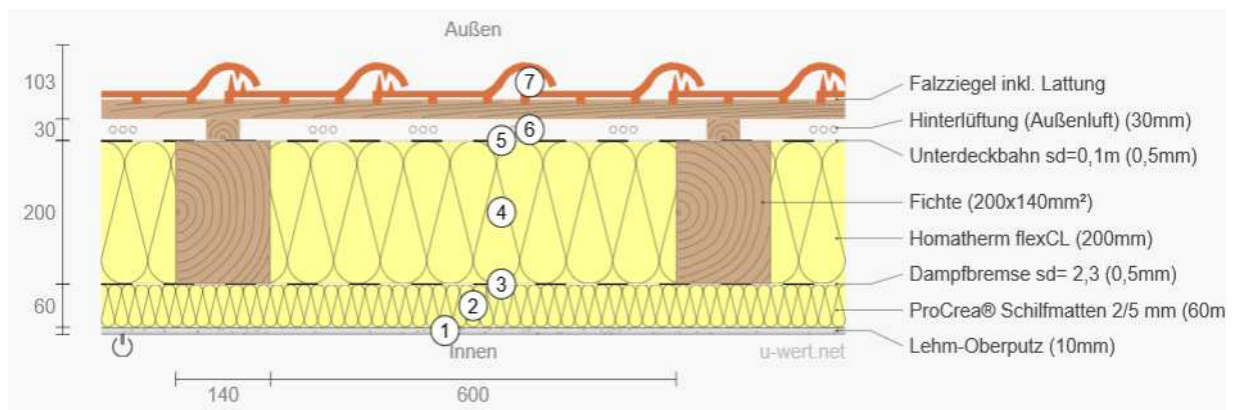


Abbildung 5: Dachaufbau

	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ	ρ [kg/m³]
	Innen			0,100		
1	Lehmputz	0,010	0,910	0,011	5/10	1500
2	Schilfmatte	0,060	0,050	1,200	6/8	150
3	Dampfbremse	0,005	0,220	0,002	4600/4600	130
4a	Zelluloseplatte	0,200	0,042	4,762	2/3	70
4b	Fichtenholz	0,200	0,130	1,538	20/50	450
5	Unterdeckbahn	0,005	0,500	0,001	200/200	350
4	Hinterlüftung	0,030	-	-	1/1	-
5	Falzziegel,inkl. Latt.	0,103	-	-	5/10	500
	Außen			0,040		
	Gesamt	0,404				

Nachweis EnEV 2014: Dach

Oberer Grenzwert:

$$\text{Schicht a: } f_a = \frac{0,60}{0,74} = 0,81$$

$$\text{Schicht b: } f_b = \frac{0,14}{0,74} = 0,19$$

$$R_{Ta} = 0,10 + 0,011 + 1,20 + 0,002 + 4,762 + 0,001 + 0,04 = 6,116$$

$$R_{Tb} = 0,10 + 0,011 + 1,20 + 0,002 + 1,538 + 0,001 + 0,04 = 2,892$$

$$R'_T = \frac{1}{\frac{0,81}{6,116} + \frac{0,19}{2,892}} = 5,047$$

Unterer Grenzwert:

$$\bar{\lambda}_1 = 0,81 \cdot 0,91 + 0,19 \cdot 0,91 = 0,91$$

$$\bar{\lambda}_2 = 0,81 \cdot 0,05 + 0,19 \cdot 0,05 = 0,05$$

$$\bar{\lambda}_3 = 0,81 \cdot 0,22 + 0,19 \cdot 0,22 = 0,22$$

$$\bar{\lambda}_4 = 0,81 \cdot 0,04 + 0,19 \cdot 0,13 = 0,06$$

$$\bar{\lambda}_5 = 0,81 \cdot 0,50 + 0,19 \cdot 0,50 = 0,50$$

$$R''_T = 0,10 + \frac{0,01}{0,91} + \frac{0,06}{0,05} + \frac{0,005}{0,22} + \frac{0,20}{0,06} + \frac{0,005}{0,50} + 0,04 = 4,717$$

Wärmedurchgangswiderstand: $R_T = \frac{5,047+4,717}{2} = 4,882 \text{ m}^2\text{K/W}$
Wärmedurchgangskoeffizient: $U = \frac{1}{4,882} = 0,20 < 0,20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Homatherm flexCL ist ein leistungsstarker Dämmstoff für Wärme- und Schallschutzanforderungen. Die Platten werden aus Tageszeitungspapier hergestellt, sind biegsam und höchst anpassungsfähig. Zudem ist das Material dampfdiffusionsoffen und damit gut geeignet für Fachwerkhäuser oder Lehmmaterialien. In diesem System ist es notwendig eine Unterdeckbahn einzubauen, damit keine Nässe durch Regen in die Konstruktion gelangen kann. Zusätzlich ist eine Dampfbremse einzubauen, welche die Dämmung durch aufsteigende Feuchtigkeit, aus den Nutzräumen, schützt. Die Schilfmatte dient wieder als Träger für den Lehmputz und zur Verbesserung der Wärmedämmung.¹⁸

¹⁸ online: PLAG, 2017 (25.07.2017)

4.3. Wärmebrücken

Wärmebrücken müssen im Wärmeschutznachweis nach EnEV berücksichtigt werden. Die Ermittlung kann rechnerisch über den Wärmebrückenkorrekturwert, sowie über einen detaillierten Nachweis der einzelnen Wärmebrückenverlustkoeffizienten erfolgen.

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Bereiche in der wärmeübertragenden Hüllfläche eines Gebäudes, bei denen ein erhöhter Wärmefluss vorkommt. Das spiegelt sich an der raumseitigen Oberflächentemperatur wieder, diese zwangsläufig niedriger ausfällt. Ebenso können Wärmebrücken bei Fenster- oder Dachanschlüssen sowie bei durchdringenden Materialien, wie Anker oder Verbindungsmittel, auftreten. Durch das Absenken der raumseitigen Oberflächentemperaturen vergrößern sich in diesem Bereich die Transmissionswärmeverluste. Diese Verluste werden durch den Wärmebrückenverlustkoeffizient (WBV) beschrieben.¹⁹

Unterteilt werden Wärmebrücken nach der Geometrie, nach dem Material und nach Planungs- oder Ausführungsfehler.

Stoff- oder materialbedingte Wärmebrücken entstehen durch einen Wechsel der Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Schichten des Bauteils. Typische Wärmebrücken sind hierbei Fensterstürze, Ringanker, Mörtelfugen oder Holzsparren einer Dachkonstruktion.

Geometriebedingte Wärmebrücken entstehen dort, wo die wärmeabgebende Außenoberfläche und die wärmeaufnehmende Innenoberfläche unterschiedlich groß sind. Das ist zum Beispiel an Gebäudeecken besonders der Fall. Geometrische Wärmebrücken können nicht vollständig vermieden, aber durch besondere Maßnahmen eingegrenzt werden. Im Fachwerkhausbau treten, aufgrund der Innendämmung, sehr häufig Wärmebrücken auf. Vor allem an den Fensterlaibungen gibt es Temperaturunterschiede, da eine Dämmung der Laibung dazu führen würde, dass die herkömmlichen Fenster nicht mehr offenbar sind. In diesem Fall könnte ein Holzkastenfenster eingebaut werden. Das Fenster hat eine 5-10 cm breite und gedämmte Laibung sowie einen breiteren Rahmen und kleinere Fensterflächen. Ein weiteres Problem sind die Innenkanten der Außenwände, diese bilden ebenfalls eine geometrische Wärmebrücke. Hier könnte auf eine Kante verzichtet werden, um somit den Temperaturunterschied durch eine Abrundung, zu reduzieren. Zudem sind alle Decken- oder Wandanschlüsse problematisch, da diese die Innendämmung unterbrechen.

Die hier gewählte Wandkonstruktion besteht aus einer Kerndämmung. Diese befindet sich zwischen dem Fachwerk oder der Ausfachung und der Vorsatzschale. Die Konstruktionsweise stellt aus bauphysikalischer Sicht, einer sehr gute Art der Dämmung dar. Eine Kerndämmung gleicht den Vorteilen einer Außendämmung, in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz mit einer deutlichen Reduzierung der thermischen Belastung des Dämmstoffes. Hierbei besteht auch keine Gefahr einer Durchfeuch-

¹⁹ online: BAUNETZ MEDIA GMBH, 2016 (21.07.2017)

tung von außen. Die gesamte Konstruktion ist diffusionsoffen und die Lehmprodukte hydrophob.²⁰

Laut Energieeinsparverordnung sind zu errichtende Gebäude so auszuführen, dass der Einfluss konstruktiver Wärmebrücken, bezogen auf den Jahres-Heizwärmebedarf so niedrig wie möglich gehalten wird. Die EnEV fordert, dass Wärmeverluste durch lineare Wärmebrücken zusätzlich berücksichtigt werden müssen. Bei der Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes ist der Einfluss von Wärmebrücken für Neubauten folgender Maßen zu berücksichtigen.

Der pauschale Wärmebrückenansatz ΔU_{WB} von 0,10 W/(m²K), kann bei Neubauten zu erheblichen Nachteilen führen. Der Wärmebrückenzuschlag kann durch einen Gleichwertigkeitsnachweis auf 0,05 W/(m²K) abgemindert werden. Dafür müssen allerdings Planungsdetails entsprechend des Beiblatts 2 der DIN 4108 vollständig eingehalten und umgesetzt werden. Die Gleichwertigkeit beinhaltet das konstruktive Grundprinzip, den Wärmedurchlasswiderstand der jeweiligen Schichten und einen Referenzwert einer Wärmebrückenberechnung.²¹

²⁰ online: KRUS, 2015 (02.08.2017)

²¹ online: BECKER, 2015, S. 11-13 (24.07.2017)

5. Sommerlicher Wärmeschutz

5.1. Grundlagen

Der sommerliche Wärmeschutz soll verhindern, dass durch Sonneneinstrahlung, eine Aufheizung der Räume und damit eine unzumutbare Nutzung entsteht. Im Gegensatz zum winterlichen Wärmeschutz, ist der sommerliche nur eine Empfehlung und keine Anforderung. Die DIN 4108 gibt allgemeine Hinweise zu Konstruktionen, nichttransparenter Außenbauteile, sowie Empfehlungen zur Energiedurchlässigkeit von Fenstern. Im Sommer sind die Schwankungen der Außenlufttemperatur, in der Regel höher als im Winter. Dazu kommt ein sehr hoher Temperaturunterschied an den Bauteiloberflächen, infolge der Sonneneinstrahlung. Soll das Raumklima in einen akzeptablen Bereich bleiben, sind Maßnahmen zur Kühlung erforderlich. Dabei sollte auf den Einsatz von Klimatisierungsgeräten verzichtet werden. Überhitzungen können durch sinnvolle Wandkonstruktionen oder Sonnenschutzsysteme, effektiv vorgebeugt werden.²²

Natürliche Dämmstoffe haben neben ihrer Umweltverträglichkeit, meist auch die qualitativ besseren Eigenschaften, im Gegensatz zu den herkömmlichen Dämmstoffen. Diese sind in der Lage eine gewisse Menge an Feuchtigkeit aufzunehmen, ohne dass ihre Dämmwirkung spürbar nachlässt. In Fachwerk- oder Holzhäuser werden oft Zelluloseflocken verwendet, aufgrund der Einblastechnik kommt die Dämmung in jeden Hohlraum und gewährleistet somit eine gleichmäßige Verteilung. In Verbindung mit Lehmbaustoffen in Form von Lehmputzen oder Ausmauerungen der Gefache mit Lehmsteinen, erhält das Haus so einen ausgezeichneten Wohnkomfort. Zudem regelt der Lehm das Raumklima selbstständig, das im Sommer bei meist hoher Luftfeuchtigkeit, ein Vorteil darstellt.²³

5.2. Wärmespeicherfähigkeit

Je schwerer ein Baustoff ist, desto mehr Energie kann gespeichert werden. Diese Fähigkeit wirkt sich direkt auf das Wohlbefinden und der Behaglichkeit der Bewohner aus. Da hierbei der größte Teil als Wärmestrahlung abgegeben wird. Diese elektromagnetische Strahlung ist die angenehmste Wärme, weil sie in etwa wie die Sonnenstrahlung agiert. Hierbei wird nicht die Luft aufgeheizt, sondern jene Oberfläche die sie trifft.

