

Anhang 1

Arbeitspaket 1: Lehm als Baustoff

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe

iFE – Institut für Energieforschung

Prof.'in Dr.-Ing. Susanne Schwickert (Bauklimatik, Bauphysik, Akustik, Monitoring)

Emilienstraße 45; 32756 Detmold

+49 (0)5231 769-6182 | susanne.schwickert@th-owl.de

Autoren

Prof.'in Dr.-Ing. Susanne Schwickert

B.A., B.Eng. Kim Kristin Blaschke

M.Sc. Janick Schrader

B.A. Laura Regehr

Inhalt

1	Einleitung und Ausgangslage	9
2	Feuchtetechnische Kennwerte	10
2.1	Zielsetzung	10
2.2	Untersuchungen	10
2.3	Schwindverhalten	10
2.4	Wasserdampfdiffusion.....	11
2.5	Sorption	11
2.6	Wasserdampfadsorption	13
2.7	Zusammenfassung und Vergleichswerte.....	14
2.7.1	Schwindverhalten	14
2.7.2	Wasserdampfdiffusion.....	14
2.7.3	Sorptionseigenschaften.....	15
2.8	Implementierung in die Wufi-Materialdatenbank	16
3	Raumklimasimulationen.....	17
3.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	17
3.2	Anforderungen an das Raumklima in Museumsgebäuden	17
3.3	Modellbildung	18
3.4	Wufi Plus.....	20
3.5	Randbedingungen	21
3.6	Bauteilaufbauten.....	22
3.7	Ergebnisse und Auswertung	23
4	Trocknungsverlauf	27
4.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	27
4.2	Wufi Pro 5.1	27
4.3	Aufbau der Simulationsstudien	27
4.4	Parameterstudie zur Trocknungsdauer	27
4.4.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4.4.2	Ergebnisse und Auswertung	27
4.5	Parameterstudie zur Trocknungsverlauf in Schichten.....	29
4.5.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	29
4.5.2	Ergebnisse.....	29

4.6	Parameterstudie Trocknungsverlauf Bauphase Freilichtmuseum.....	30
4.6.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	30
4.6.2	Ergebnisse	31
5	Raumklima- und Lehmwand- Monitoring	32
5.1	Zielsetzung	32
5.2	Messaufbau	33
5.3	Technische Daten der Messsonden	35
6	Schallabsorptionseigenschaften von Lehm.....	36
6.1	Einleitung, Stand der Forschung und Zielsetzung.....	36
6.2	Hallraummessungen	37
6.2.1	Messaufbau	37
6.2.2	Aufbau der Messkampagnen	38
6.2.3	Durchgeführte Messungen	39
6.2.4	Auswertung.....	41
6.2.5	Messergebnisse.....	42
6.2.6	Qualität der Ergebnisse.....	62
6.2.7	Fazit	63
6.3	Schallimpedanzrohr Messungen.....	64
6.3.1	Einleitung	64
6.3.2	Probenherstellung	64
6.3.3	Planung der Versuchsreihen.....	65
6.3.4	Messungen und Ergebnisse.....	66
6.3.5	Fazit	72
6.4	Gesamtfazit.....	72
7	Museumspädagogik.....	73
7.1	Inhalte und Herangehensweise.....	73
7.2	Ausstellung	73
7.3	Workshops.....	81
7.4	Mögliche textliche Inhalte zu den Ständen der Ausstellung.....	82
7.4.1	Nachhaltigkeit	82
7.4.2	Ökobeton	83
7.4.3	Holz.....	85
7.4.4	Lehm.....	87
7.4.5	Stroh.....	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schwindverlauf an Würfeln (200 x 200 x 200 mm ³) (Wigger & Schmidtman, 2023).....	11
Abbildung 2: Mittlerer Feuchtegehalt der Versuchsreihen 1-F, 2-A und 3-BK gemäß Sorptionsuntersuchung bezogen auf 10 % relativer Luftfeuchte (Wigger & Schmidtman, 2023).....	12
Abbildung 3: Wasserdampfadsorption an Würfeln, Kantenlänge 20 cm, 0-8 h und 8 bis 76 h (Wigger & Schmidtman, 2023).....	14
Abbildung 4: Sorptionsfeuchte im Vergleich.....	15
Abbildung 5: Vergleich der Werte der Feuchtespeicherfunktion.....	16
Abbildung 6: Übersicht Kategorien für das Raumklima in Museen, Galerien, Archiven und Bibliotheken der ASHRAE.....	17
Abbildung 7: Ausführungsplan EG-Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum Detmold (ohne Maßstab) Quelle: ACMS Architekten GmbH 19	19
Abbildung 8: Ausschnitt des Ausführungsplans EG – Ausstellungsraum (ohne Maßstab) Quelle: ACMS Architekten GmbH.....	19
Abbildung 9: Modell des Gebäudeausschnittes in SketchUp pro.....	19
Abbildung 10: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus.....	20
Abbildung 11: Außenansicht mit Raumordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus.....	20
Abbildung 12: Jahresverlauf der resultierenden Temperaturen im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	24
Abbildung 13: Jahresverlauf der resultierenden relativen Feuchten im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	24
Abbildung 14: Wochenverlauf vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	25
Abbildung 15: Tagesverlauf am 29.01. der resultierenden relativen Luftfeuchten im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	25
Abbildung 16: Wochenverlauf vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	26
Abbildung 17: Tagesverlauf am 22.07. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise.....	26
Abbildung 18: Simulierter Trocknungsverlauf der Stampflehmwand für einen Zeitraum von 20 Jahren unter Innenklima- sowie Außenklimabedingungen.....	28

Abbildung 19: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 20 Jahre, Innenklima 20 °C und 50 % r.F.....	28
Abbildung 20: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 20 Jahre, Außenklima (TRY Detmold 2015).....	28
Abbildung 21: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand der ersten, zweiten und dritten 10cm Schicht für einen Zeitraum von 6 Jahren unter Außenklimaverhältnissen (TRY Detmold 2015).....	29
Abbildung 22: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand der ersten, zweiten und dritten 10 cm Schicht für einen Zeitraum von 6 Jahren unter Innenklimaverhältnissen von 20 °C und 50 % r.F.....	29
Abbildung 23: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 1 Außenklima (TRY Detmold 2015)	30
Abbildung 24: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 1 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.	30
Abbildung 25: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 2 Außenklima (TRY Detmold 2015)	30
Abbildung 26: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 2 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.	30
Abbildung 27: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 3 Außenklima (TRY Detmold 2015)	30
Abbildung 28: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 3 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.	30
Abbildung 29: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand, der ersten, zweiten und dritten 10 cm Schichten für einen Zeitraum von 1,5 Jahren unter Klimabedingungen in der Bauphase	31
Abbildung 30: Skizze Einbauhöhe der Sensoren je Messstelle (Maße in cm).....	33
Abbildung 31: Positionen der Messstellen im Ausstellungsgebäude.....	34
Abbildung 32: Messstelle Seminarraum	34
Abbildung 33: Modell: DKRF500-SA-MOD-0-0-0-V10000-0 Digit. RS485/Modbus-RF/T-Sonde (Typ A) (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf)	35
Abbildung 34: Modell: DKRF505/O/V-SA-MOD-0-0-0-V10000-0 Digitale Modbus-RF/T-Sonde (Typ B) (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf)	35
Abbildung 35: Grundriss des Hallraumes (Ohne Maßstab)	37
Abbildung 36: Prüffläche im Hallraum des ETI Messkampagne 1.....	43
Abbildung 37: Oberflächenbeschaffenheit Stampflehm Messkampagne 1	43
Abbildung 38: Prüffläche im Hallraum des ETI Messkampagne 2.....	43

Abbildung 39: Stampflehmoberfläche in verschiedenen Trockenstadien der Messkampagne 1	44
Abbildung 40: Messergebnisse der Stampflehmoberfläche 1.....	45
Abbildung 41: Schallabsorptionsgrad α_s Stampflehm 1 trocken	45
Abbildung 42: Messergebnisse der Stampflehmoberfläche 2.....	46
Abbildung 43: Schallabsorptionsgrad α_s Stampflehm 2 trocken	47
Abbildung 44: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade von Stampflehm mit Planungswerten von Beton/Stuckgips/Naturstein.....	48
Abbildung 45: Auftragen des Lehmoberputzes	49
Abbildung 46: Prüfoberfläche Lehmoberputz 1	49
Abbildung 47: Prüfoberfläche Lehmoberputz 2	49
Abbildung 48: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmoberputzoberfläche 1.....	50
Abbildung 49: Schallabsorptionsgrad α_s Lehmoberputz 1 trocken	50
Abbildung 50: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmoberputzoberfläche 2.....	52
Abbildung 51: Schallabsorptionsgrad α_s Lehmoberputz 2 trocken	52
Abbildung 52: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade α_p von den Lehmoberputzen mit Planungswerten von Kalkzementputz	54
Abbildung 53: Vergleich Schallabsorptionsgrade α_s : Stampflehm – Lehmoberputz Messkampagne 1	55
Abbildung 54: Vergleich Schallabsorptionsgrade α_s : Stampflehm – Lehmoberputz Messkampagne 2	55
Abbildung 55: Lehmverputzte Oberfläche, bearbeitet mit einer Nadelrolle	56
Abbildung 56: Lehmverputzte Oberfläche, bearbeitet mit einer Nadelrolle und Rillen.....	56
Abbildung 57: Oberflächenbeschaffenheit veränderter Lehmoberputzt – Nadelrolle.....	56
Abbildung 58: Oberflächenbeschaffenheit veränderter Lehmoberputzt – Nadelrollen und Rillen – Darstellung Abstand zwischen den Rillen.....	56
Abbildung 59: Messergebnisse veränderte Lehmputzoberfläche.....	57
Abbildung 60: Lehmbauplatten Oberfläche unbehandelt.....	58
Abbildung 61: Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz	58
Abbildung 62: Oberflächenbeschaffenheit Lehmbauplatte	58
Abbildung 63: Oberflächenbeschaffenheit Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz	58
Abbildung 64: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmplattenoberflächen aus der Messkampagne 1	59
Abbildung 65: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade α_p von der beschichteten Lehmbauplatte und dem Lehmoberputz	61
Abbildung 66: Nachhallzeiten der Leermessung und des trockenen Stampflehms 1	62

Abbildung 67: Probe mit einem Durchmesser von 99 mm im feuchten Zustand	64
Abbildung 68: Probe mit einem Durchmesser von 29 mm Zustand	64
Abbildung 69: Schallimpedanzrohr inkl. Lautsprecher, Schlitten, ISEL mit kreisrundem Prüflingshalter ($d_s = 29$ mm).....	66
Abbildung 70: Schallabsorptionsgrad α_0 für Stampflehm in theoretisch nutzbaren Frequenzbereichen.....	68
Abbildung 71: Schallabsorptionsgrad α_0 für Stampflehm in Terzbandmittenfrequenzen.....	68
Abbildung 72: Mikroskopische Oberflächen-Aufnahmen mit Flächenfilter Probe 4 vom 15.03.2022 (links), 21.03.2022 (mitte) und 05.04.2022 (rechts)	70
Abbildung 73: Mikroskopische Oberflächen-Aufnahmen mit Flächenfilter Probe 9 vom 15.03.2022 (links), 21.03.2022 (mitte) und 05.04.2022 (rechts)	70
Abbildung 74: Prozentuales Flächenverhältnis der Proben 4 und 9.....	70
Abbildung 75: Gewichtsabnahme der Probe der Messreihe 1.....	71
Abbildung 76: Didaktik-Element Ökobeton.....	74
Abbildung 77: Didaktik-Element Holz	75
Abbildung 78: Didaktik-Element Lehm	76
Abbildung 79: Didaktik-Element Stroh.....	77
Abbildung 80: Dashboard-Oberfläche	78
Abbildung 81: Dashboard Energieverbrauch Museum aktuell und herkömmlich.....	78
Abbildung 82: Grafik Vergleich CO2-Emissionen Mobilität und Baustoffverwendung	79
Abbildung 83: Vergleich CO2-Emissionen Transportmittel.....	79
Abbildung 84: Grafik Vergleich CO2-Emissionen Gastronomie	80
Abbildung 85: Ausstellungsbereich Ökobeton.....	84
Abbildung 86: Ausstellungsbereich Holz	85
Abbildung 87: Ausstellungsbereich Lehm	88
Abbildung 88: Ausstellungsbereich Stroh.....	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Diffusionswiderstandszahl von Lehmcharge F und A (Wigger & Schmidtman, 2023).....	11
Tabelle 2:	Parameter der Sorptionsproben (Wigger & Schmidtman, 2023).....	12
Tabelle 3:	Mittlere Feuchtegehalte der Versuchsreihe 1-F, 2-A und 3-BK gemäß Sorptionsuntersuchung (Wigger & Schmidtman, 2023)	13
Tabelle 4:	Vergleichswerte der Rohdichten und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) (Wigger & Schmidtman, 2023).....	14
Tabelle 5:	Materialeigenschaften Stampflehm.....	16
Tabelle 6:	Grundparameter der Raumklimasimulationen	21
Tabelle 7:	Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten der Raumumfassungsflächen (außen – innen).....	22
Tabelle 8:	Auswertung der Raumklimasimulationen.....	23
Tabelle 9:	Technische Daten der Messsonden (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf).....	35
Tabelle 10:	Baustoffkenndaten Stampflehm und Lehmputz.....	38
Tabelle 11:	Durchgeführte Messungen Messkampagne 1	40
Tabelle 12:	Durchgeführte Messungen Messkampagne 2	41
Tabelle 13:	Stampflehm 1 trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654 ..	46
Tabelle 14:	Stampflehm 2 α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p nach DIN EN ISO 11654	47
Tabelle 15:	Lehmoberputz 1 trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654	51
Tabelle 16:	Lehmoberputz trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654 .	53
Tabelle 17:	Lehmbauplatte beschichtet mit Lehmfeinputz: α_s nach EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654.....	60
Tabelle 18:	Nutzbare Proben für die Untersuchungen	65
Tabelle 19:	Bezeichnung der Messung durchgeführten Messungen	65

1 Einleitung und Ausgangslage

Im Bereich Bauklimatik und Bauphysik lag der Forschungsschwerpunkt auf der Untersuchung des Potenzials, den Lehm und Lehmbaumstoffe als historisch-modernes Material für den modernen (Museums-)Bau bietet. Lehm wird seit rund 20 Jahren wieder vermehrt in Wohn- und Nichtwohngebäuden eingesetzt, zumeist auf Antrieb von Bauherren und Planern hin, die alternative, ökologische Bauphilosophien verfolgen. Als Vorteile von Lehm werden Regionalität, Rezyklierbarkeit und Schadstofffreiheit, vor allem aber seine raumklimastabilisierende Wirkung angesehen. Die Pufferwirkung von Lehm ist in der Literatur vielbesprochen, dabei allerdings noch weitgehend unkonkret und unzureichend erforscht.

Der Neubau des Ausstellungsgebäudes des Freilichtmuseums Detmold bietet nun die hervorragende Möglichkeit, die thermisch-hygrischen Verhältnisse in und an Lehmanteilen vor dem Hintergrund der hohen raumklimatischen Relevanz von (klimatisch) unterschiedlich betriebenen Ausstellungsräumen messtechnisch und simulatorisch zu untersuchen. Ziel war es, fehlende bauphysikalische, materialtechnische Zusammenhänge zu erarbeiten, die mehr Planungssicherheit bei Wohnungs- und Büroprojekten geben und somit die zukünftige Verwendung des historischen Baustoffs Lehm maßgeblich zu fördern. Besonders relevant sind die feuchtetechnischen Kennwerte hinsichtlich des Trocknungsverhaltens bzw. Schwindens der gewaltigen tragenden Lehmanteile gerade für das Holztragwerk des Museums.

Eine gleichfalls unzureichende Informationslage besteht im Hinblick auf die raumakustischen Eigenschaften von Lehm. Aktuell finden sich quasi keine quantitativen Informationen zum Schallabsorptionsverhalten von Lehmoberflächen in der Fachliteratur, wenn auch immerfort auf seine raumakustischen Vorteile verwiesen wird. Für schadensfreie, komfortable Räume sind belastbare akustische Messergebnisse in der Fachplanung jedoch dringend erforderlich, wenn der Einsatz von Lehm als Baustoff jenseits des Wohngebäudebereichs deutlich ausgeweitet werden soll.

2 Feuchtetechnische Kennwerte

2.1 Zielsetzung

Zur Untersuchung der Stampflehmwand als Raumklimakomponente wurden im Labor die feuchtetechnischen Kennwerte des Stampflehms im zukünftigen Neubau des Eingangs und Ausstellungsgebäudes untersucht. Die Grundlage für den folgenden Abschnitt bildet der Abschlussbericht des in diesem Arbeitspaket zuarbeitenden Instituts für Materialforschung und Bauwerkserhaltung (IfMB) (Wigger & Schmidtman, 2023).

2.2 Untersuchungen

An kleinformatigen Prüfkörpern aus Stampflehm wurden folgende Materialkennwerte identifiziert:

- Schwindverhalten
- Wasserdampfdiffusion
- Wasserdampfsorptionseigenschaften

Als Materialgrundlage diente die Fertigmischung Stampflehm Grob der Firma Conluto (Conluto - Vielfalt aus Lehm). Es wurden zwei Chargen (A und F) untersucht.

2.3 Schwindverhalten

Das Trockenschwinden horizontal und vertikal wurde anhand einer Serie aus Würfeln ($200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$) bei $23 \text{ °C} / 80 \text{ \% r.F.}$ ermittelt.

In Abbildung 1 sind die gemittelten Werte der dokumentierten Schwindverläufe der Würfel in horizontaler und vertikaler Richtung dargestellt. In den ersten beiden Tagen finden ca. 80 % der gesamten Formänderung statt. Der Schwindvorgang war nach ungefähr zwei Wochen abgeschlossen.

Das Endschwindmaß von 1,14 % in horizontaler und von 1,11 % in vertikaler Richtung annähernd gleich.