Bei einschaligen Massivwänden werden sogar während der Heizperiode bei Sonneneinstrahlung Wärmegewinne erzielt, da die außenseitig aufgewärmte Wand die Heizenergie von Innen nicht abfließen lässt. Ebenso wird die eindringende Strahlung, durch Fenster, als Energie gespeichert. Bei geringer Wärmespeicherfähigkeit, von raumumschließenden Bauteilen, kann die Temperatur der inneren Wandoberfläche

²² online: BAUNETZ MEDIA GMBH, 2016 (20.07.2017)

²³ online: SCHLAUCH, 2004 (03.08.2017)

ohne Heizwärme, in Sekunden absinken. Die Wärmespeicherfähigkeit berechnet sich nach Temperaturdifferenz pro Kelvin. Hierbei ist die spezifische Wärme maßgebend, diese ist die erforderliche Energie, ein Kilogramm eines Baustoffs um ein Kelvin zu erhöhen.

Bei Schwankungen der Lufttemperatur und Wärmeeinstrahlung, wird sich der wärmespeichernde Stoff, auf ein mittleres Temperaturniveau einpendeln. Das ist vor allem im Sommer vorteilhaft, wenn zum Beispiel durch Nachtlüftung, innere Speichermasse für den Tag gekühlt wird oder im Winter die eingestrahlte Sonnenenergie für die Nacht zu speichern.²⁴

Am wirkungsvollsten lassen sich Speichermassen im Hausinneren, in den Innenwänden und Decken unterbringen. Die Außenwände sollten in nördlichen Himmelsrichtungen, eher wärmedämmend als speichernd sein. Bei Fachwerkhäusern wird die Dämmung meist Innen eingebaut, dabei steuert die außenliegende Speichermasse die Tag/Nacht-Temperaturschwankungen und hebt so das Temperaturniveau der Außenschale auf eine höhere Mitteltemperatur an. Vorteil davon, die Innendämmung kann dünner aber bei gleichen Wirkungsgrad, angeordnet werden. Diese effektivere Nutzung der Sonnenenergie, wird durch das heute weit verbreitete einpacken der Häuser mit gigantischen Dämmschichtdicken, ausgeschlossen.

Für ein behagliches Wohnklima ist es somit wichtig, dass die eingestrahlte Energie, auch lange im Mauerwerk gespeichert wird und nur langsam wieder abgegeben wird. Der Vorgang wird als Auskühlzeit definiert. Dieser charakterisiert somit das Auskühlverhalten eines Bauteils im Winter oder das Aufwärmen im Sommer.²⁵

$$\text{Auskühlzeit: } t_a = \frac{Q \cdot R}{3,6} \text{ [h]}$$

$$\text{Wärmespeicherfähigkeit: } Q = d \cdot \rho \cdot c \text{ [kJ/m}^2\text{K]}$$

$$\text{Wärmedurchlasswiderstand: } R = \frac{d}{\lambda}$$

$$Q_1 = 0,025 \cdot 1500 \cdot 1,0 = 37,5 \quad R_1 = 0,025 \div 0,91 = 0,027$$

$$Q_2 = 0,115 \cdot 700 \cdot 1,0 = 80,5 \quad R_2 = 0,115 \div 0,21 = 0,548$$

$$Q_3 = 0,100 \cdot 35 \cdot 1,03 = 3,61 \quad R_3 = 0,100 \div 0,035 = 2,857$$

$$Q_4 = 0,115 \cdot 700 \cdot 1,0 = 80,5 \quad R_4 = 0,115 \div 0,21 = 0,548$$

$$Q_5 = 0,025 \cdot 1800 \cdot 1,0 = 45,0 \quad R_5 = 0,025 \div 1,0 = 0,025$$

²⁴ online: WIENERBERGER, 2017 S. 6-7 (20.07.2017)

²⁵ vgl. VOLHARD, 2013, S. 208

Auskühlzeit: 1 Lehmoberputz	$37,5 \cdot 0,027 \div 3,6 = 0,281$
2 Leichtlehmstein	$80,5 \cdot 0,548 \div 3,6 = 12,25$
3 Schüttung	$3,61 \cdot 2,857 \div 3,6 = 2,865$
4 Leichtlehmstein	$80,5 \cdot 0,548 \div 3,6 = 12,25$
5 Kalkzementputz	$45,0 \cdot 0,025 \div 3,6 = 0,313$
<u>Gesamt</u>	<u>ca. 28 Stunden</u>

Um das zu verdeutlichen, liegt die Wärmespeicherfähigkeit einer Ziegelwand bei ähnlichem Aufbau und Dämmung bei $274 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ (hier 232) und einer Auskühlzeit von rund 36 h (hier 28). Somit ist die Lehmbauweise etwas schlechter wie die Bauart mit Ziegel. Die Wärmespeicherung von mittleren bis schweren Leichtlehm mit 800 bis 1200 kg/m^3 , entspricht in etwa der von Massivbaustoffen bei gleicher Dichte. Organische Zuschläge im Lehm wie Holzhackschnitzel oder Stroh, haben eine höhere spezifische Wärme und verbessern die Wärmespeicherfähigkeit mit steigendem Zuschlaganteil, um 10 bis 60 % des Raumgewichts.²⁶

5.3. Wärmedämmung

Wie stark und mit welcher Zeitverschiebung sich Schwankungen der Außentemperatur an der Innenoberfläche bemerkbar machen, wird durch die Wärmedämmung ausgedrückt. Grundsätzlich können gute Ergebnisse durch Wärmedämmung oder Wärmespeicherung erreicht werden. Je mehr die mittlere Außentemperatur von der normalen Innentemperatur abweicht, desto höher ist die Erforderlichkeit einer Wärmedämmung.

Mittels einer Simulation kann dieser Temperaturverlauf dargestellt werden. Berücksichtigt wird die Tageszeitliche Schwankung und die Speicherfähigkeit der Baustoffe. Für die Simulation wird eine periodisch schwankende Temperatur der Außenluft angenommen, zum Beispiel sinusförmig zwischen 15°C und 35°C . Das Ergebnis ist der zeitliche Temperaturverlauf auf der inneren und äußeren Wandoberfläche. Der Vergleich der beiden Verläufe, gibt einen Aufschluss über die Verringerung und die Verzögerung der Temperaturschwankung auf der Innenseite. Darstellbar wird das mit der Temperaturamplitudendämpfung sowie der Phasenverschiebung.

Die Temperaturamplitudendämpfung beschreibt wie stark die Temperatur an der Innenoberfläche der Wand, im Vergleich zur Außenoberfläche schwankt.²⁷

²⁶ vgl. VOLHARD, 2013, S. 205

²⁷ online: PLAG, 2017 (30.07.2017)

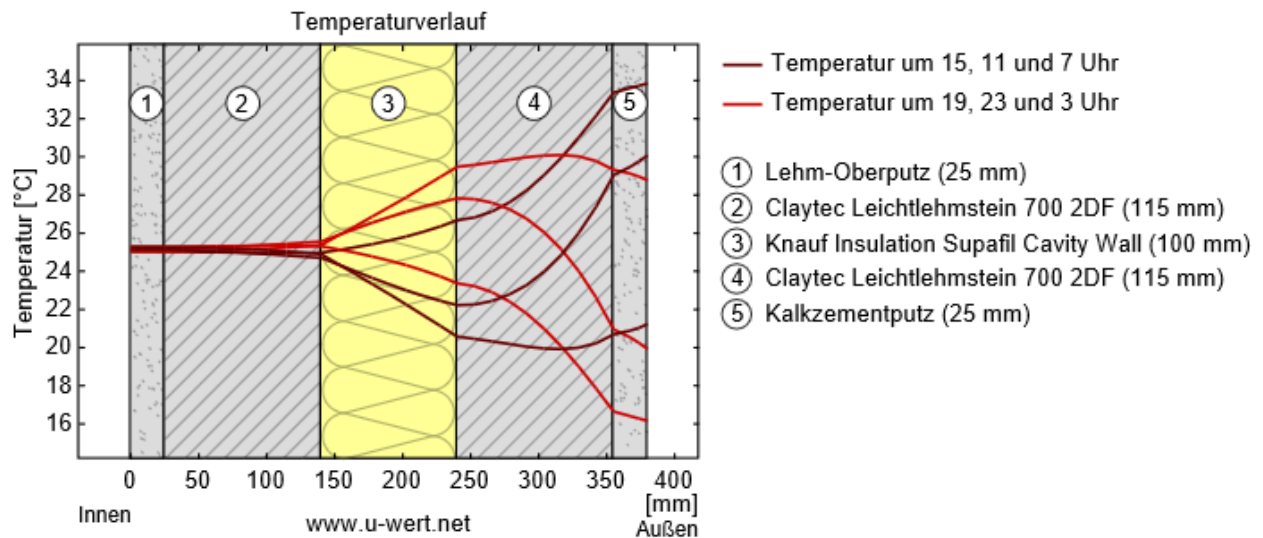


Abbildung 6: Tagedtemperaturverlauf

Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Abzulesen ist jeweils von oben nach unten.

Braune Linien: 15, 11, 07 Uhr

Rote Linien: 19, 23, 03 Uhr

In dieser Darstellung ist die Temperatur auf den äußeren (Rot) und inneren (Blau) Oberflächen, im Verlauf eines Tages zu sehen. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Temperaturphasenverschiebung der Außenwand:

Temperaturdifferenz außen: $\Delta T_a = 34^\circ\text{C} - 16,2^\circ\text{C} = 17,8^\circ\text{C}$

Temperaturdifferenz innen: $\Delta T_i = 25,4^\circ\text{C} - 24,8^\circ\text{C} = 0,6^\circ\text{C}$

Temperaturamplitudendämpfung: $C = 17,8^\circ\text{C} / 0,6^\circ\text{C} = 30$

Temperaturamplitudenverhältnis: $TAV = 1/30 = 0,033$

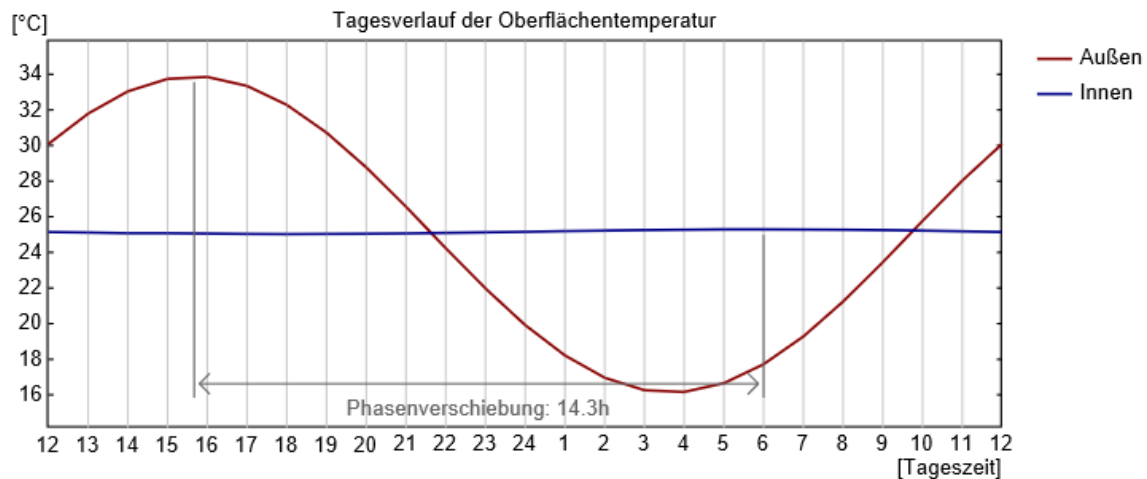


Abbildung 7: Phasenverschiebung

Ein Wert von 30 bedeutet, dass die äußere Oberfläche 30 mal stärkere Temperaturschwankungen aufweist, wie die Innere. Dieser Wert ist relativ hoch, gute Werte liegen bei 20 und höher.