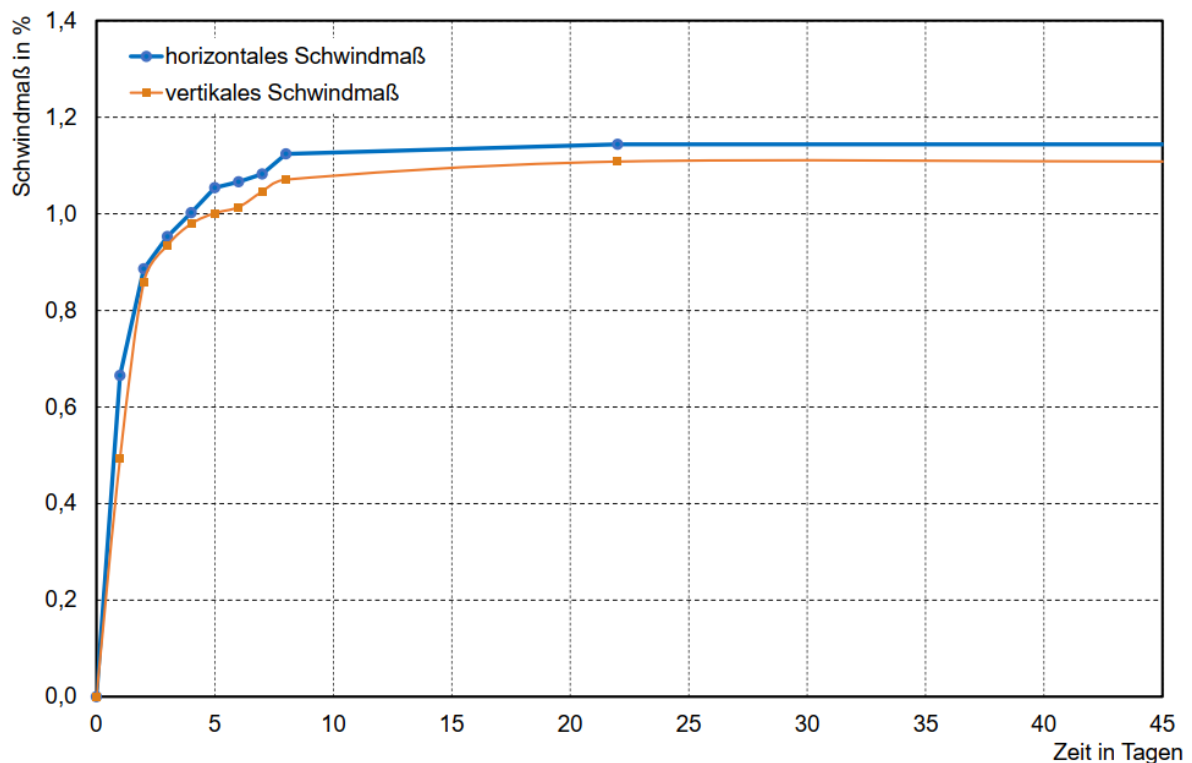


Abbildung 1: Schwindverlauf an Würfeln (200 x 200 x 200 mm³) (Wigger & Schmidtman, 2023)

2.4 Wasserdampfdiffusion

Die Messung der Diffusionswiderstandszahl erfolgte nach DIN EN ISO 12572 an handgestampften, ringförmigen Proben (Ø 50 mm) aus Stampflehm der Chargen A und F. Die Ergebnisse können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Diffusionswiderstandszahl von Lehmcharge F und A (Wigger & Schmidtman, 2023)

Untersuchung	Lehmcharge	Anzahl der Proben	Rohdichte ρ		Diffusionswiderstandszahl μ	
			kg/m ³	Variations-Koeffizient	-	Variations-Koeffizient
Conluto / IfMB (2021)	F	10	1982	0,02	9,0	0.04
	A	8	2013	0,02	13,3	0.04

2.5 Sorption

Die Sorptionseigenschaften wurden ebenfalls an ringförmigen Proben (Ø 50 mm) in drei Versuchsreihen ermittelt. Diese unterscheiden sich in der Lehmcharge, sowie der Probenherstellung und Korngrößenverteilung (siehe Tabelle 2). In den Versuchsreihen 1-F und 2-A wurde die größte Gesteinskörnung (Ø 22 mm, Überkorn < 30 mm) aussortiert. Die dritte Versuchsreihe (3-BK) wurde mit Proben von einer Bohrkernentnahme einer Stampflehmwand durchgeführt. Die Messungen der Sorptionseigenschaften der Proben wurden mittels DVS-Gerät in Anlehnung an die DIN EN ISO 12571 durchgeführt.

Tabelle 2: Parameter der Sorptionsproben (Wigger & Schmidtmann, 2023)

Versuchsreihe	1-F	2-A	3-BK
Anzahl	4	4	5
Stampflehm Charge	F	A	F
Anpassen der Mischung	Größtkorn aussortiert	Größtkorn aussortiert	Vollständige Mischung
Herstellung	manuell	manuell	Druckluft-Stampfer
Rohdichte bei Ausgleichsfeuchte	1980 kg/m ³	2010 kg/m ³	2120 kg/m ³
Probengröße	10g-30g	10g-30g	60g-160g
Bezugsgröße Feuchtegehalt	10% r. F.	10% r. F.	trocken

Die gemittelten Ergebnisse der Wasserdampfsorption und –desorptionsuntersuchungen mit dem DSV-Gerät sind der Abbildung 2 und der Tabelle 3 zu entnehmen.

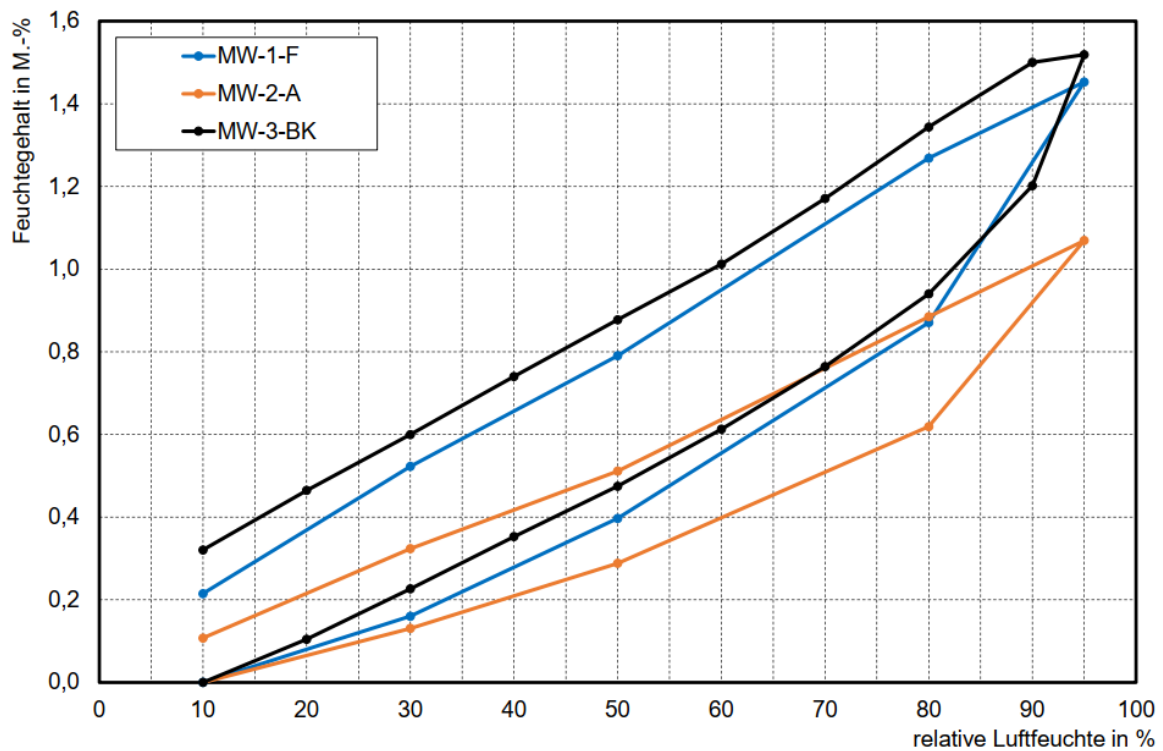


Abbildung 2: Mittlerer Feuchtegehalt der Versuchsreihen 1-F, 2-A und 3-BK gemäß Sorptionsuntersuchung bezogen auf 10 % relativer Luftfeuchte (Wigger & Schmidtmann, 2023)

Tabelle 3: Mittlere Feuchtegehalte der Versuchsreihe 1-F, 2-A und 3-BK gemäß Sorptionsuntersuchung (Wigger & Schmidtman, 2023)

Relative Luftfeuchte	Mittelwert			
	MW-1-F	MW-2-A	MW-3-BK	MW-3-BK-10%
%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
0			0,00000	
10	0,00000	0,00000	0,08362	0,00000
20			0,18801	0,10439
30	0,16012	0,13050	0,30999	0,22637
40			0,43638	0,35276
50	0,39676	0,28809	0,55822	0,47460
60			0,69624	0,61262
70			0,84785	0,76424
80	0,87066	0,61902	1,02359	0,93998
90			1,28551	1,20189
95	1,45280	1,06919	1,60251	1,51889
90			1,58395	1,50033
80	1,26857	0,88474	1,42763	1,34401
70			1,25434	1,17072
60			1,09580	1,01218
50	0,79052	0,51113	0,96108	0,87746
40			0,82385	0,74023
30	0,52241	0,32338	0,68326	0,59964
20			0,54805	0,46444
10	0,21471	0,10729	0,40410	0,32048
0			0,23350	0,14988

2.6 Wasserdampfadsorption

Die Prüfung der Wasserdampfadsorption wurde an Würfeln mit 20 cm Seitenlänge nach DIN 18945 durchgeführt.

Der Verlauf der Wasserdampfadsorption ist in Abbildung 3 zu sehen. Nach drei Tagen ist ein Ende der Feuchtigkeitsaufnahme nicht abzusehen.

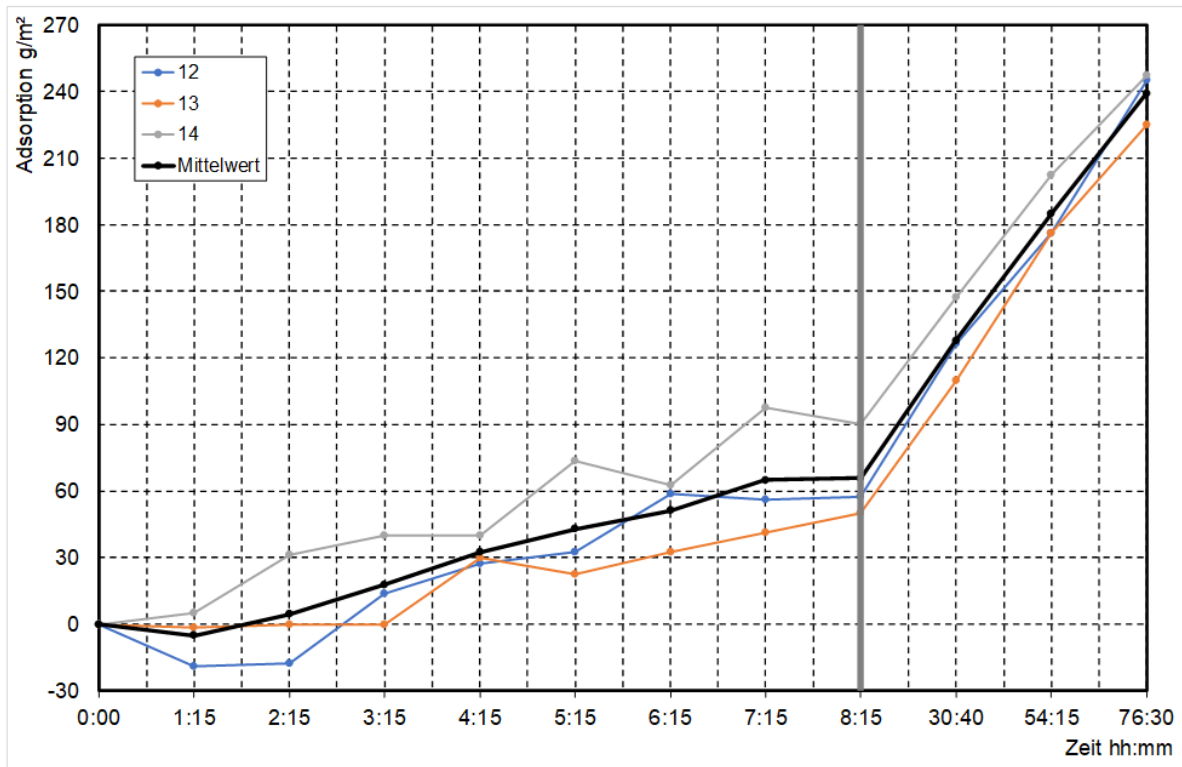


Abbildung 3: Wasserdampfadsorption an Würfeln, Kantenlänge 20 cm, 0-8 h und 8 bis 76 h (Wigger & Schmidtman, 2023)

2.7 Zusammenfassung und Vergleichswerte

2.7.1 Schwindverhalten

Das aus den Versuchsreihen gemittelte Endschwindmaß der beiden Chargen (A, F) 1,14 % und 1,11 % liegt in den allgemeinen Vorgaben der Lehmbauregeln (Volhard & Röhlen, 2009) (≤ 2 %) und ist damit eingehalten; die Vorgaben für Sichtbauteile ($< 0,5$ %) sind damit jedoch nicht eingehalten.

2.7.2 Wasserdampfdiffusion

Die ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen (μ) der beiden geprüften Stampflehmchargen liegen zum Teil im Bereich der in den Lehmbauregeln angegebenen Richtwerte.

Tabelle 4: Vergleichswerte der Rohdichten und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) (Wigger & Schmidtman, 2023)

Bauvorhaben/ Quelle	Charge	Rohdichte	Diffusionswiderstandszahl
		ρ kg/m ³	μ
Conluto / IfMB (2021)	F	1.982	9,0
	A	2.013	13,3
Lehmbau Regeln [L 1]	Richtwerte	300 – 2.200	5 - 10

2.7.3 Sorptionseigenschaften

Die mittleren Sorptionskurven der Lehmchargen A und F aus den ersten beiden Versuchsreihen 1-F und 2-A weichen sichtbar voneinander ab (siehe Abbildung 2).

Die mittlere Sorptionskurve, der aus dem Bohrkern gewonnenen Proben (3-BK) des dritten Versuchsdurchgangs, hat ein höheres Sorptionsvermögen als die Charge F aus dem ersten Versuchsdurchgang (1-F). Die Probe BK wurde ebenfalls aus der Stampflehmcharge F gefertigt, jedoch ohne die Größtkörner (22 mm, Überkorn < 30 mm) auszusortieren (vgl. Tabelle 2). Werden die Feuchtegehalte der Versuchsreihe 3-BK, wie die Versuchsreihen 1-F und 2-A, auf den Zustand der Proben bei 10 % r.F. bezogen, so stellt sich die Sorptionskurve nahe der Kurve von Versuchsreihe 1-F ein (vgl. Abbildung 1)

Die Versuchsreihe 2-A zeigt im Mittel ein etwas geringeres Sorptionsvermögen als die Versuchsreihen 1-F und 3-BK. Dies hängt möglicherweise mit der Art und dem Anteil der enthaltenden Tonminerale zusammen. Da die Versuchsreihen aus unterschiedlichen Chargen stammen, kann die Zusammensetzung unterschiedlich sein. Die Art und der Anteil der im Stampflehm enthaltenden Tonminerale hat großen Einfluss auf das Sorptionsverhalten. Ein Bentonit mit einem hohen Anteil des Dreischichtsilikats Montmorillonit kann bei 50 % r.F. 13 % Feuchte aufnehmen, während ein Kaolinit (Zweischichtsilikat) unter gleichen Bedingungen nur 0,7 % r.F. aufnimmt. (Minke, 2021)

In Abbildung 4 wird die vom IfMB ermittelte Sorptionsisotherme (0-95 % relative Luftfeuchtigkeit), Werten aus der Materialdatenbank Wufi für Lehm und Lehmputz sowie Messwerten der TU München (Ineichen, 2020) gegenübergestellt. Die ermittelte Sorptionsisotherme des IfMB weist im Vergleich durchgängig den niedrigsten Verlauf des Wassergehaltes entlang der steigenden relativen Luftfeuchte auf.

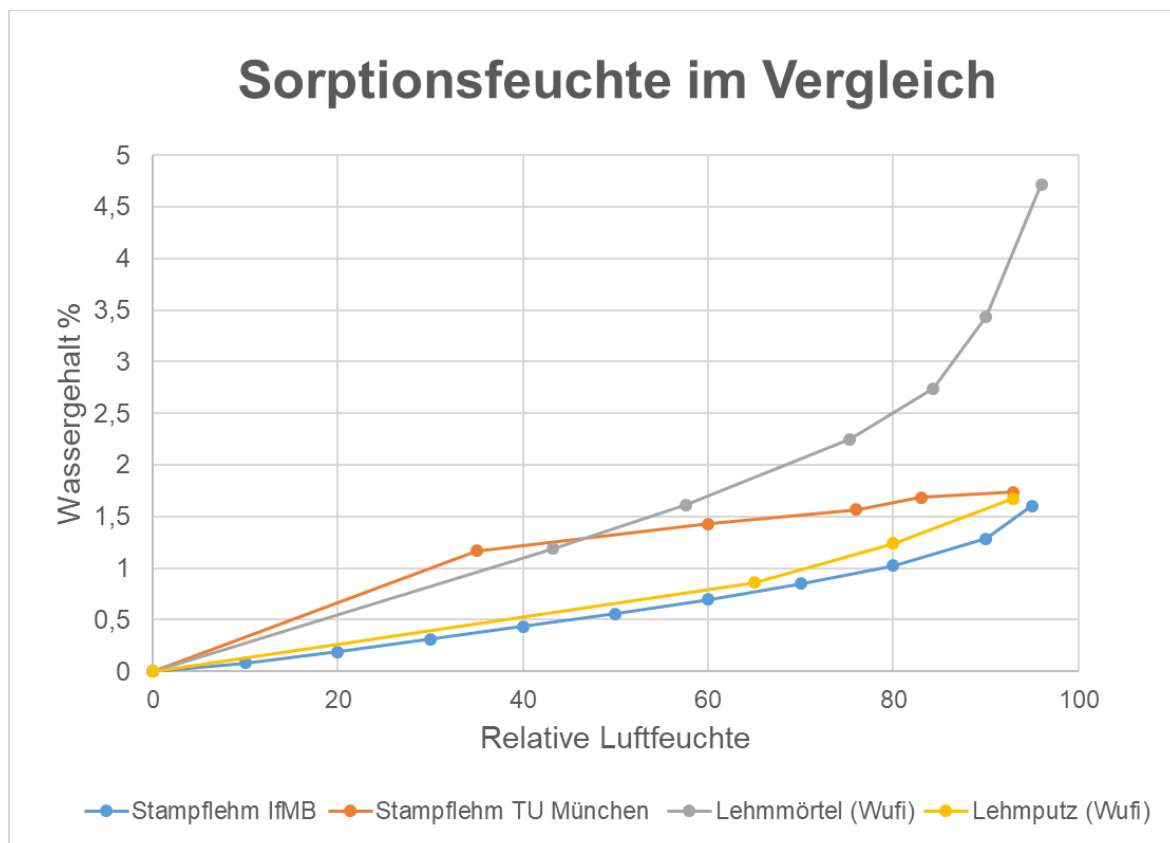


Abbildung 4: Sorptionsfeuchte im Vergleich

2.8 Implementierung in die Wufi-Materialdatenbank

Zur Implementierung in die Materialdatenbank der Software Wufi wurde als Ausgangsmaterial der bereits in der Datenbank vorhandene Datensatz von Lehmörtel genutzt. Diese Materialeigenschaften beruhen auf Messdaten der TU Dresden. Die Adaption für Stampflehm in diesem Datensatz erfolgte durch die Integration von Messwerten des IfMB, Literaturdaten und Angaben von Herstellern von Stampflehm.