Die zeitliche Verzögerung der Temperaturkurve, wird durch die Phasenverschiebung beschrieben. Das ist die Zeit in Stunden, zwischen der maximalen Temperatur der Außen- und Innenoberfläche. Ein Wert von 14,3 bedeutet, dass die maximale Innentemperatur 14,3 Stunden, nach dem Maximum der äußeren Oberflächentemperatur, erreicht wird. Idealerweise ist eine Phasenverschiebung von 10-12 Stunden, weil dann das Temperaturmaximum der inneren Oberfläche in der zweiten Nachthälfte erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt könnte der Wärmeeintrag durch Lüften ausgeglichen werden.

Baukonstruktionen mit Lehmbauteilen dämpfen die Temperaturschwankungen hervorragend. Zusätzlich wird durch eine hohe Oberflächentemperatur ein ausgezeichnetes Raumklima geschaffen. Diese Eigenschaften sind mit speichernden, aber wärmeleitenden Stoffen nur durch zusätzliche Wärmedämmung erreichbar.²⁸

Je weiter innen die speicherfähige Masse angeordnet wird, desto höher ist deren Beitrag zum Hitzeschutz. Die Innendämmung hat so gut wie keinen Einfluss auf den Hitzeschutz. Diese trägt nur zum winterlichen Wärmeschutz bei. Grund dafür ist der direkte Kontakt der heißen Außenluft zur Speichermasse. Hierbei ist der Energieeintrag und somit die Erwärmung besonders hoch. Durch eine thermische Entkopplung, zum Beispiel bei einer Außendämmung, reduziert sich der Energieeintrag in den relevanten Schichten deutlich.

²⁸ online: PLAG, 2017 (30.07.2017)

6. Feuchteschutz

6.1. Grundlagen

Für die bauphysikalische Bewertung steht, hinsichtlich des Feuchteschutzes, die DIN 4108-3 im Vordergrund. Diese muss zwingend angewendet werden, da die rechnerischen Nachweise zum Tauwasserausfall innerhalb der Konstruktionen, bereits in der Bauantragsplanung erforderlich sind. Rechnerisch nachzuweisen ist die Diffusion der Konstruktion, die anfallende Tauwasser- und Verdunstungsmasse, die Luftdichtheit, sowie die Dampfdruckverteilung und erläuternd den Schutz gegen Schlagregen. Mit diesen unterschiedlichen Zielen verbindet die DIN 4108-3 den Feuchteschutz, mit dem Erhalt der energetischen Qualität der Konstruktion.

Aus denkmalpflegerischen oder ästhetischen Aspekten, wird in Fachwerkhäusern meist eine Innendämmung eingebaut. Die Dämmung einer Wand von innen, bringt aus bauphysikalischen Gründen, häufige Probleme mit sich.²⁹

Grundmechanismen des Feuchttransports in einer Fachwerkwand während der Heizperiode

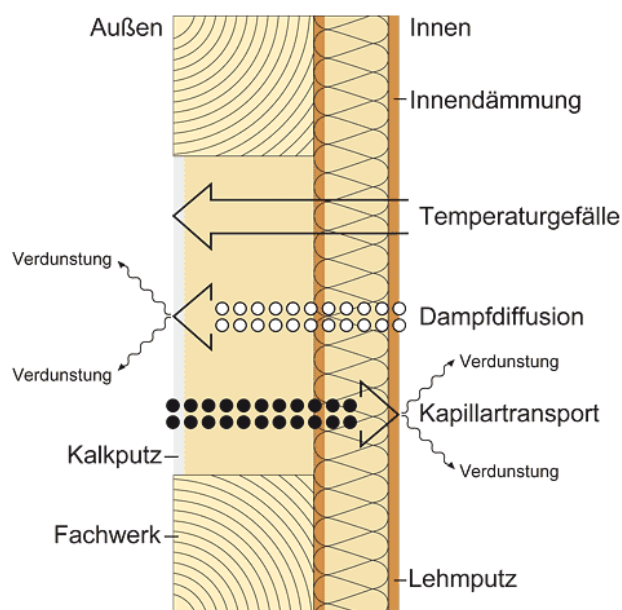


Abbildung 8: Feuchttransport

(online: HISS UND REET, 2017)

Der Feuchttransport durch Bauteile findet mittels Diffusion und Konvektion oder Kapillarität statt. Bei der Dampfdiffusion wandert, aufgrund des Druckausgleichs, die Luft mit höherem Dampfdruck zu der Luft mit dem niedrigeren Dampfdruck. Dabei entsteht ein Dampfdruckgefälle und die Luft kühlt sich innerhalb des Bauteils ab, dort kann es im ungünstigsten Fall zu Tauwasserausfall kommen. Durch eine Innendämmung rückt der Taupunkt, der Punkt an dem Wasserdampf kondensiert, bei einer Wandkonstruktion weiter nach innen. Diese Problematik kann durch den Einbau von

²⁹ online: HISS UND REET, 2017 (02.08.2017)

Dampfsperren oder Dampfbremsen verhindert werden, bei einem Fachwerkaus in dieser Bauart, scheidet das jedoch aus. Hierbei besteht Gefahr von Feuchtekonvektion und damit eine erhöhte Menge an Tauwasserausfall. Daher wird bei diffusionsoffenen Konstruktionen von einer Dampfsperre abgeraten.³⁰

Bauteile können durch Schlagregen, Spritzwasser, Bodenfeuchte oder Kondenswasser Feuchtigkeit aufnehmen, in welcher Zeit und Menge wird durch die Kapillarität beschrieben. Im Umkehrschluss bestimmt diese auch die Austrocknungsgeschwindigkeit, in denen durch Diffusion transportierter Wasserdampf zu Wasser auskondensiert wird.

Die nach der DIN 4108 errechnete Tauwassermenge überschreitet, bei vorhandenen Innen- oder Kerndämmungen, oft die zulässige Menge. Somit wird ein diffusionsoffener Wandaufbau sowie die Verwendung von hygroskopischen Materialien wie Lehm, empfohlen. Lehm ist in der Lage, anfallendes Tauwasser aufzunehmen und aufgrund der Kapillarität auch wieder abzugeben. Die Kombination von Fachwerkhäuser und Lehmmaterialien, hat sich über viele Jahre bewiesen. Ebenfalls bewährt hat sich die Kombination aus Lehm und Schilfrohr als Putzträger, bei Unterdecken. Durch den hohen Silikatgehalt des Schilfrohres wird kaum Feuchtigkeit aufgenommen und die Dämmwirkung bleibt dauerhaft erhalten. Lehm ist durch seine hohe Hygroskopizität in der Lage anfallende Feuchtigkeit aufzunehmen und wieder abzugeben. Dabei wirkt der Lehm auf das Schilfrohr konservierend schützt das System vor Schäden. Zudem beeinflusst der Lehm die Raumluft positiv, indem er die Raumluftfeuchte konstant hält und Schadstoffe absorbiert.

6.2. Tauwassernachweis der Außenwand mittels Glaser-Verfahren

6.2.1. Berechnungsablauf

Tauwasserausfall innerhalb von Bauteilen kann nur dann auftreten, wenn der Wasserdampfteildruck den Wert des Wasserdampfsättigungsdruckes erreicht. Das kann an einer oder an mehreren Stellen, beziehungsweise in einer ganzen Zone des Bauteils der Fall sein. Zur Berechnung der vorhandenen Tauwassermenge sowie an welchen Stellen die Sättigungsgrenze erreicht wird, dienen die in der DIN 4108-3 erläuterte Diffusionsdiagramm und Tabellen. Welche nach seinem Urheber auch als Glaserverfahren bezeichnet werden.

Die Möglichkeit der Bildung von Tauwasser innerhalb eines Bauteils, hängt einerseits von den klimatischen Randbedingungen und andererseits von der Anordnung der Bauteilschichten und deren Wasserdampfdurchlässigkeit ab. Zudem muss der jeweilige Diffusionsverlauf im Winter (Tauperiode) und im Sommer (Verdunstungsperiode) berechnet, beziehungsweise dargestellt werden. Somit kann eine Gegenüberstellung

³⁰ online: NEUMANN, 2017 (30.07.2017)

gemacht werden, um zu sehen dass das anfallende Wasser auch wieder verdunsten kann. Die Untersuchung ob und wieviel Tauwasser sich im Inneren von Bauteilen befindet, erfolgt mittels Diffusionsdiagramme. Hierfür muss zunächst die Temperaturverteilung des Bauteilquerschnitts errechnet werden. Anschließend kann nach einer Näherungsformel oder bei Benutzung entsprechender Tabellen, die Verteilung des Wasserdampfsättigungsdruckes ermittelt werden. Befindet sich die Sättigungsdampfdrucklinie im gesamten Querschnitt über den tatsächlichen Dampfdruckverlauf, tritt somit keine Tauwasserbildung auf. Zudem gibt es noch drei weitere Varianten, indem sich diese Linien einmal, zweimal oder in einem Bereich berühren. Aus einer dieser möglichen Varianten, wird die Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke sowie die Berechnungsformel für die Tauwasser- und Verdunstungsmenge ermittelt. Aus der Differenz der Wasserdampfdiffusionsstromdichte, die von innen her in das Bauteil diffundiert und die der nach außen heraus diffundiert, wird die Tauwassermenge ermittelt. Bei der Verdunstung durch Diffusion unter Sommerbedingungen wird davon ausgegangen, dass im Tauwasserbereich ein Sättigungsdampfdruck herrscht. Die Verdunstung erfolgt nach beiden Seiten. Die Verdunstungsmenge muss immer größer, wie die anfallende Tauwassermenge sein.³¹

6.2.2. Temperaturverlauf

Die Berechnung des Temperaturverlaufes, ist die Voraussetzung für den Feuchtenachweis. Durch die Darstellung des Energieverlustes und den Verlauf der Sättigungsgrenze ist deutlich zu erkennen, wo eventuell ein Tauwasserausfall eintreten kann. Aus dem Wärmedurchgang lassen sich die Temperaturen in den einzelnen Schichten errechnen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Temperatur sich innerhalb der jeweiligen Schicht linear verändert. Aus dieser Verteilung über den Querschnitt des Bauteils, lassen sich die einzelnen Temperaturen an den Grenzen der Schichten ablesen. Der Nachweis eines Temperaturverlaufs ist prinzipiell in jeder Konstruktion sinnvoll. Nur ist in den anderen Bauteilen entweder eine Dampfsperre eingebaut (Fußboden, Zwischendecke) oder eine Hinterlüftung vorgesehen (Dach). Somit ist ein Tauwasserausfallrisiko sehr gering und auch die Trocknungsreserve bei diesen Bauteilen sehr viel höher.

Aus dem Produkt der vorangegangenen Temperatur des Schichtabhängigen Wärmedurchgangswiderstand und der Wärmestromdichte, in Abhängigkeit des Wärmedurchgangswert und der gewählten Innen- und Außentemperatur, kann an jeder Stelle die jeweilige Oberflächentemperatur ermittelt werden.