Tabelle 5: Materialeigenschaften Stampflehm

Stampflehm (FLM)	
Material: Stampflehmwand(Datenbank)	
Rohdichte [kg/m ³]	2200
Spezifische Kapazität [J/kgK]	1606
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10C/50F [W/mK]	1,828
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	11,15
Typische Baufeuchte [kg/m ³]	200

Feuchtespeicherfunktion	

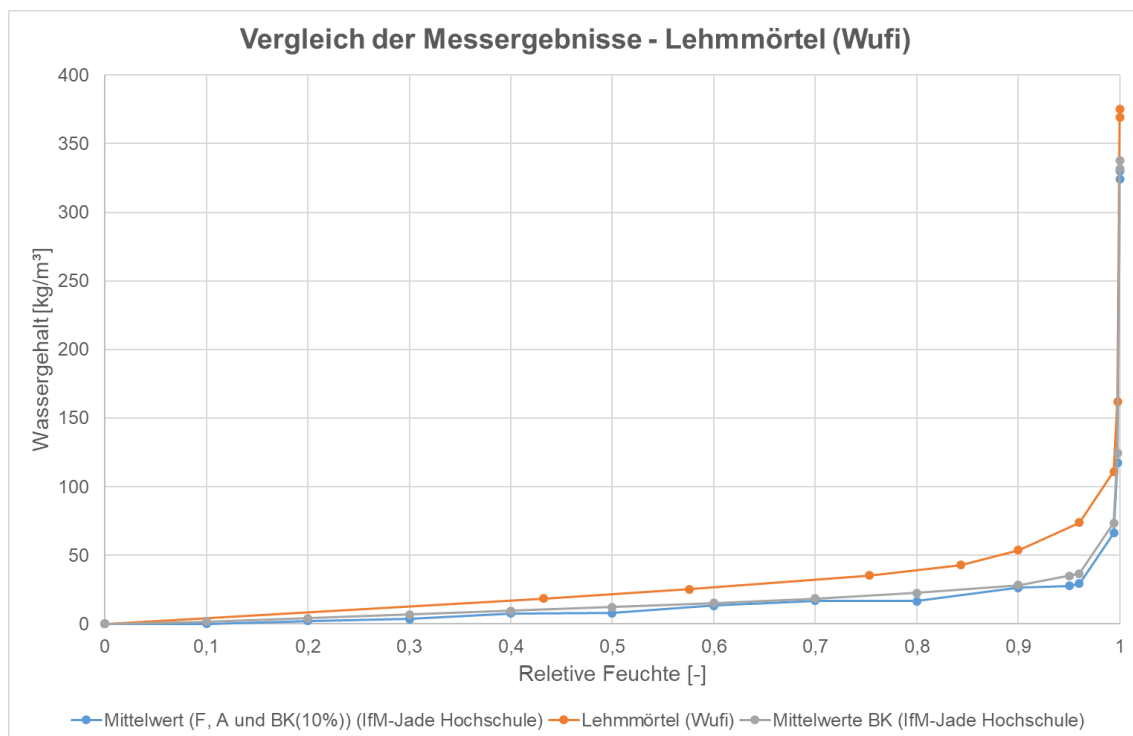


Abbildung 5: Vergleich der Werte der Feuchtespeicherfunktion

3 Raumklimasimulationen

3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Mittels der vorliegenden Simulationsstudie soll untersucht werden, wie sich wie sich das Nachhaltige Museum bauklimatisch im Vergleich zu einem mit konventionellen Baustoffen erstellten verhält.

3.2 Anforderungen an das Raumklima in Museumsgebäuden

Die Anforderungen an das Raumklima in Museumsgebäuden werden vor allem von konservatorischen Kriterien bestimmt. Um Ausstellungsstücke dauerhaft zu schützen, werden Grenzwerte für die Raumlufttemperatur, die relative Raumluftfeuchte und deren Schwankungsbreite festgelegt. Aus konservatorischer Sicht werden oft enge Klimabereiche gefordert, beispielsweise 18 bis 20 °C bei 50 % bis 55 % relative Luftfeuchte. Enge Klimabereiche führen allerdings zu einem hohen anlagentechnischen Aufwand. Werden neben konservatorischen Eigenschaften auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt, so lassen sich die folgenden anerkannte Klimaanforderungen aufstellen: Raumlufttemperatur im Bereich 20 bis 24 °C bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 45 % und 60 % (Leimer & Bode, 2001).

Die ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) hat eine international beachtete Richtlinie für die Anforderungen an das Raumklima von Museen, Archiven, Galerien und Bibliotheken aufgestellt. Die Richtlinie teilt diese Gebäudetypen in unterschiedliche Kategorien, in denen jeweils die Langzeit-, Saisonal- und Kurzzeitschwankungen festgelegt sind. Eine Übersicht über die Kategorien kann der Abbildung 6 entnommen werden.

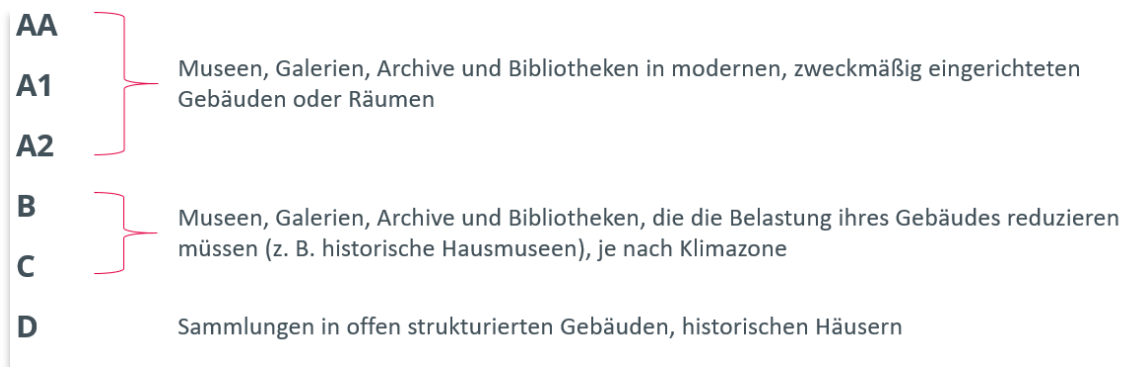


Abbildung 6: Übersicht Kategorien für das Raumklima in Museen, Galerien, Archiven, Bibliotheken der ASHRAE

Das Raumklima des neuen Ausstellungsraumes soll die Anforderungen der Kategorie A1 erfüllen. In der Kategorie A1 ist festgelegt:

- Langzeit-Schwankungen (1 Jahr)
 - relative Luftfeuchte: $\geq 35\%$ r.F., $\leq 65\%$ r.F.
 - Temperatur: $\geq 10\text{ °C}$, $\leq 25\text{ °C}$
- Saisonale Schwankungen (Temperatur 7 Tage; relative Luftfeuchte 30 Tage)
 - relative Luftfeuchte: erhöhen um 10 % r.F., sinken um 10 % r.F.
 - Temperatur: erhöhen um 5 K, sinken um 10 K
- Kurzzeit-Schwankungen (<saisonale Schwankungen (Temperatur <7 Tage; relative Luftfeuchte < 30 Tage))

- relative Luftfeuchte: $\pm 5 \%$ r.F.
- Temperatur: $\pm 2 \text{ K}$

Durch die Festlegung auf die Raumklimakategorie A1 wird ein saisonal schwankendes Raumklima zugelassen, durch die Einschränkung der Kurzzeitschwankungen wird jedoch über kurze Zeit gesehen ein nahezu konstantes Raumklimaverhältnis gefordert.

Die thermische Stabilität eines Gebäudes oder eines Raumes wird im Wesentlichen von folgenden Gebäudeeigenschaften beeinflusst:

- Fensterflächenanteil an den Außenwänden und Sonnenschutz
- Intensität des Luftaustausches mit der Umgebung
- Wärmespeichervermögen der Bauteile
- Hygroskopische Eigenschaften (Feuchtespeicherverhalten) der Bauteile

Dank Optimierung dieser Gebäudeeigenschaften kann der Anteil der freien Klimaregulierung des Gebäudes maximiert und der Anteil an anlagentechnischen Eingriffen zur Herstellung der geforderten Raumklimabedingungen reduziert werden. (Leimer & Bode, 2001)

Mit einer erfolgreichen Optimierung können die Investitions- und Betriebskosten sowie der Energieverbrauch der Anlagentechnik gesenkt werden.

3.3 Modellbildung

Der Neubau des Eingangs und Ausstellungsgebäudes umfasst etwa eine Bruttogrundfläche von 5.000 m². Einen Überblick bietet der Erdgeschossgrundriss in Abbildung 7.

Mithilfe der Software SketchUp Pro wurde ein abstrahiertes Modell erstellt. Dieses kann in Wufi Plus importiert werden. Das Modell bildet nur einen Teil des Gebäudes ab (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). In dem nachgebauten Gebäudeteil befindet sich der Ausstellungsraum (Zone 1), der Open Space Bereich/Eingangsbereich (Zone 2), Zwischenlager/Depot (Zone 3) und der Anlieferungsbereich (Zone 4). Die Simulationsstudien fokussieren die Validierung von verschiedenen Konstruktionsvarianten der Trennwände vom Ausstellungsraum zum Open Space Bereich und Zwischenlager bzw. Depot. Zur Durchführung der Untersuchungen wurde auf diese Weise ein Simulationsmodell entwickelt, welches die wesentlichen Informationen zum Vergleich der Konstruktionsvarianten enthält und unnötige Komplexität reduziert.



Abbildung 7: Ausführungsplan EG-Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum Detmold (ohne Maßstab) Quelle: ACMS Architekten GmbH



Abbildung 8: Ausschnitt des Ausführungsplans EG – Ausstellungsraum (ohne Maßstab) Quelle: ACMS Architekten GmbH

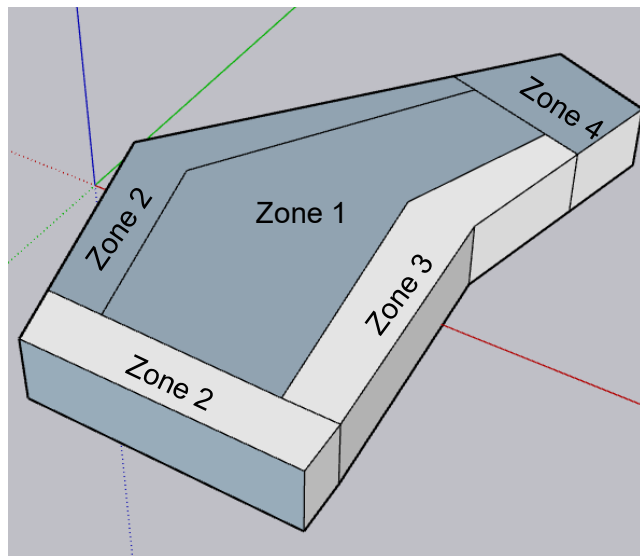


Abbildung 9: Modell des Gebäudeausschnittes in SketchUp pro

3.4 Wufi Plus

Die Raumklimasimulationen wurden mit der Simulationssoftware Wufi Plus durchgeführt. Das Simulationsprogramm dient zur dynamischen Simulation der raumklimatischen Bedingungen eines Gebäudes. Für diese Untersuchung wurde das in Abschnitt 3.3 beschriebene SketchUp-Modell in das Programm importiert (Abbildung 10 und Abbildung 11). Die festgelegten Bauteilaufbauten und Varianten wurden mit dem Programm nachgebildet. Materialkennwerte wurden der Software-Datenbank entnommen sowie die gewählten Randbedingungen festgelegt.

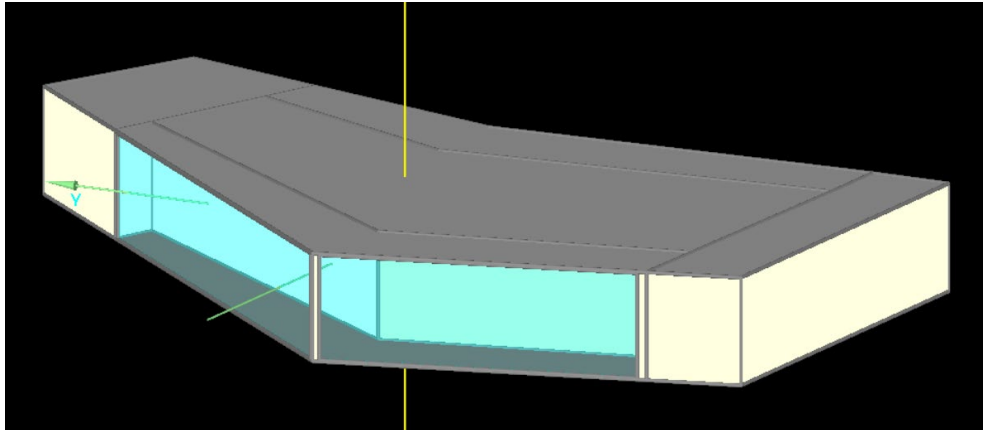


Abbildung 10: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus

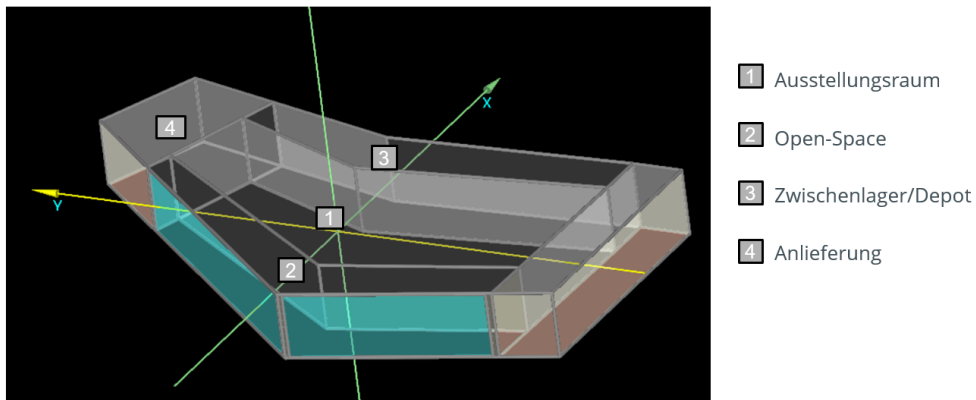


Abbildung 11: Außenansicht mit Raumordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus

3.5 Randbedingungen

Für die Raumklimasimulationen wurden folgende Randbedingungen als Grundmodell festgelegt: Die Klimabedingungen in den angrenzenden Zonen (Open Space, Anlieferung und Lager) wurden auf 20 °C und 50 % r.F. festgelegt. Schwerpunkt der Betrachtung der Parameterstudie ist die relative Luftfeuchtigkeit und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Raumklima im Ausstellungsraum. Aus diesem Grund wurde für den Ausstellungsraum eine Innenraumtemperatur von 20 °C festgesetzt, somit lassen sich die relativen Luftfeuchten im Modell des „konventionellen Ausstellungsraums“ und des mit nachhaltigen Baustoffen modellierten Ausstellungsraums in der realisierten Form miteinander vergleichen. Dabei werden die Daten übers ganze Jahr und exemplarisch an den einer Woche im Winter sowie einer Woche im Sommer beleuchtet.

Tabelle 6: Grundparameter der Raumklimasimulationen

Zeitraum/Zeitschritte	01.01.2023 – 31.12.2023 / 1 Stunde
Klimazone	Testreferenzjahr 2015 Detmold
Interne Lasten	Ganzjährig 40 Personen/h, 8 h/Tag, Öffnungszeiten 10 – 18 Uhr
Auslegungsbedingungen: <ul style="list-style-type: none"> • Ausstellungsraum • Open Space • Anlieferung • Lager 	<ul style="list-style-type: none"> • 20 °C , r.F. frei • 20 °C, 50 % r.F. • 20 °C, 50 % r.F. • 20 °C, 50 % r.F.
Lüftung	Ganzes Jahr, 0,05 1/h
Anfangsbedingung	20 °C, 50 %
Anlagentechnik	Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten (ideale HLK)

3.6 Bauteilaufbauten

Es wurden zwei Simulationsvarianten erstellt. Die Variante unterschieden sich in den Bauteilaufbauten der Raumumfassungsflächen. Die Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten der Raumumfassungsflächen kann Tabelle 7 entnommen werden. Der aktuelle Planungstand bildet im weiteren Verlauf die nachhaltige Variante, in der konventionellen Variante wurde wie im klassischen Museumsbau als Hauptbaustoff Beton verwendet. Im Bauteilaufbau für den Boden unterscheiden sich die Varianten nicht.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten der Raumumfassungsflächen (außen – innen)

Nachhaltig/Aktuelle Planung FLM	Konventionelle Bauweise
<p>Dach:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abdichtung • Dämmung WLG 040 – 24 cm • Dampfsperre • Brettstapelholzdecke – 12 cm 	<p>Dach:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abdichtung • Dämmung XPS WLG 040 – 32 cm • Stahlbetondecke – 25 cm
<p>Tragende Innenwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stampflehm – 60 cm 	<p>Tragende Innenwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stahlbeton in Sicht Qualität – 35 cm
<p>Nicht tragende Innenwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lehmputz – 3 cm • Stahlbeton – 30 cm • Lehmputz – 3 cm 	<p>Nicht tragende Innenwand:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stahlbeton in Sicht Qualität – 35 cm
<p>Bodenaufbau:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schaumglas WLG 040 – 28 cm • Stahlbeton – 25 cm • Trittschalldämmung WLG 035 – 5 cm • Estrich – 18 cm 	

3.7 Ergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Abbildung 12 bis Abbildung 17 dargestellt, wobei die Abbildung 12 den Temperaturverlauf im Innenraum über das Jahr darstellt und die Abbildung 13 bis Abbildung 17 die resultierenden relativen Feuchten im Innenraum für ein Jahr, eine Woche oder einen Tag im Sommer oder im Winter.