Unter den Begriff Wärmestrom, wird der Wärmemengentransport pro Zeiteinheit verstanden. Die Wärmestromdichte ist diejenige, die pro Zeit- und Flächeneinheit bezogen wird. Für die Konstruktion aus isotropen Materialien, berechnet sich die Wär-

³¹ online: UNIVERSITÄT STUTTGART, 2014 (07.08.2017)

mestromdichte für stationäre Randbedingungen und ohne innere Wärmequellen gemäß der folgenden Gleichung.³²

Wärmestromdichte: $q = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$

Die Berechnung des Temperaturverlaufs basiert auf der Annahme des eindimensionalen und stationären Wärmestroms. Für jede Stelle i ergibt sich folgende Formel.

Temperatur an Stelle i : $\theta_i = \theta_{i-1} - R_i \cdot q$

Temperaturverlauf: Außenwand Bereich A (Gefach)

$$q = 0,235 \cdot (20 - (-5)) = 5,88 \text{ W/m}^2$$

$$\theta_{si} = 20,00 - 0,130 \cdot 5,88 = 19,24 \text{ °C}$$

$$\theta_{1,2} = 19,24 - 0,027 \cdot 5,88 = 19,08 \text{ °C}$$

$$\theta_{2,3} = 19,08 - 0,548 \cdot 5,88 = 15,86 \text{ °C}$$

$$\theta_{3,4} = 15,86 - 2,857 \cdot 5,88 = -0,94 \text{ °C}$$

$$\theta_{4,5} = -0,94 - 0,548 \cdot 5,88 = -4,16 \text{ °C}$$

$$\theta_{se} = -4,16 - 0,025 \cdot 5,88 = -4,31 \text{ °C}$$

$$\theta_e = -4,31 - 0,040 \cdot 5,88 = -4,55 \text{ °C}$$

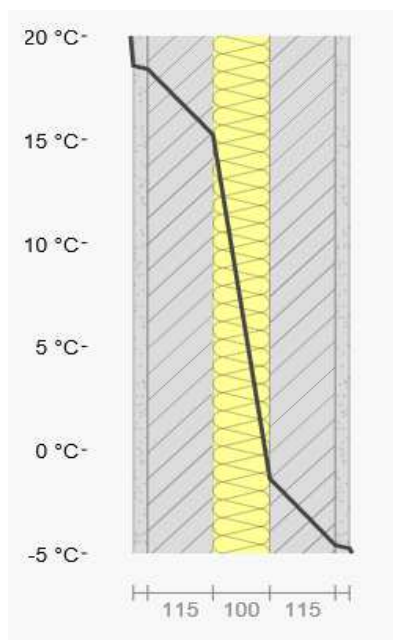


Abbildung 9: Temperaturverlauf

³² vgl. LIERSCH, 2015, S. 56

In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass in der Schicht mit dem größten Wärmedurchgangswiderstand (Dämmschüttung), der größte Temperatursprung zu beiden Seiten der Bauteilschicht stattfindet. Das bedeutet die Lage der Wärmedämmung hat großen Einfluss auf den Temperaturverlauf des Bauteils. Dadurch ergibt sich auch ein feuchteschutztechnischer Einfluss, der in den entsprechenden Nachweisen zu berücksichtigen ist.

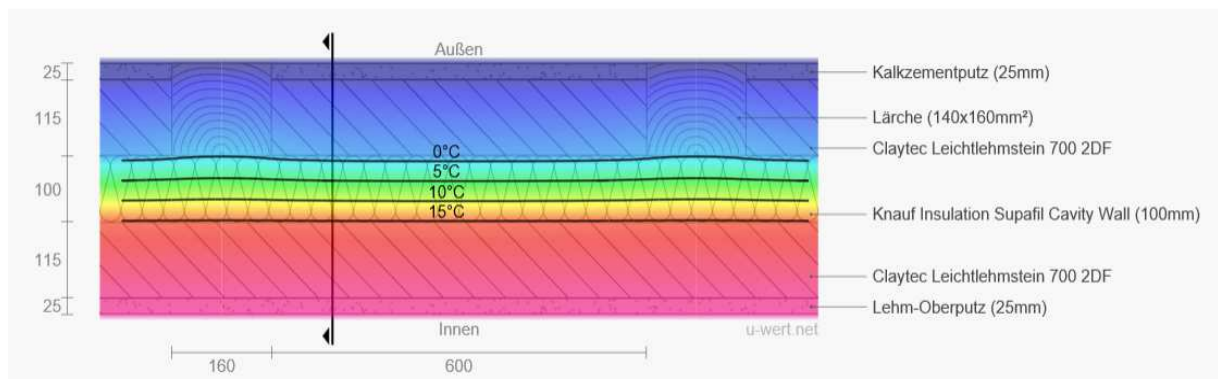


Abbildung 10: Schematischer Temperaturverlauf

In der Berechnung und in der Darstellung ist zu erkennen, dass die Zwischendämmung zum Teil im frostgefährdeten Bereich liegt. Durch den Temperaturverlauf ist auch die Grenztemperatur von ca. 12,6 °C zu erkennen, diese befindet sich ebenfalls in der Dämmschicht. Somit ist an dieser Stelle ein Kondensatausfall auf der Schichtoberfläche möglich, welches die Grundlage für einen Pilzbefall bildet. Das bringt nicht nur ein hygienisches sondern auch ein konstruktives Risiko. Da sich der Schimmelpilz bis zum Fachwerk ausbreiten und diesen schädigen könnte. Da Lehm allerdings eine sehr hohe Dampfdiffusionsfähigkeit aufweist, ist der Nachweis auf Trocknungsreserve maßgebend, ob eine Gefahr für Tauwasserausfall besteht.³³

6.2.3. Ermittlung der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

Unter dem sogenannten s_d – Wert, wird die Dicke einer ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdampfdiffusionswiderstand der betrachteten Bauteilschicht aufweist, berechnet. Diese Schichtdicke bestimmt den Widerstand eines Bauteils gegenüber Wasserdampfdiffusion. Für mehrschichtige, ebene Bauteile lassen sich die U-Werte additiv zu einem Bauteil zusammenfassen.

Maßgebend für die Berechnung der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke ist die Dampfdiffusionswiderstandszahl μ . Dieser Wert kennzeichnet den Wi-

³³ online: PLAG, 2017 (04.08.2017)

derstand, den ein Baustoff der Diffusion, der in der Luft enthaltenen Feuchte entgegengesetzt. Der μ -Wert von Leichtlehmbauteilen ist vergleichsweise sehr niedrig. Je nach Mischungsverhältnis schwankt dieser jedoch, ausschlaggebend ist der Anteil an Grobporen und deren Volumen. In der DIN 4108 sind für alle Lehmbaustoffe ein Richtwert von $\mu = 5/10$ festgelegt. Für die Berechnungen wird jeweils der ungünstigere Wert verwendet.³⁴

Die DIN 4108 unterscheidet im Teil 3, für die sich im Winter einstellenden Wasserdampfdruckverläufe, vier möglichen Fälle. Hierbei wird von einer zeitlich definierten Tau- bzw. Verdunstungsperiode ausgegangen. In dieser Wandkonstruktion ergibt sich eine Wasserdampfdiffusion mit Tauwasserbildung, in einem Bereich oder Zone des Bauteils.

Da die Nachweise mit dem Glaser-Verfahren modellhafte Berechnungen sind, bilden diese nicht die Realität ab. Neben den festgeschriebenen Berechnungsansätzen der jeweiligen Perioden, ist zu beachten, dass weitere feuchtetechnische Einflüsse, wie die Ausgleichsfeuchte von Baustoffen oder das Nutzerverhalten, unberücksichtigt bleiben. Dennoch bietet die Berechnung nach Glaser eine Hilfe zur Bewertung von Konstruktionen und Schichtaufbauten. Zum Beispiel sind die normativ festgelegten Randbedingungen, wie -5°C durchgehend über 90 Tage, nicht in allen Teilen Deutschlands zutreffend. Trotzdem sind die Grundbedingungen des Verfahrens positiv zu bewerten, da diese somit Sicherheiten beinhalten.³⁵

In der nachfolgenden Tabelle sind noch einmal die Schichten des Aufbaus der Außenwand dargestellt. Die äquivalente Luftschichtdicke ist das Produkt aus der Diffusionszahl und der jeweiligen Schichtdicke. Berechnet werden die Dicken jeweils bis zur Tauwassergrenze von innen und von außen sowie die komplette Tauwasserebene. Hierbei ist der minimale Wert, der Dampfdiffusionszahl, von innen und der maximale Wert von außen einzusetzen. Die verschiedenen Dicken werden anschließend in die Formeln eingesetzt, die zur Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungsmengen benötigt werden.

³⁴ vgl. VOLHARD, 2013, S. 212

³⁵ vgl. LIERSCH, 2015, S. 230

	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ	ρ [kg/m³]
	Innen			0,130		
1	Lehmoberputz	0,025	0,910	0,027	10/10	1500
2	Leichtlehmsteine	0,115	0,210	0,548	5/10	700
3	Dämmschüttung	0,100	0,035	2,857	1/2	35
4a	Leichtlehmsteine	0,115	0,210	0,548	5/10	700
4b	Lärchenholz	0,160	0,130	1,077	20/50	460
5	Kalkzementputz	0,025	1,000	0,025	15/35	1800
	Außen			0,040		
	Gesamt	0,380				

Schichten Außenwand (Analog 4.2.2)

$$s_d = \mu \cdot d$$

$$s_{d1} = 5 \cdot 0,025 = 0,125 \text{ m}$$

$$s_{d2} = 5 \cdot 0,115 = 0,575 \text{ m}$$

$$s_{d3} = 1 \cdot 0,100 = 0,100 \text{ m}$$

$$s_{d4} = 10 \cdot 0,115 = 1,150 \text{ m}$$

$$s_{d5} = 35 \cdot 0,025 = 0,875 \text{ m}$$

$$s_{di} = 0,125 + 0,575 + 0,100 = 0,800 \text{ m}$$

$$s_{dz} = s_{d4} = 1,150 \text{ m}$$

$$s_{de} = s_{d5} = 0,875 \text{ m}$$

Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

- von Innenoberfläche bis Tauwasserebene 0,800 m
- Tauwasserebene 1,150 m
- Von Tauwasserebene bis Außenoberfläche 0,875 m
- Gesamtes Bauteil 2,825 m

6.2.4. Tauperiode

Klimabedingungen: Tauperiode ein Tauwasserbereich

Dauer von Dezember bis Februar 90 Tage: $t_T = 2160 \text{ h}$

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit: $p_i = 2340 \cdot 0,5 = 1170 \text{ Pa}$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit: $p_e = 401 \cdot 0,8 = 321 \text{ Pa}$

Sättigungsdruck 1 bei -0,95°C und 100% Luftfeuchtigkeit: $p_{sw1} = 542 \cdot 1,0 = 542 \text{ Pa}$

Sättigungsdruck 2 bei -4,18°C und 100% Luftfeuchtigkeit: $p_{sw2} = 474 \cdot 1,0 = 474 \text{ Pa}$

$$m_{w,T} = \frac{t_T}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{p_i - p_{sw1}}{s_{di}} - \frac{p_{sw2} - p_e}{s_{de}} \right)$$

$$m_{w,T} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1170 - 542}{0,800} - \frac{474 - 321}{0,875} \right) = 0,879 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

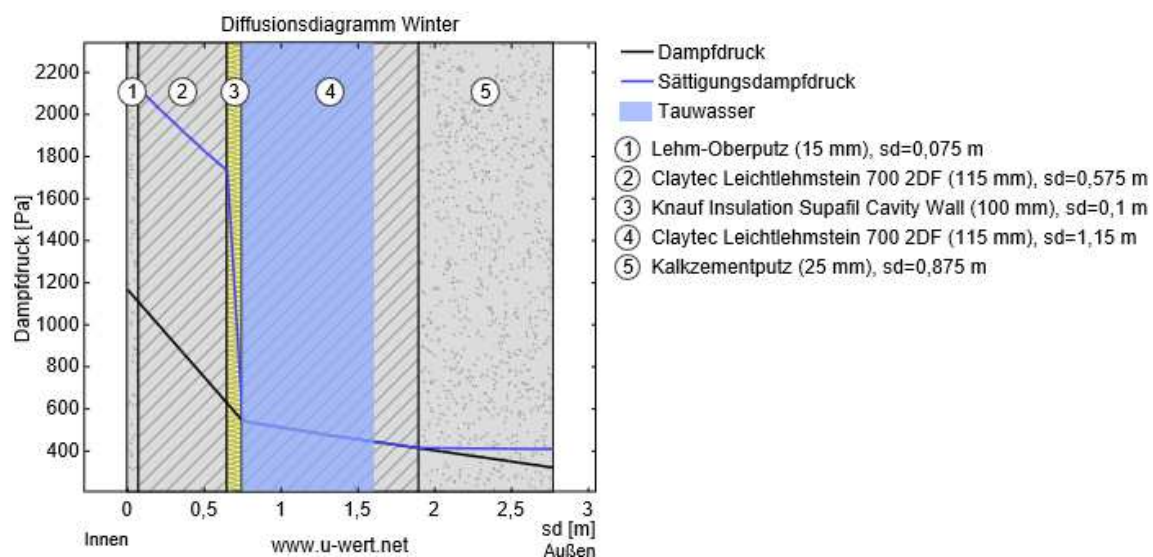


Abbildung 11: Diffusionsdiagramm im Winter (Außenwand)

Im Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass der Fall 4 des Glaser- Verfahrens mit einer Tauwasserebene, angewendet werden muss. Der Bereich des Tauwasserausfalls befindet sich innerhalb der Leichtlehmsteine im Gefach.