Die Innentemperatur liegt wie zuvor in beiden Varianten festgelegt konstant bei 20 °C. Die Jahresübersicht der Raumlufffeuchte zeigt deutlich, dass sich trotz Temperaturkonstanz die hygrischen Verhältnisse in den Ausstellungsräumen der berechneten Varianten unterscheiden. Obwohl beide Varianten aus Baustoffen bestehen, die eine hohe Wärmespeicherfähigkeit besitzen, zeigt die Variante *Nachhaltig* einen Verlauf, der geringere Schwankungen in Kälte- und Hitzeperioden aufweist. Besonders wird das in den Wochen bzw. Tagesverläufe der Kälte- bzw. Hitzeperiode deutlich. In den Monaten April und Mai sowie Oktober und November zeigen die Varianten einen ähnlichen Verlauf.

Deutlich wird demnach in allen Verläufen, dass im Fall von Spitzenlasten die Variante Nachhaltig im Vergleich zur Variante konventionell ausgeglichener ist, die Tagesamplitude demnach geringer ausfällt und näher am Richtwert von 50 % r.F. liegt.

Die mittlere Tagesamplitude beträgt bei Variante Nachhaltig 5,55 %-Punkte r.F. und liegt damit nennenswert unter der der Variante Konventionell mit 7,62 % (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Auswertung der Raumklimasimulationen

	Nachhaltig	Konventionell
Ø T	20 °C	20 °C
Ø r.F.	57,34 %	57,45 %
Jahresgrenze r.F.:		
- Min.	- 47,34 %	- 47,45 %
- Max.	- 65,00 %	- 65,00 %
Anzahl der Über / Unterschreitungen der Jahresgrenzen:		
- Min.	- 0	- 104
- Max.	- 3077	- 2831
Ø Amplitude der relativen Luftfeuchte am Tag	5,55 %/d	7,62 %/d

Jahresübersicht

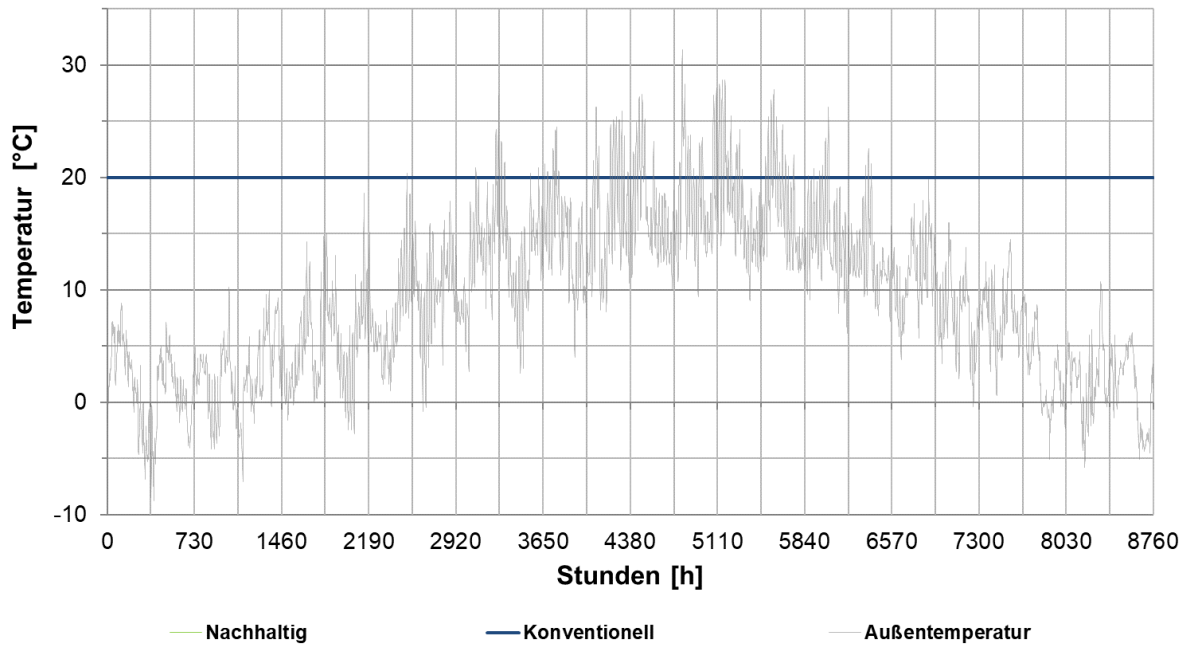


Abbildung 12: Jahresverlauf der resultierenden Temperaturen im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

Jahresübersicht

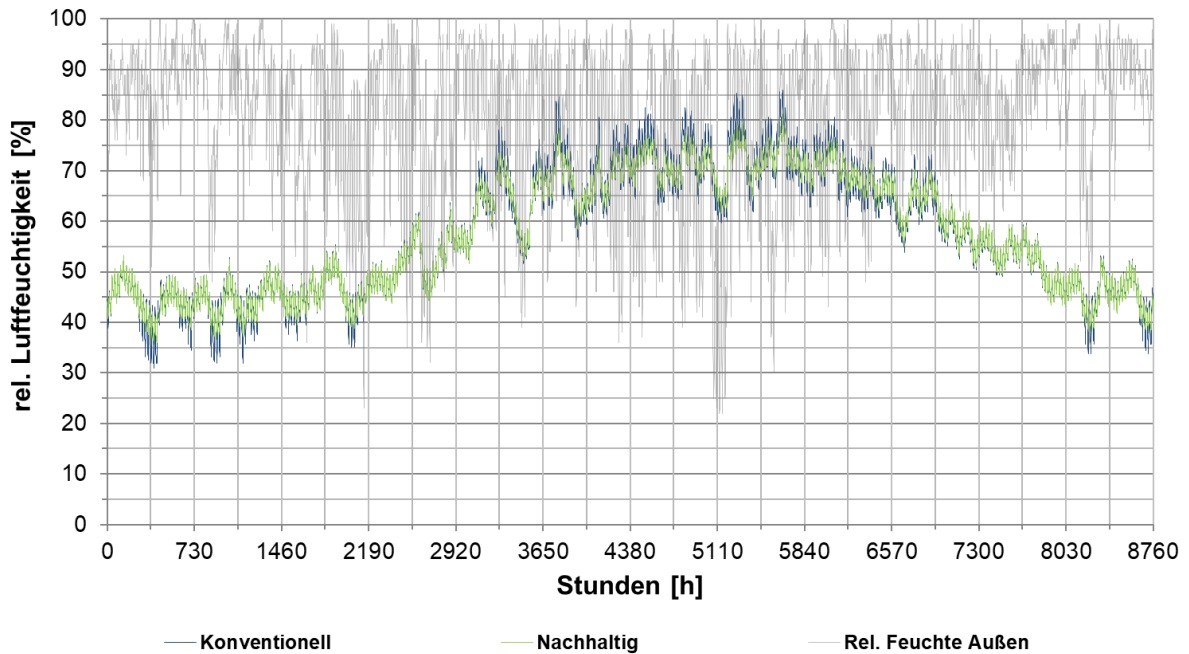


Abbildung 13: Jahresverlauf der resultierenden relativen Feuchten im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

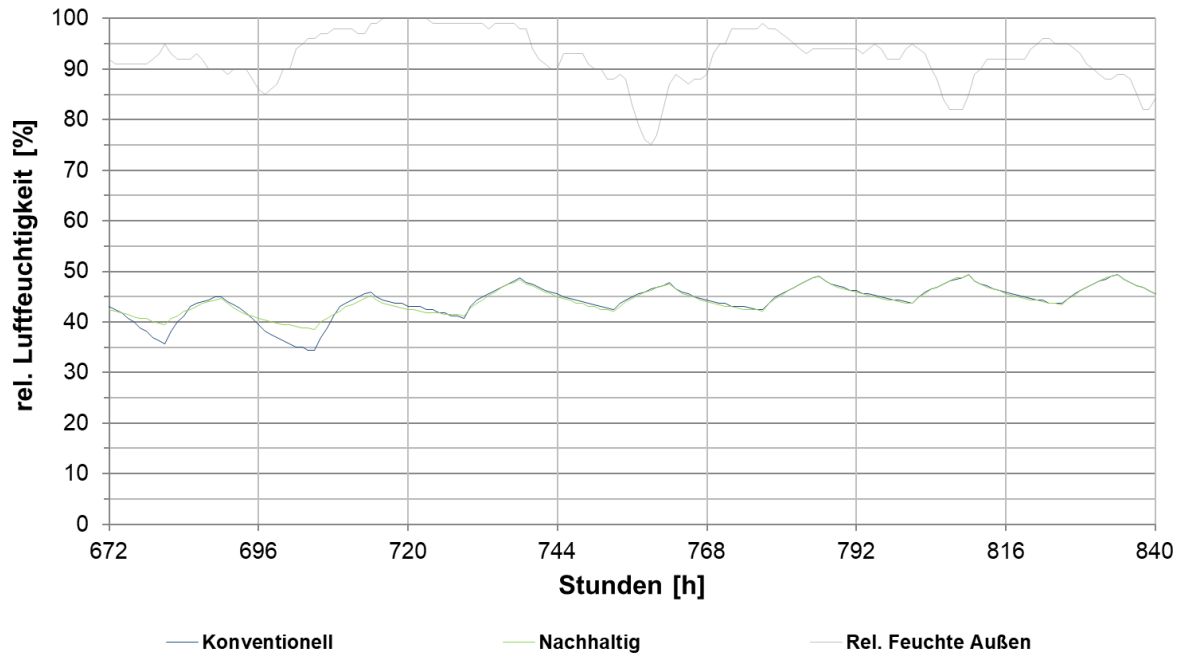


Abbildung 14: Wochenverlauf vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

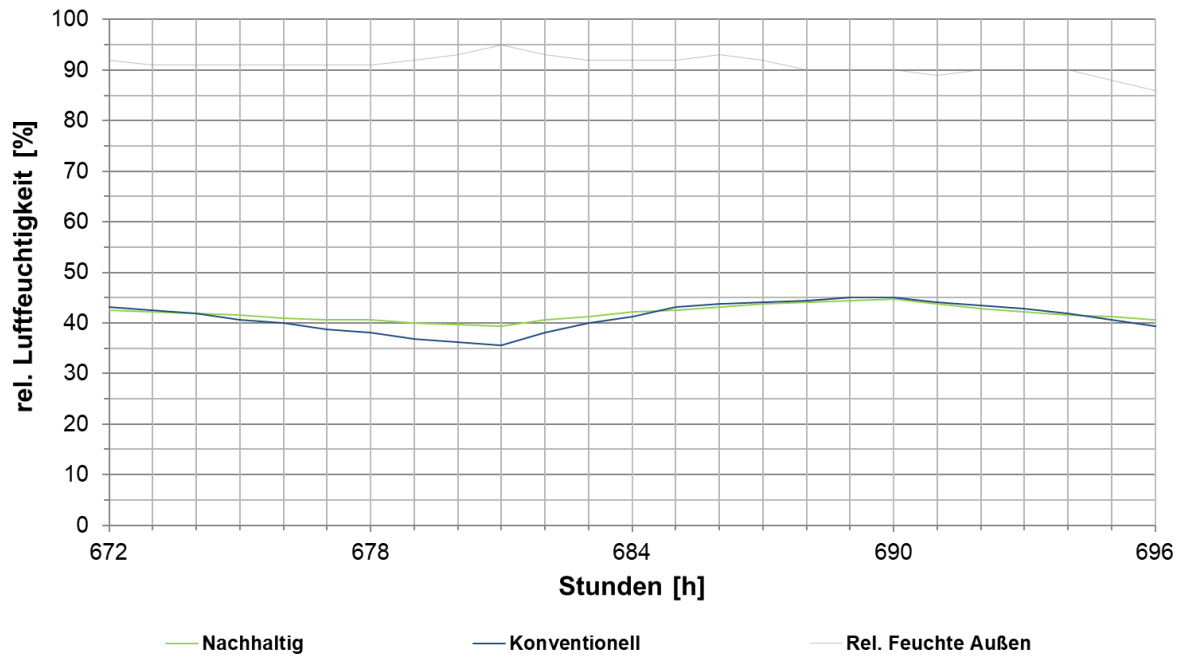


Abbildung 15: Tagesverlauf am 29.01. der resultierenden relativen Luftfeuchten im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

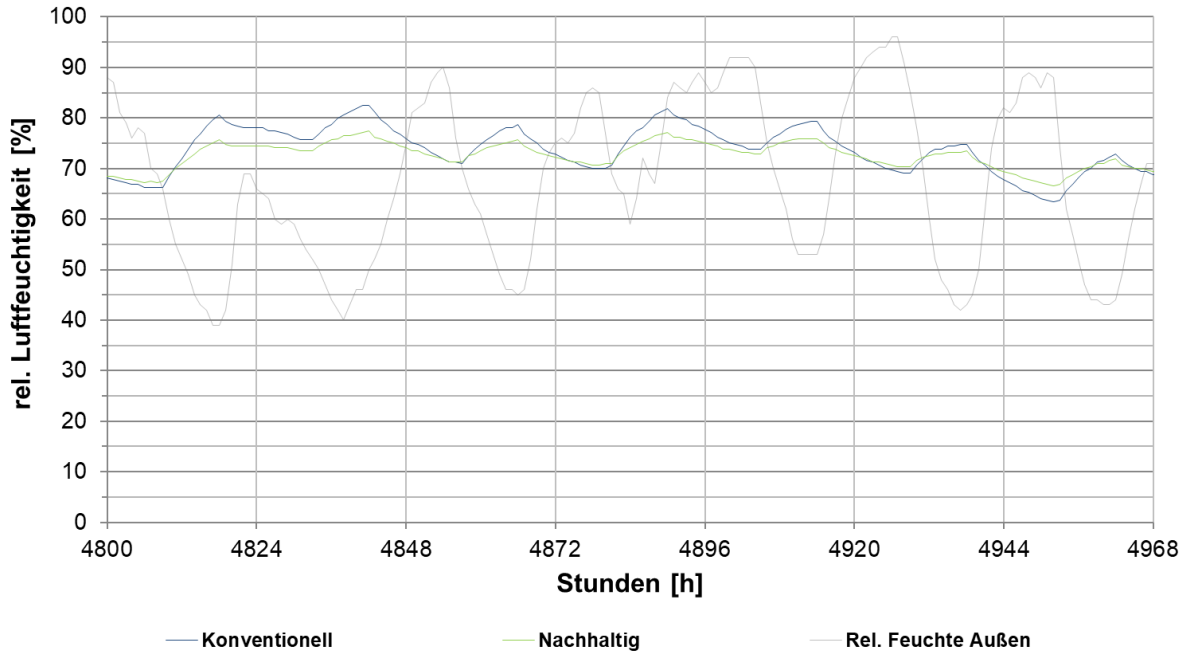


Abbildung 16: Wochenverlauf vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

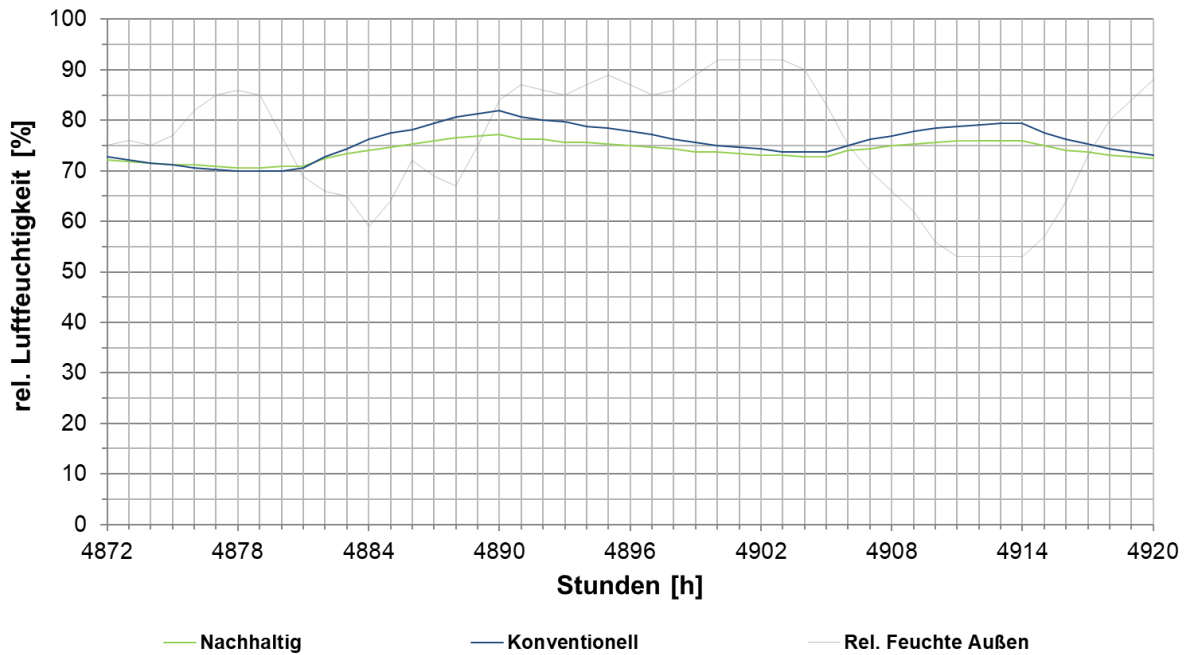


Abbildung 17: Tagesverlauf am 22.07. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für nachhaltige und konventionelle Bauweise

4 Trocknungsverlauf

4.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Stampflehmwände des Museumsneubaus werden als tragende Bauteile ausgeführt. Nach einer ausgedehnten Versuchsreihe im Labor (vgl. Gutachtliche Stellungnahme ZiE Stampflehmwände) wurde festgestellt, dass eine vollständige Belastung der Lehmwände mit dem geplanten Stahlbetonrähm erst erfolgen kann, wenn die Wände ihre Ausgleichsfeuchte erreicht haben. Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine Aussage zum Trocknungsverhalten der Stampflehmwände und der erforderlichen Trocknungsdauer bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte von 1,1 bis 1,9 M-% zu treffen.

4.2 Wufi Pro 5.1

Die Simulationen zum Trocknungsverhalten der Stampflehmwände wurde mit der Software Wufi Pro 5.1 durchgeführt. Die Simulationssoftware Wufi Pro bildet die Wechselwirkungen des Wärme- und Feuchtetransports unter freien Klimabedingungen auf Bauteilebene ab. Mit den Simulationen, in denen der Wassergehalt und der Trocknungsverlauf der untersuchten Bauteile berechnet wird, können Prognosen hinsichtlich der Trocknung, der Schimmelpilzbildung und der Feuchteschäden der Bauteile und Bauteilschichten getroffen werden.

4.3 Aufbau der Simulationsstudien

Die Stampflehmwände sollen auf ihr wärme- und feuchtetechnisches Verhalten untersucht werden. Als Materialkenndaten wurden die in diesem Forschungsprojekt ermittelten Daten verwendet (vgl. Abschnitt 2.7). Für die Untersuchungen wurden drei Parameterstudien angelegt mit Stampflehmwänden der Dicke 60 cm. Als Klimabedingungen wurden Außenklima, das Testreferenzjahr (TRY) für Detmold aus dem Jahr 2015 und Innenklima mit 20 °C und 50 % r.F. definiert.

4.4 Parameterstudie zur Trocknungsdauer

4.4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Parameterstudie war es, eine Langzeitprognose treffen zu können, zu welcher Zeit nach Herstellung sich im Bauteil bei unterschiedlichen Klimabedingungen die Ausgleichsfeuchte einstellt. Auf den beiden Bauteilseiten wurden in Variante 1 Außen- und in Variante 2 Innenklimabedingungen angesetzt. Die thermisch-hygrischen Verhältnisse wurden jeweils nach den Zeitschritten 1 Monat, 3 Monate, 6 Monate, 1 Jahr, 1,5 Jahre, 2 Jahre, 4 Jahre, 6 Jahre, 8 Jahre, 10 Jahre und 20 Jahre betrachtet.

4.4.2 Ergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 18 bis Abbildung 20 dargestellt. Der Wassergehalt im Bauteil nimmt ausgehend von der Einbaufeuchte erwartungsgemäß über die Zeit stetig ab. Bei beiden Varianten findet die Trocknung hauptsächlich in den ersten zwei Jahren statt. Bei der Außenklimavariante beträgt der Gesamtwassergehalt nach zwei Jahren noch 2,1 M-% und bei der Innenklimavariante 1,3 M-%. Unter Außenklimabedingungen wird die vollständige Trocknung nach 6 Jahren erreicht, während die bei Innenklimabedingungen bereits nach 4 Jahren der Fall ist.

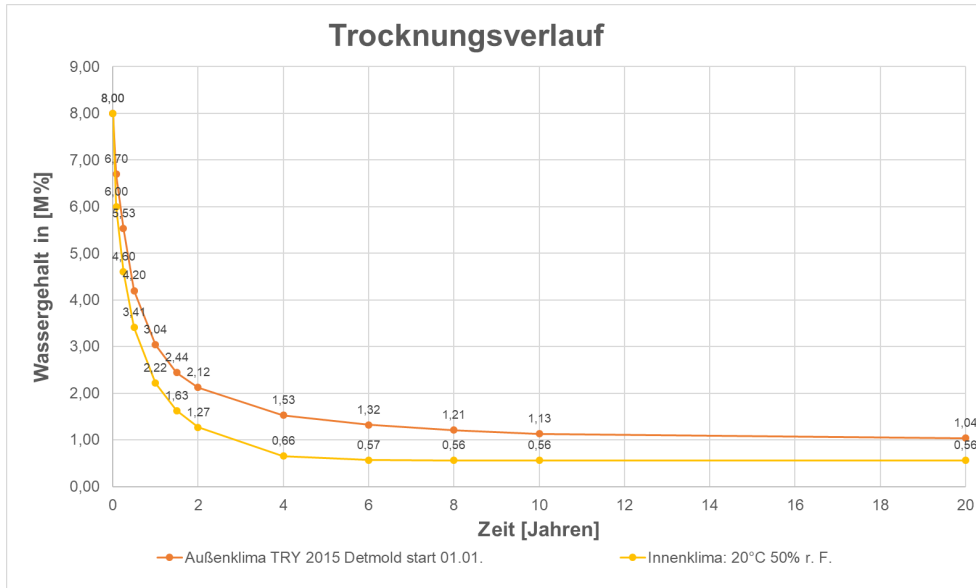


Abbildung 18: Simulierter Trocknungsverlauf der Stampflehmwand für einen Zeitraum von 20 Jahren unter Innenklima- sowie Außenklimabedingungen

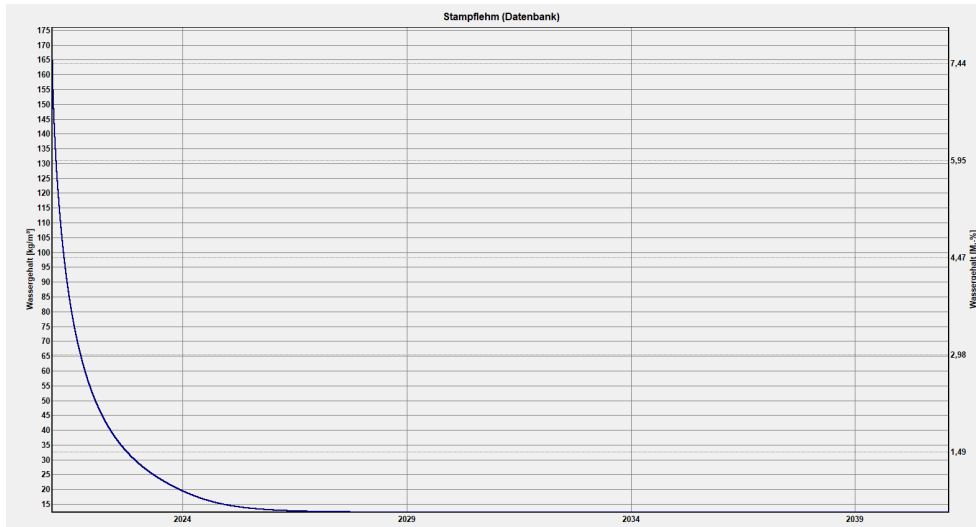


Abbildung 19: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 20 Jahre, Innenklima 20 °C und 50 % r.F.

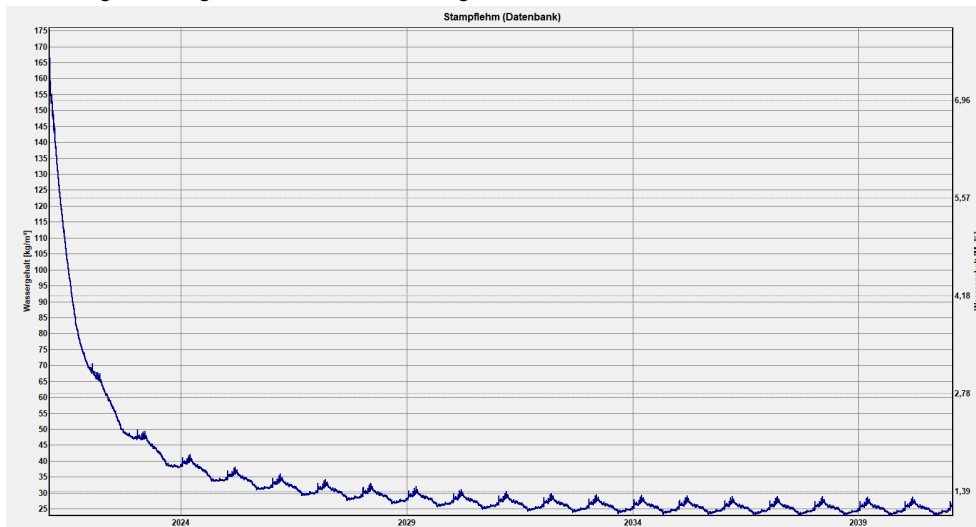


Abbildung 20: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 20 Jahre, Außenklima (TRY Detmold 2015)

4.5 Parameterstudie zur Trocknungsverlauf in Schichten

4.5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

In einer zweiten Parameterstudie wurde die Verteilung der Feuchte über das Bauteil untersucht, um eine Prognose über das Trocknungsverhalten der einzelnen Schichten zu ermöglichen. Dazu wurde die 60 cm dicke Stampflehmwand in sechs 10 cm dicke Schichten unterteilt. Wie bereits in der ersten Parameterstudie wurden die Untersuchungen unter Außenklima- bzw. Innenklimabedingungen auf jeweils beiden Bauteilseiten angestellt.

4.5.2 Ergebnisse

Sowohl bei der Innen- wie bei der Außenklimavariante stellt sich ein Feuchteprofil über den Bauteilquerschnitt ein. Die äußeren Schichten trocknen in beiden Fällen schneller als die innenliegenden. In der Mitte des Bauteils ist der Wassergehalt zu jedem Zeitpunkt am höchsten. Bei der Analyse der Ergebnisse der Variante 1 (Abbildung 21) lässt sich erkennen, dass unter Außenklimabedingungen nur die äußersten Schichten vom Außenklima beeinflusst sind (siehe Zunahme der Feuchte nach einem Jahr bei dann herrschendem Winterklima), im Inneren (ab Schicht 2) stellt sich ein linearer Trocknungsverlauf ein.

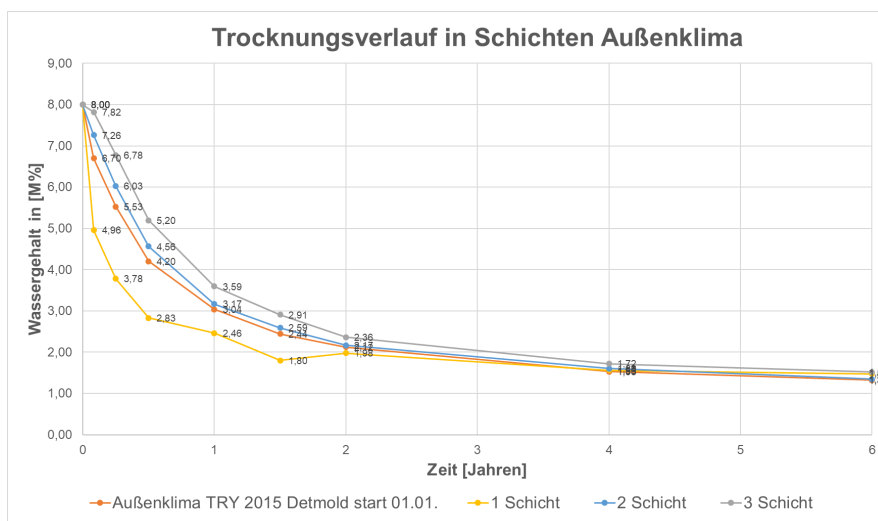


Abbildung 21: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand der ersten, zweiten und dritten 10cm Schicht für einen Zeitraum von 6 Jahren unter Außenklimaverhältnissen (TRY Detmold 2015)

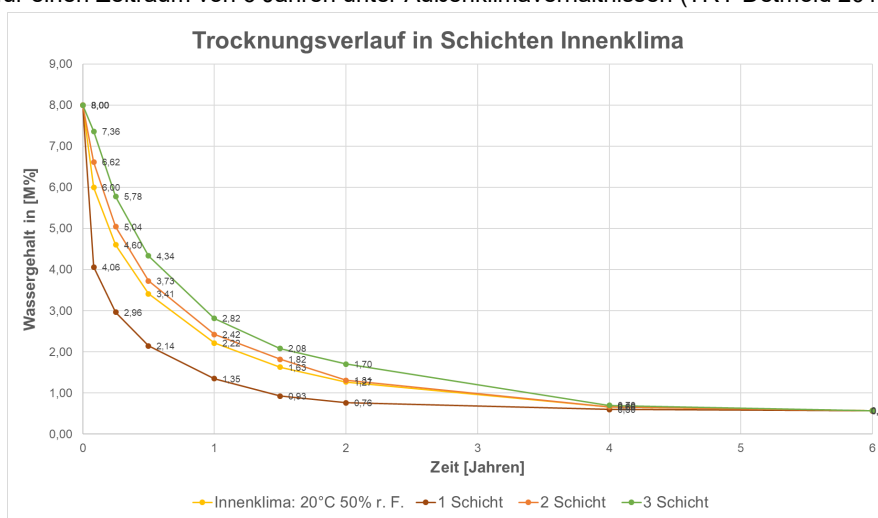


Abbildung 22: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand der ersten, zweiten und dritten 10 cm Schicht für einen Zeitraum von 6 Jahren unter Innenklimaverhältnissen von 20 °C und 50 % r.F.

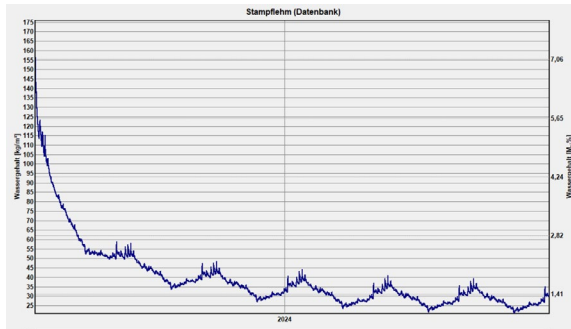


Abbildung 23: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 1 Außenklima (TRY Detmold 2015)

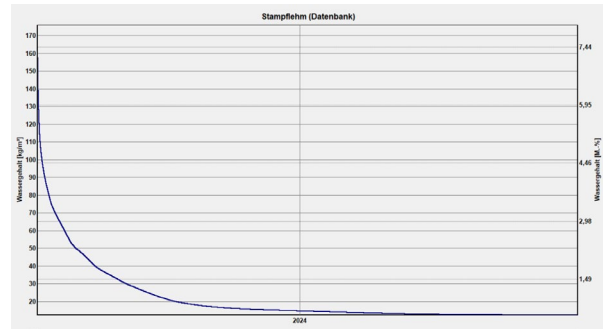


Abbildung 24: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 1 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.

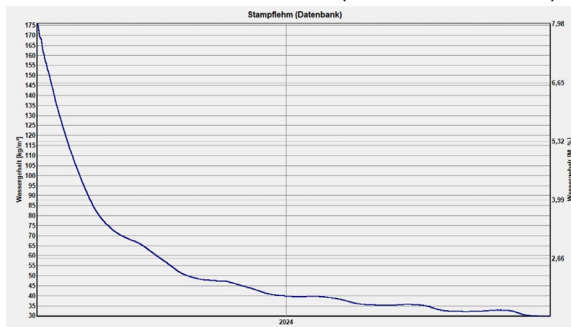


Abbildung 25: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 2 Außenklima (TRY Detmold 2015)

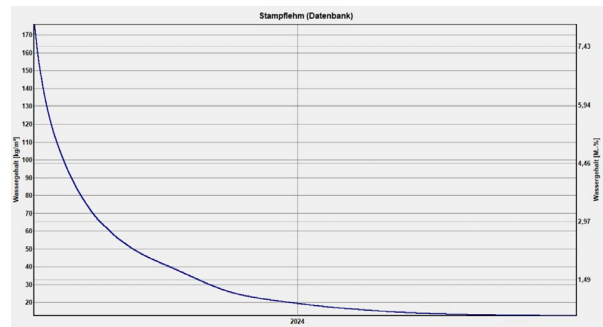


Abbildung 26: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 2 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.

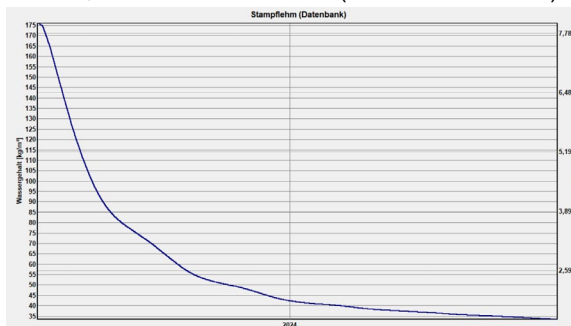


Abbildung 27: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 3 Außenklima (TRY Detmold 2015)

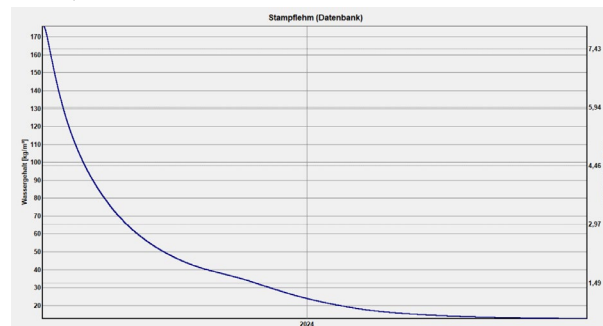


Abbildung 28: Ausgabe Wufi Pro Trocknungsverlauf für 6 Jahre, Schicht 3 Innenklima 20 °C und 50 % r.F.

4.6 Parameterstudie Trocknungsverlauf Bauphase Freilichtmuseum

4.6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die dritte Parameterstudie untersucht das Trocknungsverhalten während der Bauphase der Stampflehmwand und soll eine Prognose zum Zeitpunkt ermöglichen, zu dem der erforderlichen Feuchtegehalt zur Erreichung der gewünschten Druckfestigkeit erlangt ist.

Auch in dieser Studie wurde die 60 cm dicke Stampflehmwand in sechs 10 cm Schichten aufgeteilt. Als Startdatum wurde der erste April festgelegt, die ersten 6 Monate wird die freistehende Stampflehmwand mit Außenklima bewittert, woran anschließend die Stampflehmwände verhüllt und geschützt werden und eine maschinelle Trocknung einsetzt. Dazu wurde in den Simulationen ab diesem Zeitpunkt von Innenklimabedingungen ausgegangen.

4.6.2 Ergebnisse

Die Berechnungen zeigen, dass sich infolge der angepassten Klimabedingungen nach 6 Monaten eine schnelle Trocknung in den einzelnen Schichten einstellt. Die gewünschte Gesamtbauteilfeuchte von maximal ca. 1,9 M.-% (vgl. Gutachtliche Stellungnahme ZiE Stampflehmwände) stellt sich unter diesen Klimabedingungen nach ca. 1,5 Jahr ein.