6.2.5. Verdunstungsperiode

Klimabedingungen: Verdunstungsperiode

Dauer von Juni bis August 90 Tage:

$$t_v = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 15°C und 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 1706 \cdot 1,0 = 1706 \text{ Pa}$$

$$m_{w,v} = \frac{t_v}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{p_{sw} - p_i}{s_{di} + 0,5 \cdot s_{dz}} + \frac{p_{sw} - p_e}{0,5 \cdot s_{dz} + s_{de}} \right)$$

$$m_{w,v} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1706 - 1194}{0,80 + 0,5 \cdot 1,15} + \frac{1706 - 1194}{0,5 \cdot 1,15 + 0,875} \right) = 1,055 \text{ kg/m}^2$$

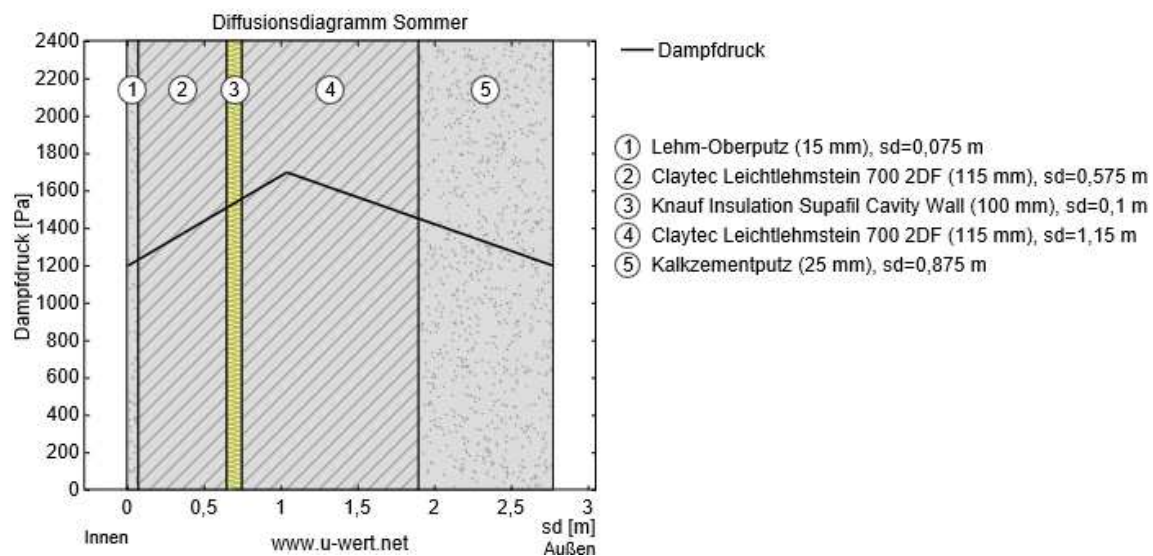


Abbildung 12: Diffusionsdiagramm im Sommer (Außenwand)

Nachweis der Tauwassermenge nach DIN 4108-3:

$$0,879 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 1,055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

≈ Nachweis erfüllt !

Nachweis der Trocknungsreserve nach DIN 68800-2:

$$m_{w,R} = (1,055 - 0,875) \cdot 1000 = 180 \text{ g/m}^2\text{a} > 100 \text{ g/m}^2\text{a} \quad \approx \text{Nachweis erfüllt !}$$

6.3. Tauwassernachweis des Fußbodenaufbaus

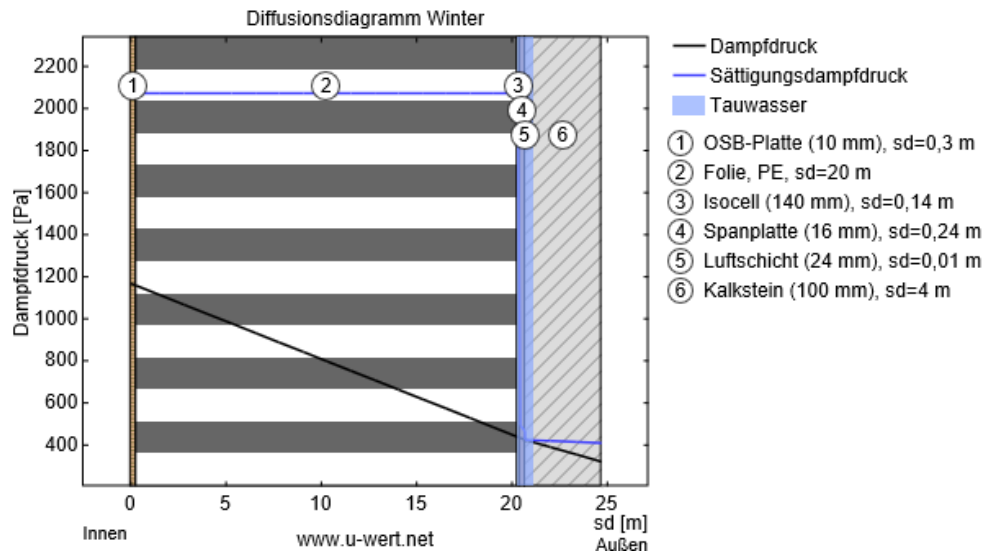


Abbildung 13: Diffusionsdiagramm Winter (Fußboden)

Klimabedingungen: Tauperiode

Dauer von Dezember bis Februar 90 Tage:

$$t_T = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 2340 \cdot 0,5 = 1170 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 401 \cdot 0,8 = 321 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 425 \cdot 1,0 = 425 \text{ Pa}$$

$$m_{w,T} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1170 - 425}{20,69} - \frac{425 - 321}{4,0} \right) = 0,014 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Klimabedingungen: Verdunstungsperiode

Dauer von Juni bis August 90 Tage:

$$t_V = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 1706 \cdot 1,0 = 1706 \text{ Pa}$$

$$m_{w,V} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1706 - 1194}{20,69} + \frac{1706 - 1194}{4,0} \right) = 0,220 \text{ kg/m}^2$$

Nachweis der Tauwassermenge nach DIN 4108-3:

$$0,014 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 0,220 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \leadsto \text{Nachweis erfüllt !}$$

Nachweis der Trocknungsreserve nach DIN 68800-2:

$$m_{w,R} = (0,220 - 0,014) \cdot 1000 = 206 \text{ g/m}^2\text{a} > 100 \text{ g/m}^2\text{a} \quad \leadsto \text{Nachweis erfüllt !}$$

6.4. Tauwassernachweis der Decke zu unbeheizten Räumen

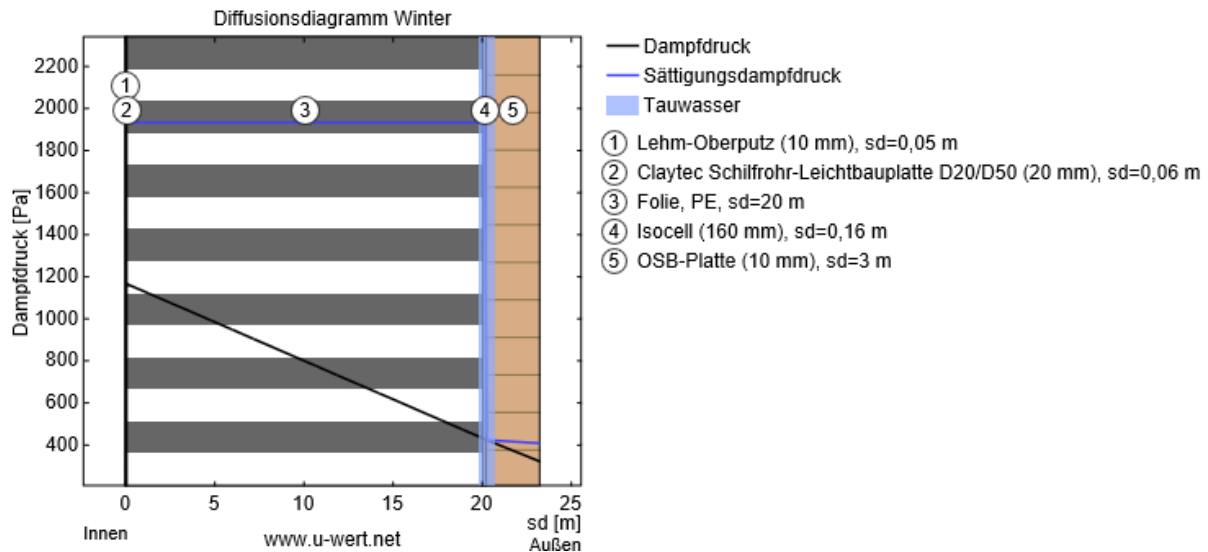


Abbildung 14: Diffusionsdiagramm Winter (Decke)

Klimabedingungen: Tauperiode

Dauer von Dezember bis Februar 90 Tage:

$$t_T = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 2340 \cdot 0,5 = 1170 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 401 \cdot 0,8 = 321 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 423 \cdot 1,0 = 423 \text{ Pa}$$

$$m_{w,T} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1170 - 423}{20,27} - \frac{423 - 321}{3,0} \right) = 0,004 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Klimabedingungen: Verdunstungsperiode

Dauer von Juni bis August 90 Tage:

$$t_V = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 1706 \cdot 1,0 = 1706 \text{ Pa}$$

$$m_{w,V} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{1706 - 1194}{20,27} + \frac{1706 - 1194}{3,0} \right) = 0,282 \text{ kg/m}^2$$

Nachweis der Tauwassermenge nach DIN 4108-3:

$$0,004 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 0,282 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \leadsto \text{Nachweis erfüllt !}$$

Nachweis der Trocknungsreserve nach DIN 68800-2:

$$m_{w,R} = (0,282 - 0,004) \cdot 1000 = 278 \text{ g/m}^2\text{a} > 100 \text{ g/m}^2\text{a} \quad \leadsto \text{Nachweis erfüllt !}$$

6.5. Tauwassernachweis des Daches

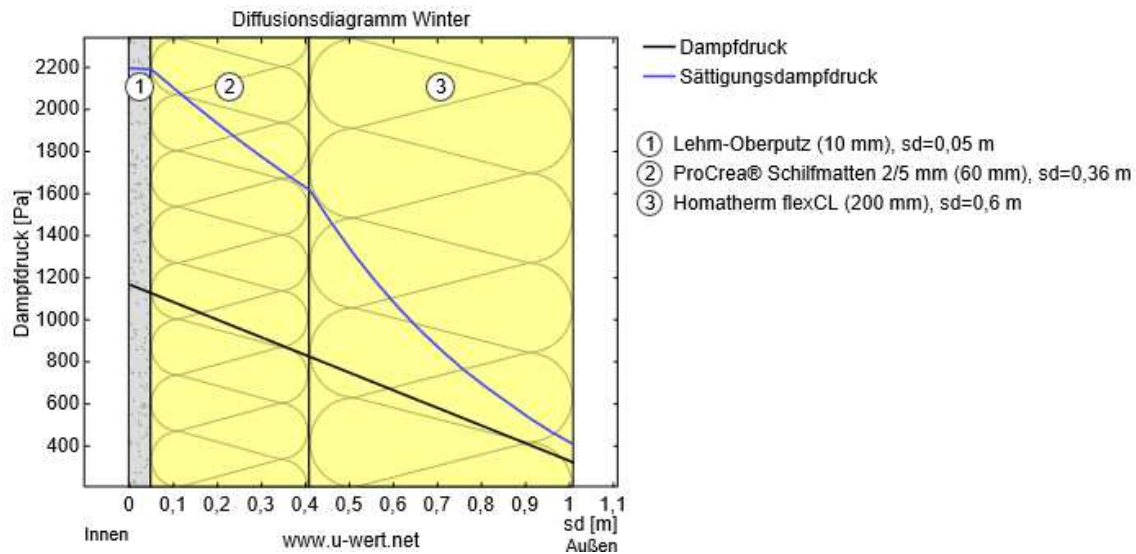


Abbildung 15: Diffusionsdiagramm Winter (Dach)

Klimabedingungen: Tauperiode

Dauer von Dezember bis Februar 90 Tage:

$$t_T = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 2340 \cdot 0,5 = 1170 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 401 \cdot 0,8 = 321 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 0$$

$$m_{W,T} = 0$$

Klimabedingungen: Verdunstungsperiode

Dauer von Juni bis August 90 Tage:

$$t_V = 2160 \text{ h}$$

Dampfdruck innen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_i = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Dampfdruck außen bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit:

$$p_e = 1706 \cdot 0,7 = 1194 \text{ Pa}$$

Sättigungsdruck bei 100% Luftfeuchtigkeit:

$$p_{sw} = 2000 \cdot 1,0 = 2000 \text{ Pa}$$

$$m_{W,V} = \frac{2160}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{2000 - 1194}{0,51} + \frac{2000 - 1194}{0,50} \right) = 4,597 \text{ kg/m}^2$$

Nachweis der Tauwassermenge nach DIN 4108-3:

$$0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < 4,597 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

≈ Nachweis erfüllt !

Nachweis der Trocknungsreserve nach DIN 68800-2:

$$m_{W,R} = 4,597 \cdot 1000 = 4597 \text{ g/m}^2\text{a} > 250 \text{ g/m}^2\text{a}$$

≈ Nachweis erfüllt !

Zusammenstellung:

	Tauwasser- menge [kg/m²]	Verdunstungs- menge [kg/m²]	Trocknungs- reserve [g/m²/a]	Erforderlich nach DIN 68800-2 [g/m²/a]
Außenwand	0,879	1,055	180	100
Fußboden	0,014	0,220	206	100
Decke	0,004	0,282	278	100
Dach	0	4,597	4597	250

Die Konstruktionen sind nach der DIN 4108-3 „Klimabedingter Feuchteschutz“ rechnerisch nachgewiesen. Das im Winter anfallende Tauwasser, kann im Sommer auch wieder verdunsten. Zusätzlich sind die Trocknungsreserven nach der DIN 68800-2 „Baulicher Holzschutz“ nachweislich erfüllt. In der Zwischendecke sowie im Fußboden sind die Tauwassermengen sehr gering, aufgrund der eingebrachten Dampfsperren, die hier unumgänglich sind, aus dem Grund weil hier mehr mit Zellulose oder Holzfasern und weniger mit Lehm konstruiert wurde. Im Dachbereich befindet sich eine sehr gute Hinterlüftung, somit kann hier ein Tauwasserausfall in der Regel ausgeschlossen werden. Kritisch ist der Nachweis der Außenwand, diese muss aufgrund der Lehmmaterialien, komplett diffusionsoffen konstruiert werden. Somit dürfen auch keine Abdichtungen eingebaut werden, die den Diffusionsfluss stören. Zudem bringen das Holz und der Lehm eine gewisse Anfangsfeuchte mit. Die Materialien und Schichtdicken wurden so gewählt, dass der Nachweis auf Wärmeschutz sowie der des Feuchteschutzes in Bezug auf Tauwasser, eingehalten werden.

Um die DIN 4108-3 zu vervollständigen, sind noch die Angaben der Luftdichtheit sowie die konstruktive Lösung des Feuchteschutzes gegen Schlagregen erläuternd anzuzeigen.

6.6. Luftdichtheit

In der Energieeinsparverordnung und den Teilen 2,3 und 7 der DIN 4108-2, sind Anforderungen an die Luftdichtheit von Außenbauteilen sowie der Gebäudehülle definiert. Ziel ist es, die ungewollten Verluste von Wärmeenergie auszuschließen. Bei einem Luftdichtheitskonzept stehen besonders die Anschlüsse verschiedener Bauteile im Fokus der Planung. Neben dem Reduzieren von Wärmeverlusten, sind die luftdichten Bauteilanschlüsse auch vorbeugend gegen einen Feuchteeintrag in die Konstruktionsebene zu schützen.

Leichtlehmteile sind ab einer Dichte von etwa 900 kg/m³ winddicht. Leichtere Mischungen, wie die hier eingesetzten Leichtlehmsteine mit einer Dichte von 700 kg/m³ benötigen mindestens eine Lage Putz auf einer Seite. Durchgehende Fugen zwischen Ausfachung und Holzkonstruktion sollten mit Faserdämmstoffen oder mit

Baumwollzwirnen, so gut wie möglich ausgestopft werden. Mit diesen Techniken kann eine Außenwand im Fachwerkbereich luft- und winddicht ausgebildet werden.

Die oberen Wandanschlüsse an Decken und Dachflächen sind so zu planen, dass durchbindende oder durchstoßende sichtbare Holzbauteile, wegen möglicher Undichtigkeiten, vermieden werden. Zum Beispiel Deckenbalken oder Dachschalungen sollten an den Außenwänden einbinden, sie aber nicht durchdringen. Allein durch die Bewegung des Holzes können sehr kleine Fugen entstehen.³⁶

Deshalb sollte die Wandausfachung möglichst fugenlos mit der Deckenausfachung verbinden und über die oberste Decke reichen. Die Allgemeine Regel für den Verputz, die Trocknung der Ausfachung und des Holzes abzuwarten, ist auch aus Gründen der Luftdichtigkeit ratsam.

In der Zusammenfassung sind die Außenwände im Fachwerkbau ausreichend Luftdicht verschlossen, wenn diese mit Lehm verputzt werden. Diese konstruktive Variante ist einfach, Kostengünstig und dauerhaft. Im Gegensatz zu den, im heutigen Holzbau, verwendeten Dichtfolien. Deren Funktionalität und zweifelhafter Dauerhaftigkeit, stark von den Anschlussdetails abhängig ist.

6.7. Konstruktiver Schutz vor Feuchtigkeit

Schutz vor Schlagregen

Die Regenbeanspruchung von Außenwänden ist abhängig von den Niederschlägen bei Windeinwirkung. Hierbei trifft der Regen schräg auf die Fassade, dieser Vorgang wird als Schlagregen bezeichnet. Die Intensität des Schlagregens hängt von der Richtung und Stärke des Windes ab, hieraus ergeben sich die Beanspruchungsklassen nach DIN 4108-3. Bei sehr hoher Beanspruchung, müssen bei den entsprechenden Fassadenseiten Maßnahmen zum Schutz vor Folgeschäden ergriffen werden. Durch die Fugen zwischen Fachwerk und Ausfachung kann Feuchtigkeit in tropfbarer Form eindringen. Bei geringen Massen ist das nicht schlimm, da diese wieder ausdunsten können. Das funktioniert nur solange keine Dichtungsmaterialien verwendet wurden.

Keller und Sockel sind bis über den Spritzwasserbereich zu mauern, Sperrschichten gegen aufsteigende Feuchtigkeit sind mindestens 30 cm über Gelände sowie zwischen feuchterem Mauerwerk und der Holzkonstruktion anzuordnen. Lehmputz oder Holzschwelle sollten etwas über dem Sockel stehen, damit sich kein Wasser ansammeln kann und der Anschluss durchfeuchtet wird.

Die Außenwandflächen sind durch den Kalkzementputz, vor Durchfeuchtung und Nässe geschützt. Je nach Beanspruchbarkeit können auch hinterlüftete Wandverkleidungen aus Holz- oder Schieferplatten, zum Schutz vor Schlagregen, nützlich

³⁶ vgl. VOLHARD, 2013, S. 162

sein. Zur Orientierung ist es sinnvoll, die regionalen Bautraditionen und besonders die örtliche Situation zu studieren.³⁷

Schutz vor Feuchtigkeit von Innen

Nicht nur von außen kann Feuchtigkeit eingebracht werden, nutzungsbedingte Feuchtequellen wie beim Baden oder durch Küchenarbeiten, sollten immer mit in Betracht gezogen werden. Beeinflussbar ist der Feuchtegehalt der Luft durch das Lüftungsverhalten der Bewohner. Laut einem Forschungsbericht der TU Dresden, wurde eine Wassermenge für einen Vierpersonenhaushalt, von ca. 10,4 kg am Tag ermittelt. Diese Menge resultiert nur aus der Nutzung und muss im Laufe des Tages wieder abgeführt werden. Damit es in den Räumen nicht zu feuchtebedingten hygienischen oder konstruktiven Schäden kommen kann, sollte daher stets auf eine regelmäßige Lüftung geachtet werden.³⁸

³⁷ vgl. VOLHARD, 2013, S. 161

³⁸ online: BAUNETZ MEDIA GMBH, 2016 (01.08.2017)

7. Schallschutz

7.1. Schallschutztechnische Kenngrößen

Die Schallschutzanforderungen der DIN 4109 haben eher einen öffentlich-rechtlichen Nachweisstand. Der geschuldete Schallschutz orientiert sich an den üblichen akzeptierten Qualitäten und weist zudem auf viele Gerichtsurteile hin. Wichtig bei der Planung von Konstruktionen ist, den gewünschten Standard zu kennen und die jeweiligen Anforderungen durch Tabellen zu ermitteln.

Während Wärme- und Feuchteschutz funktional in einer Konstruktion überprüft werden kann, verhält sich das beim Schall etwas anders. Der Nutzer eines Bauwerks nimmt Geräusche außerhalb oder innerhalb der Konstruktion jederzeit wahr. Das Wohlbefinden ist davon abhängig, wie stark die wahrzunehmenden Geräusche auf den Nutzer einwirken und als störend empfunden werden. Für die schalltechnische Bewertung einer Konstruktion werden die flächenbezogene Masse, Biegesteifigkeit und Dichtheit des Bauteils betrachtet. Zudem haben flankierende oder durchdringende Bauteile, wie Kabelkanäle oder Rohrleitungen jederzeit Einfluss auf die Schallübertragung. Schalltechnische Kenngrößen von Bauteilen können, auf der Grundlage der DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ versuchstechnisch bestimmt werden. Die Schallübertragung wird zwischen Luftschall, Körperschall und Trittschall unterschieden.³⁹

7.2. Luftschallschutz

Heutige Holzskelettbauten sind meist mit mehrschaligen Konstruktionen aus Gips- oder Spanplatten beplankt. Diese Leichtbaukonstruktionen und deren Schalldämmmaße sind in den Normen entsprechend angegeben. Holzskelettkonstruktionen aus Lehmsteinausfachungen können, wie die Massivkonstruktionen, nach ihrem Flächengewicht berechnet werden. Lehmbaumstoffe besitzen Masse, eine einfache Grundlage für einen guten Schallschutz. Zudem sind Leichtlehmbaumstoffe weicher und elastischer wie andere Massivbaumstoffe. Somit können Schallschwingungen im Material besser absorbiert und gedämpft werden.