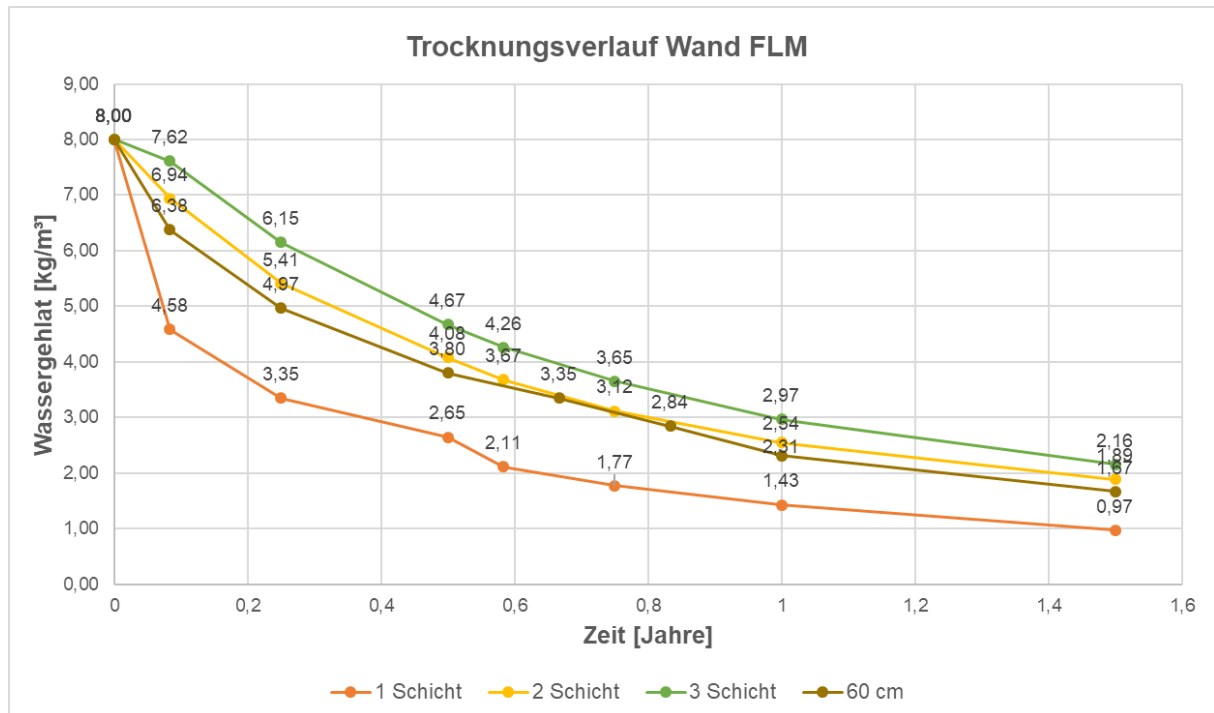


Abbildung 29: Simulierter Trocknungsverlauf der gesamten Stampflehmwand, der ersten, zweiten und dritten 10 cm Schichten für einen Zeitraum von 1,5 Jahren unter Klimabedingungen in der Bauphase

5 Raumklima- und Lehmwand- Monitoring

5.1 Zielsetzung

Um das thermisch-hygrische Potential des Baustoffes Lehm zu untersuchen, ist ein Messkonzept erforderlich, welches die Temperatur und Feuchtigkeit des Bauteils über den gesamten Querschnitt erfasst. Die isolierte Betrachtung der Lehmwand reicht jedoch zur Interpretation der Messdaten nicht aus, da der wesentliche bauphysikalische Vorteil von Lehm in seiner „Pufferwirkung“ auf die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit der direkten Umgebung liegt. Daher sollte die Systemgrenze der Lehmwand mindestens um die Temperatur und Luftfeuchtigkeit des umgebenen Innenraumes ergänzt werden, um Wechselwirkungen beider Systeme aufzuzeigen. Um das Leistungsvermögen des Lehms als funktionalen Baustoff weiter zu untersuchen, sind zusätzlich Informationen über technische Systeme wichtig, die diese Werte beeinflussen, wie Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK). Aus diesem Grund sollte der Messaufbau nicht gesondert betrachtet sondern in die Gebäudetechnik integriert werden; so lassen sich die Puffereigenschaften der Lehmwand nicht nur quantifizieren, sondern die Erkenntnisse für einen energieoptimierten Betrieb der HLK nutzen, um Nachhaltigkeit und Autarkiewerte im Betrieb des Freilichtmuseums zu optimieren.

Aus der Integration des Messaufbaus der Lehmwand in die Infrastruktur der Gebäudeleittechnik (GLT) ergeben sich weitere Potentiale und Synergieeffekte im Vergleich zu einer „Insellösung“. So können auf diese Weise nicht nur Messdaten mit geringem Zeitaufwand aus beiden Systemen (Museumsgebäudebetrieb und Lehmwand) ausgewertet und verglichen werden, sondern dem Museum zusätzliche Nachhaltigkeitsindikatoren wie, durch die Lehmwand, eingesparte Strom- und Heizkosten und verhinderte CO₂-Emissionen zur Verfügung gestellt werden.

Um der GLT die Sensordaten zur Verfügung zu stellen, müssen die Datenkabel mit nahegelegenen Verteilerdosen im Gebäude verbunden werden. Außerdem sind die Daten in einer für das Gebäudenetz nutzbaren Form zur Verfügung zu stellen und die Sensoren softwareseitig in der GLT-Steuerung hinzuzufügen. Nach der Integration der Messtechnik ist ein Zugriff auf die Sensordaten der Lehmwand sowie auf weitere nützliche Sensordaten des Gebäudes einzurichten.

Eine zusätzliche Randbedingung stellt die Sichtbarkeit des Messaufbaus dar. Da die Lehmwand den Ausstellungsraum umgibt, wird ein möglichst unsichtbarer Messaufbau angestrebt, um eine optische Beeinträchtigung des Raumes für die Besucher zu minimieren.

5.2 Messaufbau

Es sind insgesamt sechs Messstellen vorgesehen. Fünf Messstellen befinden sich in den Lehmwänden der Ausstellung und eine weitere in der Lehmwand des Seminarraumes. Jede Messstelle besteht aus fünf über den Querschnitt der Lehmwand verteilten Feuchte-/Temperatursonden: drei mittig liegende Messsonden sowie zwei Messsonden speziell für Oberflächen. Um die Kabelstrecken klein zu halten, wurde bei der Positionierung der Messstellen der Weg zum nächstgelegenen Heizungsverteiler berücksichtigt.

Zur Montage der Sensoren werden fünf Bohrungen in unterschiedlicher Tiefe der Lehmwand pro Messstelle durchgeführt. Da die Sensorköpfe trocken bleiben müssen, wird der Sensor in einem Zylinder aus getrocknetem Lehm vormontiert und gemeinsam mit diesem in die Lehmwand geschoben. Anschließend werden die Löcher mit Lehm geschlossen. Um die Kabelführung für den Besucher unsichtbar zu gestalten, wird die Lehmwand vom Boden bis zur Montagehöhe der Sensoren angeschlitzt und das Messkabel in diesem Schlitz bis zum Boden geführt. Anschließend wird der Kabelschlitz mit Lehm geschlossen und so nachbearbeitet, sodass dieser nicht mehr sichtbar ist. Die Positionen der Schlitze werden dokumentiert.

Kommunikation

Zur Integration der Sensordaten in die GLT werden die Sensoren mit, bereits vorgesehenen, Verteilern für die Heizung verbunden. Auf diese Weise wird eine Verbindung mit der Direct-Digital-Control-Komponente (DDC) hergestellt. Zur Kommunikation mit der DDC kann das Modbus RTU-Protokoll verwendet werden. Den Sensoren ist eine Umwandlungseinheit nachgeschaltet um die Daten entsprechend des Protokolls zu senden. Nach der physikalischen Verbindung der Sensoren müssen diese in der GLT des Freilichtmuseums softwareseitig hinzugefügt werden. Ein Zugriff auf die Sensordaten kann mittels VPN oder regelmäßiger Zusage der Messdaten in einer CSV-Datei erfolgen.

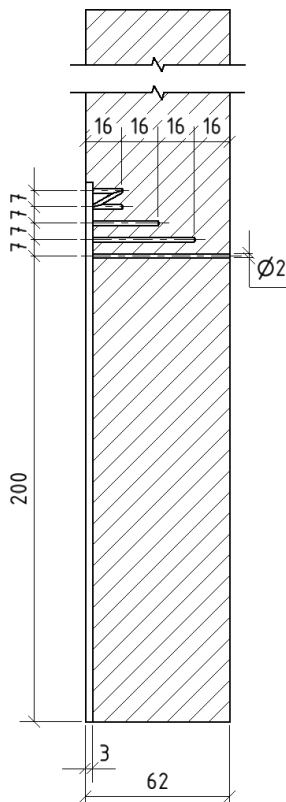


Abbildung 30: Skizze Einbauhöhe der Sensoren je Messstelle (Maße in cm)

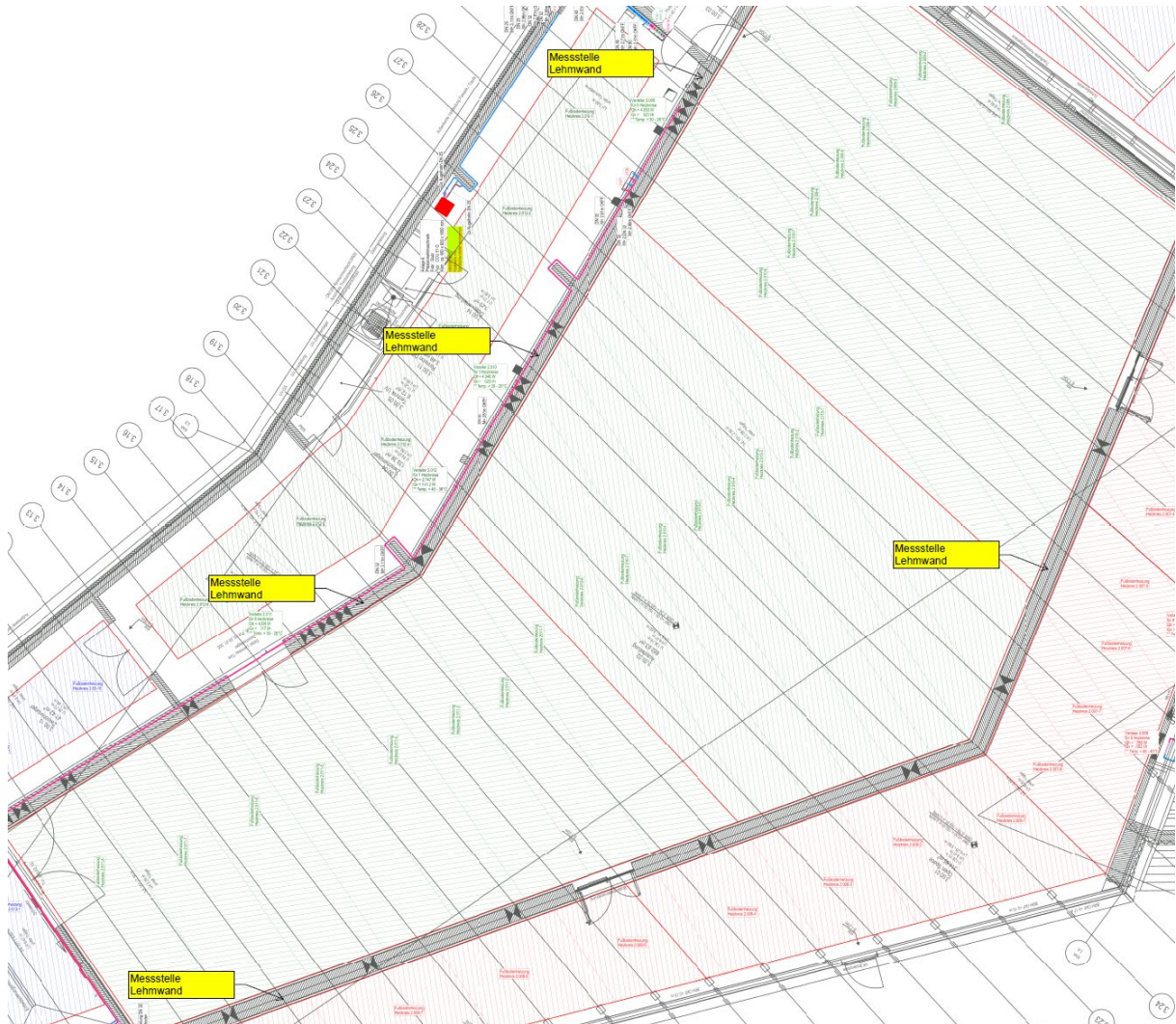


Abbildung 31: Positionen der Messstellen im Ausstellungsgebäude

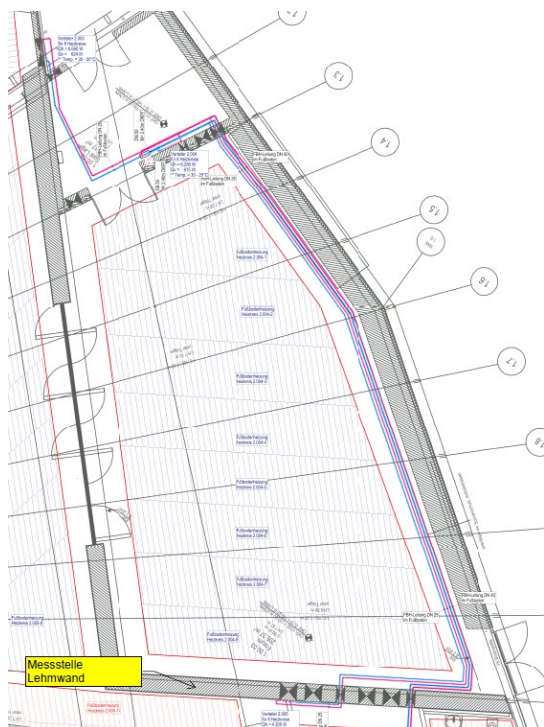


Abbildung 32: Messstelle Seminarraum

5.3 Technische Daten der Messsonden

Tabelle 9: Technische Daten der Messsonden (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern <https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf>)

	Typ A (DKRF500)	Typ B (DKRF505)
Abmessungen Sondenkopf (L x D)	101 x 8 mm	38 x 9 mm
Messbereich	-40...+120 °C	-40...+120 °C
Messgenauigkeit		
r.F. 0...80%	±2,5 %	±2,5 %
r.F. darüber	±3,0 %	±3,0 %
T -40...+80°C	±0,3 °C	-
T -40...+120°C	-	±0,3 °C
T Außerhalb	+0,6 °C	±0,6 °C

Feuchte-/Temperatursonde (Typ A)

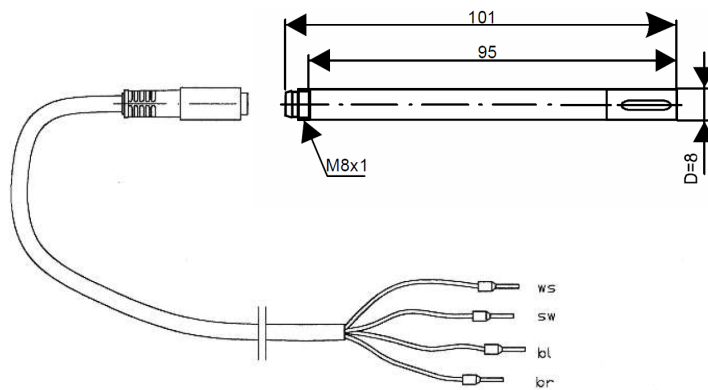


Abbildung 33: Modell: DKRF500-SA-MOD-0-0-0-V10000-0 Digit. RS485/Modbus-RF/T-Sonde (Typ A) (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern <https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf>)

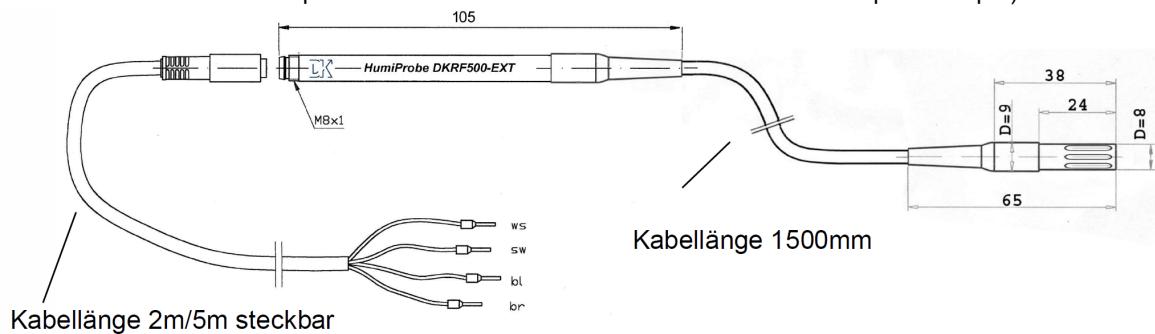


Abbildung 34: Modell: DKRF505/O/V-SA-MOD-0-0-0-V10000-0 Digitale Modbus-RF/T-Sonde (Typ B) (Quelle: Datenblatt Driesen + Kern <https://www.driesen-kern.de/downloads/db-dkrf5xx-humiprobe-de.pdf>)

6 Schallabsorptionseigenschaften von Lehm

6.1 Einleitung, Stand der Forschung und Zielsetzung

Obwohl Lehm als ein Baumaterial gilt, welches gute raumakustische Eigenschaften und ein hohes Schallabsorptionsvermögen aufweist, liegen nur wenige quantitative Forschungsergebnisse die diese Aussage stützen vor.

Zum aktuellen Forschungsstand zu Schallabsorptionseigenschaften von Lehmoberflächen lassen sich u.a. eine Studie zu Lehmputzen (Randazzo et al., 2016) und ein DBU–Forschungsbericht (Gathof et al., 2022), in dem Wellerlehm und Stampflehm untersucht wurden, aufführen.

In der Studie zu Lehmputzen wurden Messungen von Lehmputzen mittels Impedanzrohr durchgeführt, die zeigen, dass das Schallabsorptionsvermögen von Lehmputzen im Vergleich zu in der Baupraxis üblichen Putzen höher ist. Ebenso ist ein Ergebnis der Untersuchungen, dass Lehmputzmischungen mit Pflanzenfasern ein höheres Schallabsorptionsvermögen aufweisen als welche ohne Faseranteile. (Randazzo et al., 2016)

Neuere Messungen wurden in einem DBU–Forschungsprojekt durchgeführt. Hier finden sich Ergebnisse von Hallraummessungen an Blöcken aus sogenanntem Wellerlehm sowie an einer flächig gestampften Stampflehmoberfläche. Für die Anfertigung der Wellerlehmfläche wurde ein gestampfter, mit Stroh versetzt Lehmkörper in ca. 10 cm starke Scheiben geschnitten, welche auf dem Hallraumboden flächig ausgelegt wurden. Die Messungen wurden im losen verlegten sowie im anschließend verfugten Zustand vorgenommen. Die Stampflehmfläche wurde innerhalb eines 5 cm hohen Holzrahmen flächig verdichtet, d.h., die Oberfläche ähnelt einer historischen Fußbodenfläche. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wellerlehmplatten mit Fugenbild ein höheres Schallabsorptionsvermögen aufweisen als ohne Fugenbild ($\alpha_w = 0,35$ bzw. $\alpha_w = 0,15$). Beim flächig gestampften Stampflehm konnte nach einer Trocknungszeit von 8 Tagen ein bewerteter Schallabsorptionsgrad von $\alpha_w = 0,30$ ermittelt werden. (Gathof et al., 2022)

Die Untersuchungen bringen jedoch keine direkten Erkenntnisse zu Schallabsorptionseigenschaften von klassischen Stampflehmwände und Lehmputzen.

Das Ziel ist, Lehmoberflächen messtechnisch zu untersuchen und ihr Schallabsorptionsvermögen mit, in der Baupraxis üblichen, Materialien zu vergleichen und einzuordnen. Dazu wurden Messungen zur Ermittlung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade mittels Hallraum-Verfahren nach DIN EN ISO 354 (2003-12 Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen) (DIN EN ISO 354:2003-12) von unterschiedlichen Lehmoberflächen durchgeführt. Weiter wurden Untersuchungen von Stampflehm mittels Impedanzrohr (Kundt'sches Rohr) nach DIN EN ISO 10534-1 (2001-10 Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis) (DIN EN ISO 10534-1:2001-10), unter Berücksichtigung der Oberflächenstruktur und der Materialfeuchte durchgeführt.

6.2 Hallraummessungen

6.2.1 Messaufbau

Die Messungen wurden im Hallraum des Erich-Thienhaus-Instituts in Detmold durchgeführt. Die Abmessungen des Hallraumes und die ungefähre Positionierung des Messequipments können aus der folgenden Skizze entnommen werden:

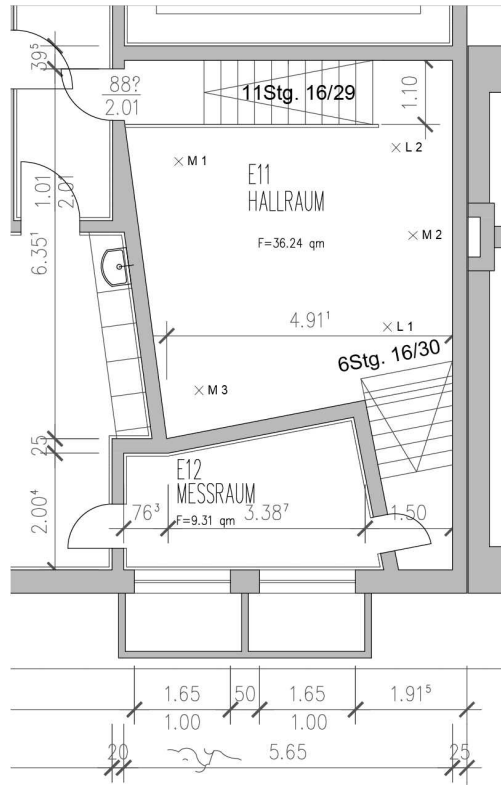


Abbildung 35: Grundriss des Hallraumes (Ohne Maßstab)

Für die Messungen wurde folgendes Messequipment verwendet:

- Lautsprecher: Globe Source Radiator von Outline
- Subwoofer: DVS 115 SW von Outline
- Mikrofone: M2010 von NTi Audio
- Messinstrument: XL2 von NTi Audio
 - Nachhallzeitmessung T_{30}
- Audio-Signalgenerator: DR2 von NTi Audio
 - Signalausgabe: Rosa Rauschen

Die Messungen im Hallraum wurden nach DIN EN ISO 354:2003 durchgeführt. Die in der Norm gestellten Anforderungen an den Hallraum, das Prüfobjekt und den Messaufbau wurden entsprechend eingehalten.

6.2.2 Aufbau der Messkampagnen

In Absprache mit den Projektbeteiligten wurden die folgenden Aufbauten für die Messkampagnen im Hallraum ausgewählt:

Messkampagne 1:

1. Stampflehmwand Stampflehmischung 1 (grob 0-22 mm)
2. Stampflehmwand verputzt mit Lehmoberputz 1
3. Konstruktionsaufbau aus einer Lehmbauplatte (16 mm) mit Lehmfeinputz

Während der Messkampagne wurde beschlossen die verputzte Oberfläche vor dem Ausbau aus dem Hallraum mechanisch zu verändern und ebenfalls zu messen.

Die verwendeten Baustoffe aus der Messkampagne 1 wurden von der Firma Conluto – Vielfalt aus Lehm zur Verfügung gestellt.

Messkampagne 2:

1. Stampflehmwand Stampflehmischung 2 (grob 0-16 mm)
2. Stampflehmwand verputzt mit Lehmoberputz 2

Die verwendeten Baustoffe aus der Messkampagne 2 wurden von der Firma Claytec Baustoffe aus Lehm zur Verfügung gestellt.

Tabelle 10: Baustoffkenndaten Stampflehm und Lehmputz

	Stampflehm grob 0-22 mm	1 Stampflehm grob 0-16 mm	Lehmoberputz 1	Lehmoberputz 2
Trockenrohdichte	2.200 kg/m ³	Ca. 2.300 kg/m ³	1.800 kg/m ³	1.800 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	1,4 W/mK	1,5 W/mK	0,91 W/mK	0,91 W/mK
Dampfdiffusions- widerstandszahl μ	5/10	5/10	5/10	5/10
Baustoffklasse	A1	A1	A1	A1
Druckfestigkeit	≥ 3 N/mm ²	2,0 N/mm ²	2,6 N/mm ²	2,0 N/mm ²
Trockenschwindmaß	< 0,5 %	Ca. 0,7 %	1,8 %	2,5 %

6.2.3 Durchgeführte Messungen

Die durchgeführten Messungen wurden in Versuchsreihen unterteilt, diese wiederum in unterschiedliche Teile. Die Versuchsreihen und die dazugehörigen Messungen der Messkampagnen sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführt.

Bei der Versuchsreihe 1.a (Stampflehmischung 1) und 3.a (Stampflehmischung 2) wurde während dieser Phase vom Einbau bis zur getrockneten Oberfläche in regelmäßigen Abständen zu verschiedenen Trockenstadien die frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade ermittelt. Ähnlich wurde in der Versuchsreihe 1.b.1 (Lehmoberputz Hersteller 1) und 3.b (Lehmoberputz Hersteller 2) verfahren; hier wurde die Veränderung der Nachhallzeit und die damit verbundene Änderung des Schallabsorptionsgrades vom Aufbringen des Lehmoberputzes bis zur trockenen Oberfläche messtechnisch erfasst. Im letzten Teil der Versuchsreihe 1 mit den Messungen 1.b.2 und 1.b.3 wurden die Messungen der mechanisch veränderten Lehmoberputzoberfläche durchgeführt. Die Versuchsreihe 2 bildet die Messungen im Zusammenhang mit der Lehmbauplatte, im unbehandelten und beschichteten Zustand, ab. Aufgrund der hohen Baufeuchte, die von den Prüfoberflächen ausging und den damit verbundenen Einsatz handelsüblicher Bautrocknungsgeräte, schwankte das Raumklima stark. Die einzelnen Messungen wurden dementsprechend nicht unter gleichen Klimabedingungen durchgeführt, die bei den Messungen herrschenden Klimabedingungen sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 festgehalten.

Tabelle 11: Durchgeführte Messungen Messkampagne 1

Datum	Vesuchsreihe	Oberfläche	Durchgeführte Messung	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]
24.08.2021	-	Leermessung	T30 Messung	18,1	52
26.08.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	20,9	62
30.08.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	20,7	72
01.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	17,7	66
03.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	18,7	70
06.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	20,8	63
08.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	21,5	59
10.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	21,4	70
13.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	21,4	64
15.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	22,5	67
17.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	21,6	63
22.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	18,5	50
24.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	18,5	50
27.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	18,5	50
29.09.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	21,3	57
01.10.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	20,8	50
04.10.2021	1.a	Stampflehm	T30 Messung	20,5	52
04.10.2021	1.b.1	Lehmputz	T30 Messung	20,7	64
05.10.2021	1.b.1	Lehmputz	T30 Messung	21,5	65
07.10.2021	1.b.1	Lehmputz	T30 Messung	20,9	69
11.10.2021	1.b.1	Lehmputz	T20 Messung	17,5	57
21.10.2021	1.b.1	Lehmputz	T30 Messung	18,9	58
21.10.2021	1.b.2	Putz/Nadelrolle	T30 Messung	19,1	59
22.10.2021	1.b.3	Putz/Rillen	T30 Messung	19,7	57
09.12.2021	2.a	Lehmbauplatte	T30 Messung	18,8	42
15.12.2021	2.b	Lehmbauplatte gespachtelt	T30 Messung	18,9	53
16.12.2021	-	Leermessung	T30 Messung	19,0	55

Tabelle 12: Durchgeführte Messungen Messkampagne 2

Datum	Versuchs- reiche	Oberfläche	Durchgeführte Messung	Temperatur [°C]	relative Luft- feuchtigkeit [%]
08.08.2022	-	-	Leermessung	20,5	63
12.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	21,3	69
15.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	21,7	69
18.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	21,8	54
22.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	21,9	54
26.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	22,3	53
29.08.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	22,1	44
01.09.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	22,3	44
09.09.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	22,2	46
15.09.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	21,9	40
20.09.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	20,5	50
21.09.2022	3.a	Stampflehm	T30 Messung	20,5	49
21.09.2022	3.b	Stampflehm	T30 Messung	20,5	49
23.09.2022	3.c	Lehmputz	T30 Messung	20,3	51
27.09.2022	3.c	Lehmputz	T30 Messung	20,2	54
15.10.2022	-	-	Leermessung	18,2	57

6.2.4 Auswertung

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte nach DIN EN ISO 354:2003-12 – Abschnitt 8: Darstellung der Ergebnisse – in Verbindung mit der ISO 9613-1:1993-06.

Die Messungen wurden mit sechs Mikrofon- und zwei Lautsprecherpositionen durchgeführt. Für jede der zwölf möglichen Kombinationen dieser Positionen wurden mindestens drei Nachhallzeitmessungen durchgeführt. Die Nachhallzeiten wurden einzeln bestimmt und daraus die mittlere Nachhallzeit für jede Kombination ermittelt. Anschließend wurde das arithmetische Mittel aus den gemittelten Nachhallzeiten der 12 Kombinationen errechnet.

Die Nachhallzeiten T_{30} wurden nach dem Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen von 50 Hz bis 10.000 Hz in Terzbändern gemessen.

Die gemessenen Nachhallzeiten der Terzband-Mittenfrequenzen von 50 – 80 Hz und 6.300 bis 10.000 Hz wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Bei 6.300 Hz, 8.000 Hz und 10.000 Hz wurde regelmäßig die Absenkung des Schalldruckpegels um 30 dB nicht erreicht, daher sind die Messergebnisse nicht repräsentativ.

Bei Messungen, bei denen während der Leermessung und der Messung mit Prüfobjekt die gleichen Raumklimabedingungen herrschen, kann eine Auswertung mit der Sabine'schen Nachhallzeitformel erfolgen. Da bei der Leermessung und bei den Messungen mit Prüfobjekt abweichende Klimabedingungen herrschen (vgl. Tabelle 11 und Tabelle 12) musste eine Bereinigung der Messwerte nach DIN EN ISO 354:2003-12 in Verbindung mit der ISO 9613-1:1993-06 erfolgen. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Prüfobjektes A_T , in Quadratmetern muss demnach durch die nachfolgende Gleichung bestimmt werden.

Formel 1:

$$A_T = A_2 - A_1 = V * \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4 * V * (m_2 - m_1)$$

Der Schallabsorptionsgrad α_s des Prüfobjektes ist entsprechend der Formel zu berechnen:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

Die Bewertung der Schallabsorption der im Endzustand befindenden Oberflächen erfolgte anschließend nach DIN EN ISO 11654:1997-07. Dort wurde der arithmetische Mittelwert des Schallabsorptionsgrades der drei Terzbänder innerhalb einer Oktave berechnet, sodass die frequenzabhängigen Kurven des Schallabsorptionsgrades besser mit Planungswerten von praxisüblichen Materialien verglichen werden können. Durch Verschieben der Bezugskurve wurde der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w bei 500 Hz bestimmt.

6.2.5 Messergebnisse

6.2.5.1 Stampflehm

Erstellung der Prüfoberfläche

Die benötigte Prüffläche zur Ermittlung des Schallabsorptionsgrades von Stampflehm konnte nicht als vor Ort gestampfte Wand im Hallraum erstellt werden, da der im Stampfvorgang aufzubringende Druck Schäden am Boden verursacht hätte.

Aufgrund der gegebenen Umstände wurde ein Verfahren mit größtmöglicher Vorfertigung entwickelt. Die Gesamtfläche (10,5 m²) bestand aus 42 auf den Boden des Hallraumes gelegten Stampflehmprüfkörpern mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm x 10 cm (H x B x T). An ihrer Kontaktfläche wurden die Stampflehmprüfkörper mit Lehmörtel verklebt.

Für die Erstellung der Stampflehmprüfkörper wurde eine Schalung aus Konstruktionsvollholz und Mehrschichtplatten mit eingesetzter Tragplatte konstruiert. Eine Kombination aus einer Grobspan- und Siebdruckplatte stellte eine gute Ablösbarkeit beim Ausschalen sicher. Die Schalung wurde mit einer ca. 10 - 15 cm hohen Schicht der Stampflehmmischung befüllt und mit einem pneumatischen Stampfgerät verdichtet. Der Vorgang wurde wiederholt bis die 50 cm hohe Schalung mit verdichtetem Stampflehm gefüllt war. Nach dem Stampfvorgang wurde der Stampflehmprüfkörper ausgeschalt und eingelagert.

Eine besondere Herausforderung bei diesem Aufbau war eine fachgerechte Randabdichtung der Prüffläche. Gewählt wurden dünne Siebdruckplatten, die am Prüfflächenrand mit Lehmörtel angeklebt wurden. Im Verlauf der Messkampagnen haben sich diese an manchen Stellen gelöst, hier wurden zwischenzeitlich Nachbesserungen vorgenommen.

Abweichungen bei der Erstellung der Prüffläche

Der Unterschied im Aufbau der Messkampagne 1 und 2 lag darin, dass die Stampflehmkörper auf eine dünne Schicht Sand gebettet wurden. Diese Ausgleichsschicht sollte eventuell entstehende Hohlräume verhindern.



Abbildung 36: Prüffläche im Hallraum des ETI Messkampagne 1



Abbildung 37: Oberflächenbeschaffenheit Stampflehm Messkampagne 1



Abbildung 38: Prüffläche im Hallraum des ETI Messkampagne 2

Messergebnisse

Wie im Abschnitt 0 bereits erwähnt, wurde in verschiedenen Trockenstadien der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad bestimmt.



Abbildung 39: Stampflehmoberfläche in verschiedenen Trockenstadien der Messkampagne 1

Die ermittelten Schallabsorptionsgrade beider Messkampagnen sind in Abbildung 40 und Abbildung 42 dargestellt. Abgebildet sind die frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade α_s in diversen Trockenstadien in Terzbändern von 100 Hz bis 5.000 Hz.

Zu erkennen ist das Ansteigen des Schallabsorptionsvermögens mit fortschreitender Trocknung. Die trockene Stampflehmoberfläche weist demnach in allen Frequenzbereichen einen höheren Schallabsorptionsgrad als die feuchte Oberfläche auf. Die Verläufe der ermittelten Schallabsorptionsgrade an den unterschiedlichen Messtagen verlaufen annähernd parallel zu einander. Mit Fortschreiten des Trockenprozesses ist zu erkennen, dass sich die Zunahme des Schallabsorptionsvermögens zwischen den einzelnen Messtagen verringert. Der Anstieg des Schallabsorptionsgrades vom feuchten Zustand (Tag 0: α_{feucht}) zum trockenen Zustand (Tag 39: α_{trocken}) beträgt in der ersten Messkampagne, d.h. bei der ersten Lehmischung, im Mittel ca. 0,1, bei der zweiten, die insgesamt eine deutlich trockenere Ausgangskonsistenz besaß, im Mittel ca. 0,05.

Die Hauptaufgabe bei dieser Versuchsreihe bestand darin, den Schallabsorptionsgrad der trockenen Stampflehmoberfläche zu ermitteln. Die Ergebnisse für die trockenen Stampflehmoberflächen sind in Abbildung 41 und Abbildung 43 abgebildet und in

Tabelle 13 und Tabelle 14 in Terz- sowie Oktavband-Mittenfrequenzen dargestellt. Bei der Betrachtung des Schallabsorptionsgrades des trockenen Stampflehms aus der ersten Mischung in Bild 4 (Tag 39) ist über die Frequenz ein annähernd stetig ansteigender Verlauf zu erkennen. Der Schallabsorptionsgrad steigt von 0,15 bei 100 Hz auf 0,58 bei 5.000 Hz an. Im Frequenzbereich von 125 Hz bis 5000 Hz schwankt der Schallabsorptionsgrad der trockenen Stampflehmfläche der zweiten Mischung in Bild 5 (Tag 39) zwischen 0,30 und 0,53.

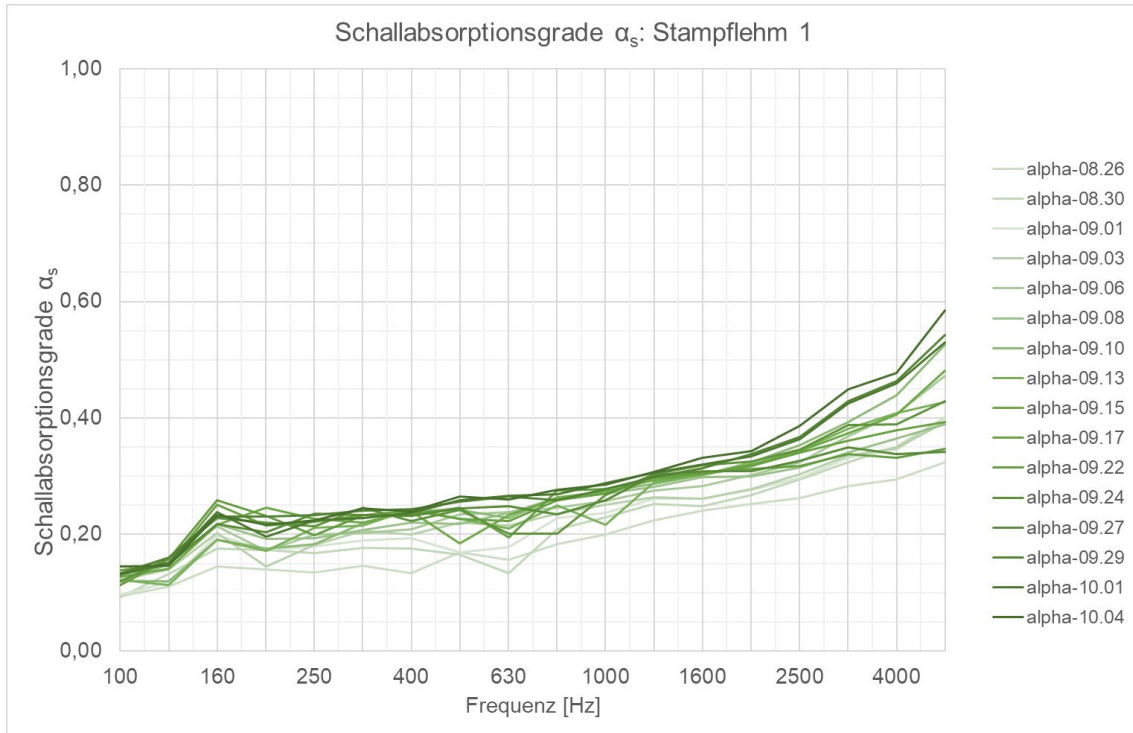


Abbildung 40: Messergebnisse der Stampflehmoberfläche 1

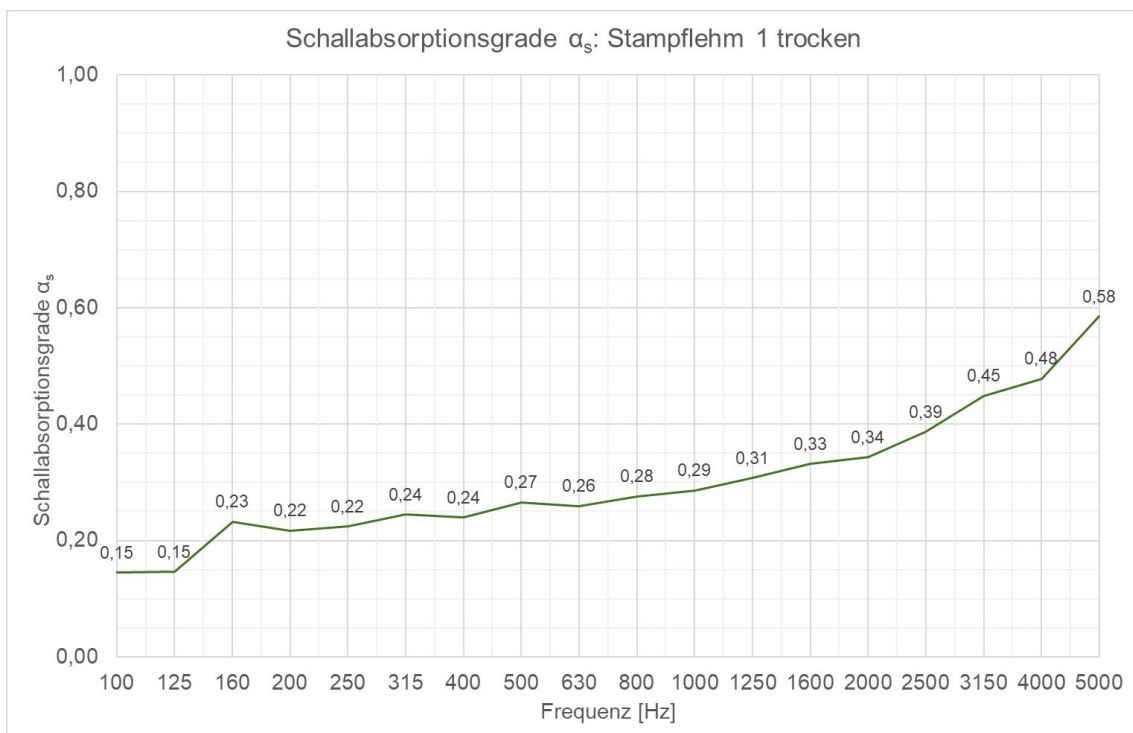


Abbildung 41: Schallabsorptionsgrad α_s Stampflehm 1 trocken

Tabelle 13: Stampflehm 1 trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654