Der Schallschutz der Außenwände ist nur so gut wie der Schutz der Fenster. Die Wandfläche betreffend, sind die geforderten Werte für Leichtlehm, bei üblichen Waddicken gut zu erreichen.

Aufgrund des erhöhten Flächengewichtes nimmt die Luftschalldämmung einschaliger Innenwände zu, wenn zum Beispiel für Innenwände schwere Lehme oder Stampflehm verwendet werden. Um eine Schallübertragung aus Fugen und feine Luftporen zu verhindern, ist mindestens einseitig eine Putzschicht anzuordnen. Welche Schall-

³⁹ vgl. SCHROEDER, 2010, S. 278

schutzmaße für verputzte Innen- und Außenwände zu erzielen sind, ist in der nachfolgenden Abbildung sichtbar.⁴⁰

Nach der DIN 4109 und VDI 4100 werden für Aufenthalts- und Übernachtungsräume eine Schallschutzstufe III verlangt. Das regelt unter anderem die Sprechweise, die kaum hörbar, jedoch laute Musik aus dem Radio, noch hörbar sein darf. Zudem ist ein resultierendes Luftschalldämmmaß R'_w von 30 bis 50 dB erforderlich, bei einem maßgeblichen Außenlärmpegel von 55 bis 80 dB. Gemäß der Abbildung, vom deutschen Dachverband für Lehmbautechnik, erfüllt die Außenwand mit 0,38 m Dicke und über 1400 kg/m³ Rohdichte, die maßgebenden Anforderungen.

Wanddicke $s^1 =$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35 m
Rohdichte kg/m ³	Schalldämm-Maße R'_w (dB) ²					
1800	47	51	54	56		
1600	46	50	52	55	57	
1400	45	48	51	53	55	57
1200	44	47	50	52	54	55
1000	43	46	48	50	52	53
800	41	44	46	48	50	51
600	40	42	44	46	47	49

1 Wanddicke ohne Putz
2 bei einer mittleren flächenbezogenen Masse der flankierenden Bauteile von 300 kg/m², unter der Annahme einer gleichen Biegesteifigkeit wie der üblicher Wandbaustoffe

Abbildung 16: Bewertete Schalldämmmaße

(VOLHARD, 2013, S. 230)

7.3. Trittschallschutz der Holzbalkendecke

Der Schallschutz muss, in der Regel nur zwischen fremden Wohn- oder Arbeitsräumen nachgewiesen werden.

Luft- und Trittschall werden meist in den Balken übertragen, bei direkter Befestigung des Fußbodens oder der Unterdecke an den Balken. Hierbei ist, anders wie bei den Wänden, nicht das Gewicht maßgebend, sondern der Querschnitt und die Steifigkeit der Balken. Die erforderlichen Schalldämmmaße werden selbst bei Querschnitten von 16/22 nur unsicher erreicht. Bei Deckenkonstruktionen können die Hohlräume komplett mit Faser- oder Leichtlehm aufgefüllt werden, um die Schalldämmwirkung nicht zu verringern. Hohlräume unter dem Fußbodenbelag sollten vermieden werden, die Dämpfung der Schallgeräusche kann mit einem Lehmverstrich oder Dämmschüttung erzielt werden. Bei Holzbalkendecken mit schweren Lehmauffüllungen, muss der Fußboden oder die Unterdecke elastisch vom Balken getrennt werden. Eine weitere Maßnahme um die erforderlichen Werte konstruktiv zu erreichen ist, einen elas-

⁴⁰ vgl. VOLHARD, 2013, S. 229

tischen Faserstoff als Dämmung zu verwenden und diesen nicht an den Boden oder den Balken anzunageln. Sind Unterhangdecken nötig, werden diese als biegeeweiche Schalen an einer Lattung mit Federbügel aufgehängt. Durch gut konstruierte Unterdecken lässt sich der Schallschutz maßgeblich verbessern.⁴¹

⁴¹ vgl. VOLHARD, 2013, S. 232

8. Brandverhalten von Lehm

8.1. Baustoffklasse

Nach der deutschen Norm, die DIN 4102-1 1998, wird Lehm in die Baustoffklasse A1 nicht brennbar eingestuft. Wenn jedoch pflanzliche Faserstoffe beigefügt werden, dann darf das Raumgewicht von etwa 1700 kg/m³ nicht unterschritten werden, um die Klasse nicht zu verringern. Ebenso nicht brennbar eingestuft sind Gemische aus Leichtlehm mit Stroh, Holzhackschnitzel oder ähnliche mineralische Zusätze. Diese brennbaren Stoffe werden durch die Mischung mit Lehm feuerschützend umhüllt.

Nach einigen Versuchen in Laboren, werden die Eigenschaften bezüglich des Brandverhaltens der Lehmstoffe, wie folgt beschrieben:

- Leichtlehm verhält sich passiv bei Flammeinwirkung, trägt nicht zur Brandausbreitung bei
- Durch die Bildung einer Kohleschicht wird die Oberfläche vor direkter Flammeinwirkung geschützt
- Es entsteht kein Rauch, Qualm oder Verbrennungsgas
- Der Baustoff bleibt stabil und zerfällt nicht⁴²

Somit kann Lehm, bei durchschnittlichen Anforderungen, unbedenklich eingebaut werden. Jedoch sollten die allgemeingültigen Regeln der Lehmbautechnik eingehalten werden. Wenn sich der pflanzliche Faseranteil im Lehmgemisch erhöht oder dieser schlecht vermischt wurde, ist eine Klassifizierung in A1 nicht mehr möglich.

8.2. Feuerwiderstandsklasse

Die Feuerwiderstandsklasse F bezeichnet die Dauer in Minuten, dem das Bauteil einem Feuer widerstandsfähig ist. Diese Dauer ist nicht klassifiziert und muss ebenfalls in Laboren getestet werden. Nach mehrfachen und unterschiedlichen Versuchen sind die nachfolgenden Eigenschaften bezüglich der Feuerwiderstandsfähigkeit wie folgt beschrieben:

- Verputzter Leichtlehm hat feuerhemmende Eigenschaften, ist aber abhängig von der Putzstärke, diese sollte möglichst zwischen 15 bis 25 mm liegen
- Eingeschlossene Holzteile bei Wänden und Decken sollten durch eine 5 bis 10 cm dicke Lehmschicht auf der Brandbelasteten Seite geschützt sein

Die nach der DIN 4102-4 1994 klassifizierten Bauteile, können ohne Brandschutznachweis eingesetzt werden. Dass sich in der Norm die üblichen Platten- und Tafel-

⁴² vgl. VOLHARD, 2013, S. 223

bauweisen aus Lehm und Holz gehalten haben, zeugt von der Dauerhaftigkeit der Baustoffe.

Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen aus Lehmschlag oder Lehmsteinen und einer einseitigen Putzschicht von mindestens 15 mm sowie einen Holzquerschnitt von mindestens 12x12 cm, liegen die Klassifizierungen gegen Feuerwiderstand, bei F 30 B.

Auch bei Decken und Dächer sind keine genauen und aktuellen Klassifizierungen in den Normen hinterlegt. Bei Decken mit freiliegenden Holzbalken sind nur die Balkenquerschnitte und die Ausbildung der Beplankung, für den Brandschutz relevant. Bei Decken mit verdeckten Holzbalken, sollte die mineralische Dämmschicht nicht brennbar sein, somit ist in beiden Fällen auch Lehm einsetzbar.

Nach der DIN 4102-4 1994-03 sind Holzbalkendecken mit vollständig freiliegenden Balken als F 30 B eingestuft. Holzbalkendecken mit verdeckten Balken und einer nicht brennbaren Dämmschüttung von mindestens 60 mm, werden als F 60 B klassifiziert.⁴³

⁴³ vgl. VOLHARD, 2013, S. 227

9. Schlussteil

Lehm ist ein Baustoff mit dem ressourcenschonend, ökologisch, langlebig und vielseitig gebaut werden kann. Die Auswahl der gestalterischen und technischen Möglichkeiten mit Lehm ein Bauvorhaben zu verwirklichen, ist groß. Tragende oder nicht-tragende Elemente aus Steinen, Wände oder Füllungen aus Stampflehm, Dämmungen aus Lehmgemische oder Oberflächen aus Lehmputze. Die Kombination Fachwerkbau und Lehmbau hat sich in der Geschichte immer wieder bewehrt und sollte nicht vergessen werden.⁴⁴

Die heutigen Energievorgaben sind auch in Abhängigkeit der Bauindustrie und ihren Produkten gewachsen. Synthetische Dämmmaterialien oder Baustoffe aus dem Labor können die vorgegebenen Anforderungen gut erfüllen. Aufgrund der großen Produktionsmengen ist auch der Preis meist günstiger, wie der von natürlichen Materialien. Gerade bei Fachwerkhäusern, sollte es eine Pflicht für jeden Architekten und Planer sein, natürliche Baustoffe einzusetzen. Es ist möglich die derzeitigen Energievorgaben einzuhalten. Auch wenn in manchen Fällen eine Weiterverarbeitung der Produkte oder ein Gemisch mit vielen Zuschlägen notwendig wird, werden die geforderten Nachweise erfüllt.

Sicherlich muss auch jeder Hausbauer für sich selbst entscheiden, welchen Energiestandard erstrebenswert ist. Nur sollte auch bewusst sein, dass bei der Produktion der Hochleistungsdämmmaterialien ebenso viel Energie verbraucht wird, wie eigentlich dadurch eingespart werden sollte. Auch die Nachhaltigkeit der hochmodernen Gebäude, sollte Eines bewusst sein, denn die künstlichen Produkte können der Natur nicht wieder zurückgegeben, meist sogar nicht einmal recycelt werden.

Bei fachlich korrekter Planung und Konstruktion, haben natürliche Baustoffe kaum Defizite. Im Gegenteil, aufgrund seiner Eigenschaften ist bei Lehm ein angenehmeres Behaglichkeitsgefühl spürbar. Ebenso sind bei Häusern mit Lehm auch keine Luftbefeuchter oder Entfeuchter notwendig.

Nicht nur Bauherren sollten sich darüber Gedanken machen, auch die Gesetzgeber. Es ist nicht erforderlich die Energieanforderungen stetig zu verbessern. Die Wirtschaftlichkeit der Produktion solcher Baustoffe, stellen sich dem Energieeinsparungsziel entgegen.

.

⁴⁴ vgl. TROJAN, Martin, 2008, S. 147

Quellenverzeichnis

Bücher:

LENZE, Wolfgang: Fachwerkhäuser. Stuttgart, 2009

LIERSCH, Klaus W.: Bauphysik Kompakt. Berlin, 2015

SCHROEDER, Horst: Lehmbau. Wiesbaden, 2010

TROJAN, Martin: Lehmbausteine für tragende Wände. Saarbrücken, 2008

VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm. Wien, 2013

WILLEMS, Wolfgang M.: Bautabellen für Ingenieure. Köln, 2014

Internet:

BAUNETZ MEDIA GMBH: Nachhaltig Bauen. Berlin, 2016, In:

1. <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/bauphysik/winterlicher-waermeschutz-662962> (21.07.2017)
2. <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/bauphysik/waermebruecken-662974> (21.07.2017)
3. <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/bauphysik/sommerlicher-waermeschutz-683853> (20.07.2017)
4. <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/feuchteschutz/anforderungen-und-ziele-des-feuchteschutzes-4380357> (01.08.2017)

BECKER, Thomas: Wärmebrücken in der Bestandssanierung. Berlin, 2015, In:

[https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/Inlandsf%C3%B6rderung-\(alte-Inhalte\)/Meine-KfW/F%C3%BCr-Vertriebspartner-Berater-Sachverst%C3%A4ndige-Architekten-und-Bauingenieure/PDF-Dateien/Leitfaden_Waermebruecken_in_der_Bestandssanierung.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/Inlandsf%C3%B6rderung-(alte-Inhalte)/Meine-KfW/F%C3%BCr-Vertriebspartner-Berater-Sachverst%C3%A4ndige-Architekten-und-Bauingenieure/PDF-Dateien/Leitfaden_Waermebruecken_in_der_Bestandssanierung.pdf) (24.07.2017)

DÖBEL, Daniel: Lehmsteine und Leichtlehmsteine. Kassel, 2016, In:

<https://kalk-lehmputz.de/lehmsteine/> (18.06.2017)

HISS REET, Schilfrohrhandel GmbH: Naturprodukte. Lübeck, 2017, In:
<https://www.hiss-reet-shop.de/naturbaustoffe/reet-waermedaemmung/> (02.08.2017)

KRUS, Martin: Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht. München, 2015, In:
https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Konferenzenbeitraege/Deutsch/KB_5_tcm45-30960.pdf (02.08.2017)

NEUMANN, Stefan: Innendämmung. Bad Oldesloe, 2017, In:
<http://www.hiss-reet.de/baustoffe-aus-schilf/waermedaemmung/innendaemmung/innendaemmung/> (30.08.2017)

PLAG, Ralf: U-Wert Rechner Download. Forst, 2017, In:
<https://www.u-wert.net/> (14.07.2017)

RÜPKE, Hans-Joachim: Holz im Haus. Hannover, 2016, In:
http://www.holzfragen.de/seiten/holz_am_haus.html (15.06.2017)

SCHLAUCH, Uwe: Ökologische Baustoffe. Bochum, 2004, In:
<http://www.holzundlehmbau.de/neh.htm>

UNIVERSITÄT STUTTGART: Glaser-Verfahren. Stuttgart, 2014, In:
https://ilias3.uni-stuttgart.de/goto.php?target=pg_72864_47246&client_id=Uni_Stuttgart (07.08.2017)

WIENERBERGER: Kleine Bauphysik-Kunde. Hannover, 2017, In:
<http://admin.architekt-huegel.de/resources/files/kleinebauphysikkunde.pdf>
(20.07.2017)

Anhangverzeichnis

- Anhang 1 Berechnung der Außenwand mit Stampflehm
- Anhang 2 Berechnung der Außenwand mit Lehm-Blähglas
- Anhang 3 Ehrenwörtliche Erklärung
- Anhang 4 Erklärung Freigabe der Praxisarbeit
- Anhang 5 Zustimmungserklärung Plagiatsprüfung

Variante 1: Außenwand mit Stampflehm

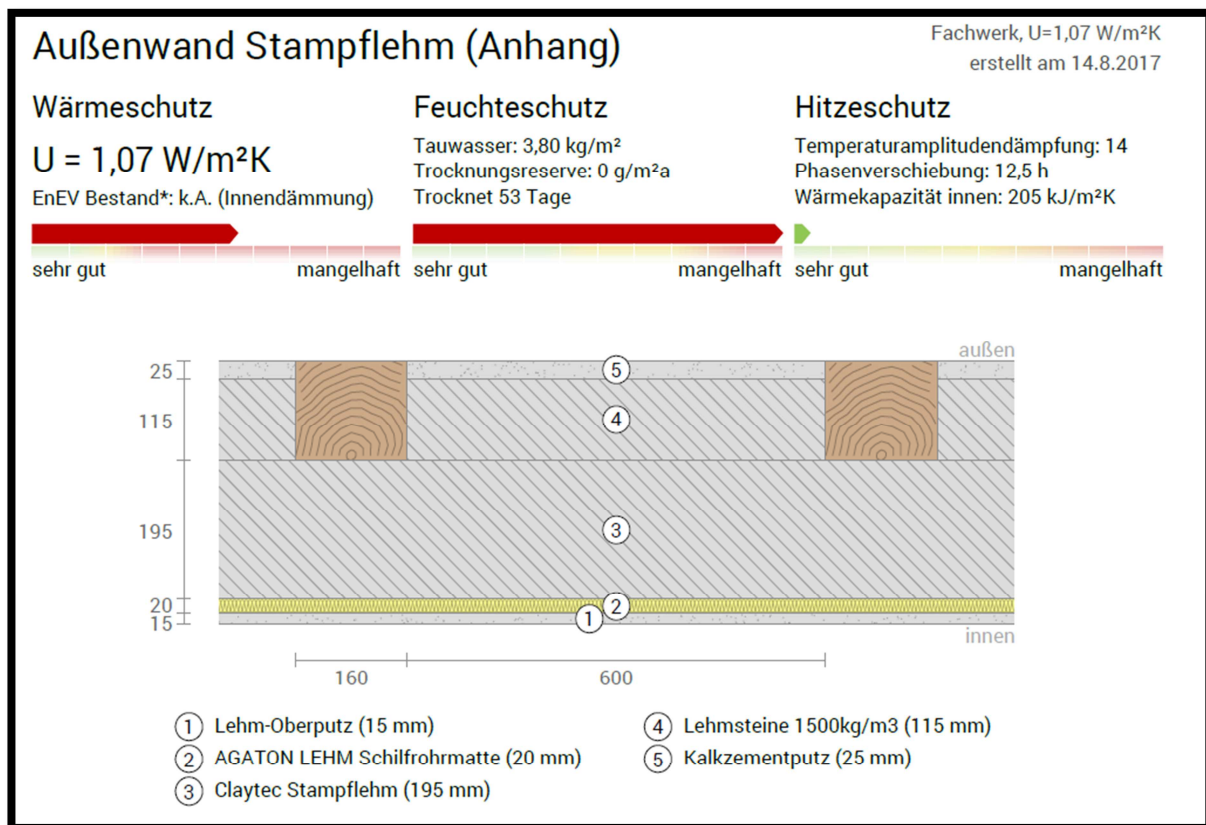


Abbildung 17: Variante Stampflehm

Variante 2: Außenwand mit Lehm-Blähglas Schüttung

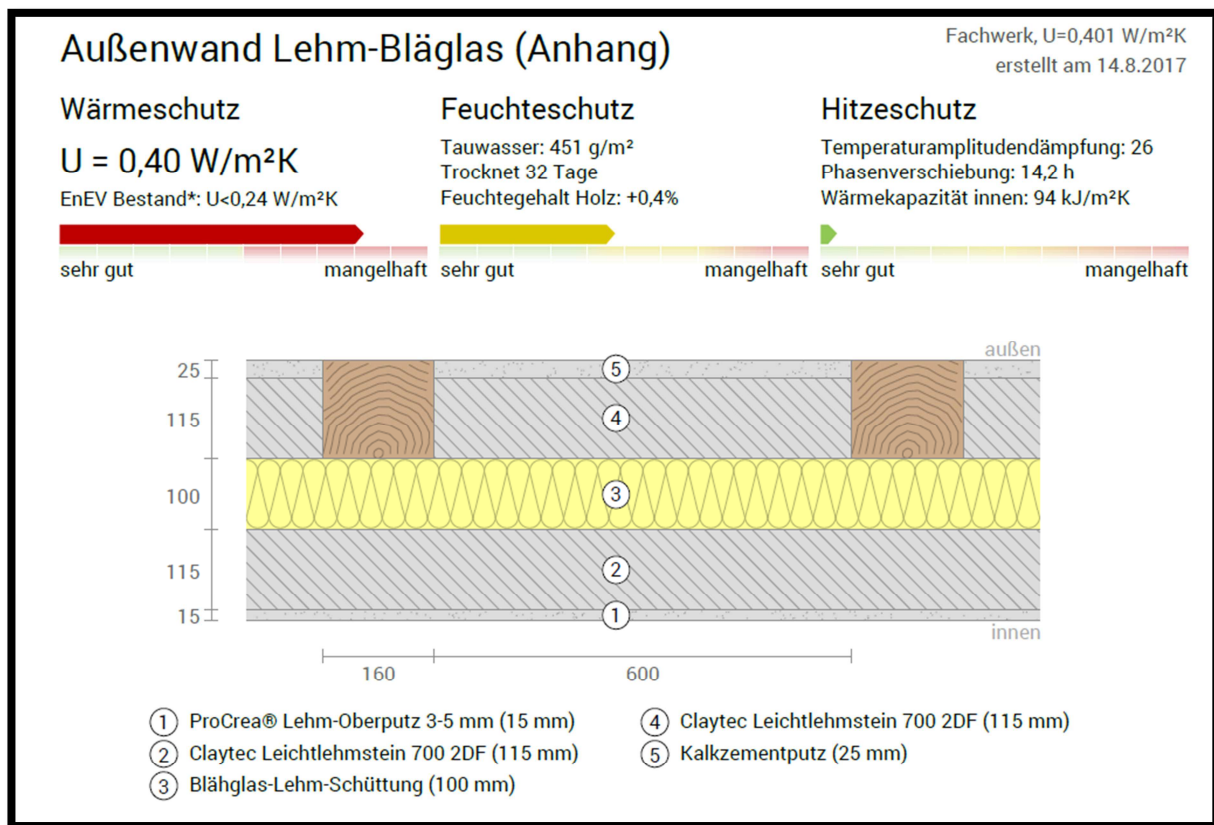


Abbildung 18: Variante Lehm-Blähglas Schüttung

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich“,

1. dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

**Untersuchung zu bauphysikalischen Anforderungen
bei einem Fachwerk-Neubau in Lehmbauweise**

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Ort, Datum

Unterschrift

Freigabeerklärung

Hiermit erklären wir uns einverstanden, dass die Diplomarbeit des Studenten

Name, Vorname: Plohmann, Enrico

SG: HB 14

zur öffentlichen Einsichtnahme durch den Dokumentenserver der Bibliothek der Staatlichen Studienakademie Glauchau bereitgestellt wird.

Thema der Arbeit: **Untersuchung zu bauphysikalischen Anforderungen
bei einem Fachwerk-Neubau
in Lehmbauweise**

Ort, Datum

Stempel, Unterschrift des Praxispartners

Arbeit zur Veröffentlichung freigegeben: ja

Ort, Datum

Unterschrift

Erklärung zur Prüfung wissenschaftlicher Arbeiten

Die Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten erfordert die Prüfung auf Plagiate. Die hierzu von der Staatlichen Studienakademie Glauchau eingesetzte Prüfungskommission nutzt sowohl eigene Software als auch diesbezügliche Leistungen von Drittanbietern. Dies erfolgt gemäß § 7 des Gesetzes zum Schutz der informationellen Selbstbestimmung im Freistaat Sachsen (Sächsisches Datenschutzgesetz-SächsDSG) vom 25. August 2003 (rechtsbereinigt mit Stand vom 31. Juli 2011) im Sinne einer Datenverarbeitung im Auftrag.

Der Studierende bevollmächtigt die Mitglieder der Prüfungskommission hiermit zur Inanspruchnahme o. g. Dienste. In begründeten Ausnahmefällen kann der Datenschutzbeauftragte der Staatlichen Studienakademie Glauchau sowohl vom Verfasser der wissenschaftlichen Arbeit als auch von der Prüfungskommission in den Entscheidungsprozess einbezogen werden.

Name: Plohmann

Vorname: Enrico

Matrikelnummer: 4001749

Studiengang: Bauingenieurwesen, Hochbau

Titel der Arbeit: Untersuchungen zu bauphysikalischen Anforderungen bei einem Fachwerk-Neubau in Lehmbauweise

Datum: 18.08.2017

Unterschrift: _____