f [Hz]	α_s	α_p	α_w
100	0,15		0,35
125	0,15	0,17	
160	0,23		
200	0,22		
250	0,22	0,23	
315	0,24		
400	0,24		
500	0,27	0,25	
630	0,26		
800	0,28		
1000	0,29	0,29	
1250	0,31		
1600	0,33		
2000	0,34	0,35	
2500	0,39		
3150	0,45		
4000	0,48	0,50	
5000	0,58		

Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 liegt bei 0,35 und kann damit der Schallabsorberklasse D zugeordnet werden. (vgl. Tabelle 13)

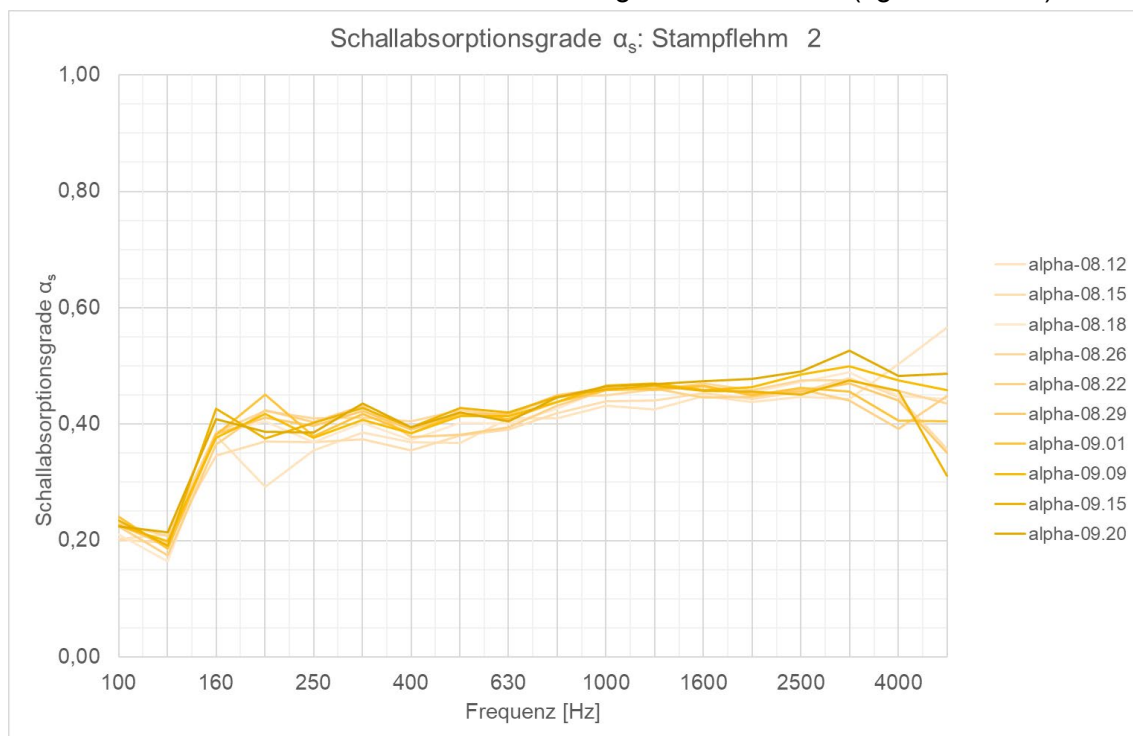


Abbildung 42: Messergebnisse der Stampflehmoberfläche 2

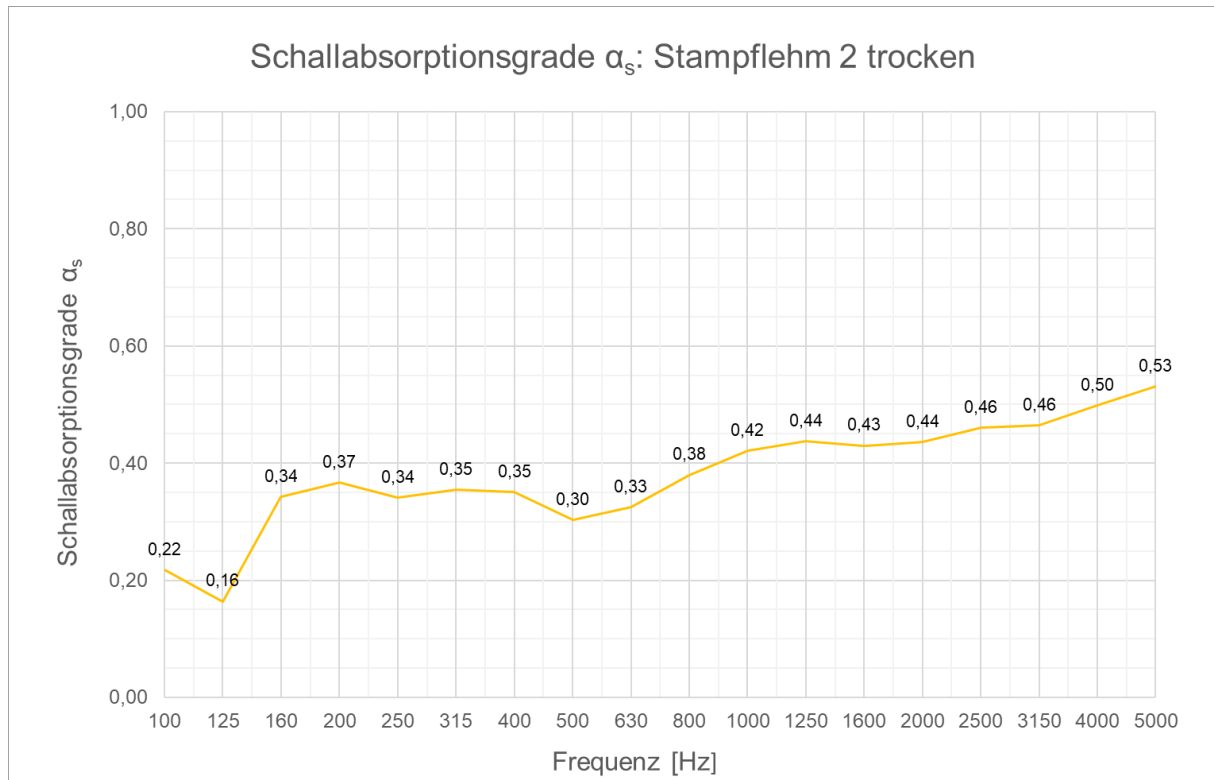


Abbildung 43: Schallabsorptionsgrad α_s Stampflehm 2 trocken

Tabelle 14: Stampflehm 2 α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p nach DIN EN ISO 11654

f [Hz]	α_s	α_p	α_w
100	0,22		0,40
125	0,16	0,24	
160	0,34		
200	0,37		
250	0,34	0,35	
315	0,35		
400	0,35		
500	0,30	0,33	
630	0,33		
800	0,38		
1000	0,42	0,41	
1250	0,44		
1600	0,43		
2000	0,44	0,44	
2500	0,46		
3150	0,46		
4000	0,50	0,50	
5000	0,53		

Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 liegt bei 0,40 und kann damit der Schallabsorberklasse D zugeordnet werden. (vgl. Tabelle 14)

Vergleich der Ergebnisse mit in der Baupraxis üblichen Materialien

Durch die Anwendung der DIN EN ISO 11654:1997-07 können die praktischen Schallabsorptionsgrade α_p mit Planungswerten aus der Literatur für in der Baupraxis zweckentsprechend, konventionell eingesetzte Materialien verglichen werden. Die Abbildung 44 zeigt die ermittelten Schallabsorptionsgrade von Stampflehm im Vergleich mit Planungswerten von Beton/Stuckgips/Naturstein aus der Literatur (Fasold & Veres, 2003).

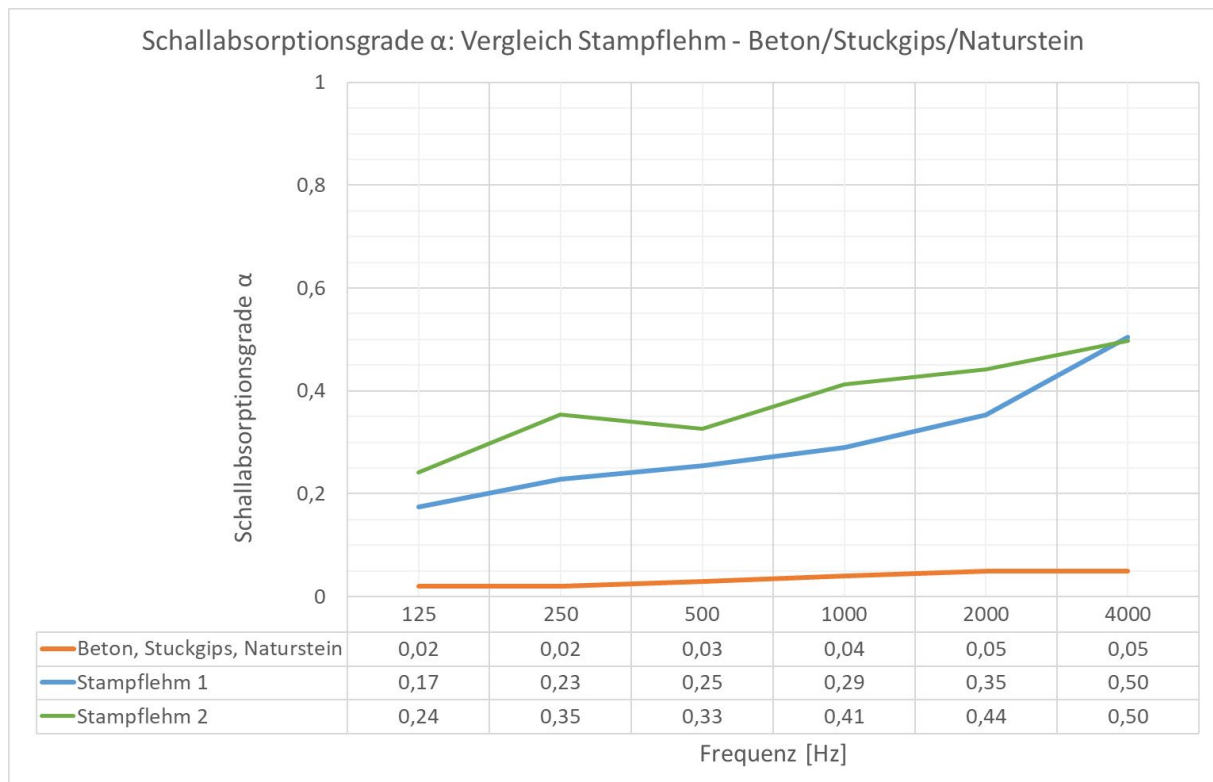


Abbildung 44: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade von Stampflehm mit Planungswerten von Beton/Stuckgips/Naturstein

Es ist ersichtlich, dass Stampflehm im Vergleich zu Planungswerten für Beton/Stuckgips/Naturstein einen deutlich höheren Schallabsorptionsgrad aufweist. Die Differenz zwischen den Werten liegt im Mittel bei 0,26, wobei sie im tiefen Frequenzbereich geringer als im hohen Frequenzbereich ist.

6.2.5.2 Lehmoberputz

Erstellung der Prüfoberfläche

Zur Ermittlung des Schallabsorptionsgrades von Lehmputz wurde die bereits vorhandene Stampflehwandoberfläche mit Lehmoberputz verputzt. Der Lehmoberputz wurde fachgerecht angemischt und auf die Stampflehmoberfläche aufgebracht. Zum Abschluss wurde die Oberfläche im feuchten Zustand mit einer Schwammkelle geglättet. Die Dicke des Putzes betrug im Durchschnitt ca. 7 mm.



Abbildung 45: Auftragen des Lehmoberputzes



Abbildung 46: Prüfoberfläche Lehmoberputz 1



Abbildung 47: Prüfoberfläche Lehmoberputz 2

Messergebnisse

Die Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Schallabsorptionsgrade vom Lehmoberputz im Verlauf der Trocknung, hier ist ebenso ein Anstieg des Schallabsorptionsvermögens von der ersten Messung der einbaufeuchten Oberfläche zur letzten Messung im getrockneten Zustand zu erkennen. Der Anstieg von feucht zu trocken liegt hier im Durchschnitt bei 0,04; also bei etwa 4 %-Punkten. Die Differenz von feucht zu trocken ist im tiefen geringer als im hohen Frequenzbereich. Die einzelnen Messungen der Lehmputzoberfläche zeigen ab 160 Hz einen ungefähr parallelen Verlauf.

Der frequenzabhängige Verlauf des Schallabsorptionsgrades des trockenen Lehmoberputzes zeigt die Abbildung 49, der Verlauf ist relativ ausgeglichen, er schwankt im Bereich von 50 Hz zu 2.000 Hz zwischen 0,03 und 0,09 wobei er im Mittel bei 0,065 liegt. Ab 2.000 Hz ist ein leichter Anstieg zu erkennen, der Schallabsorptionsgrad steigt auf 0,18 an.

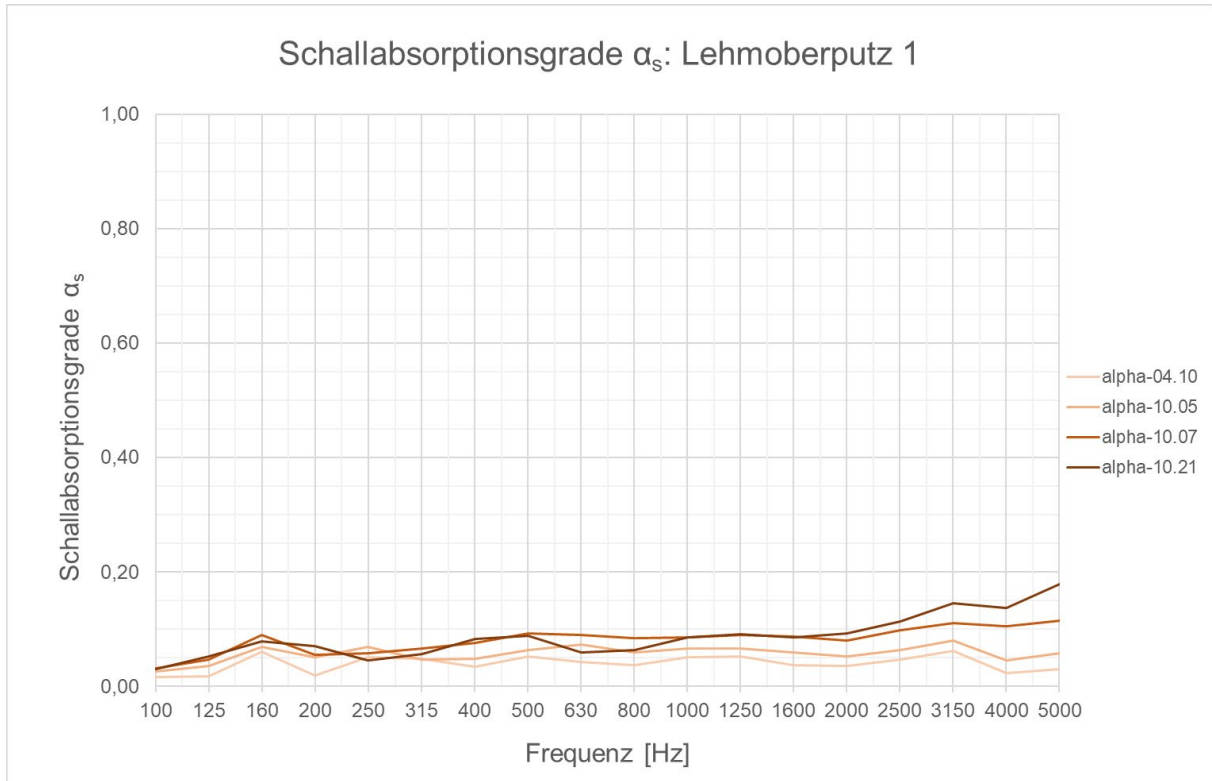


Abbildung 48: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmoberputzoberfläche 1

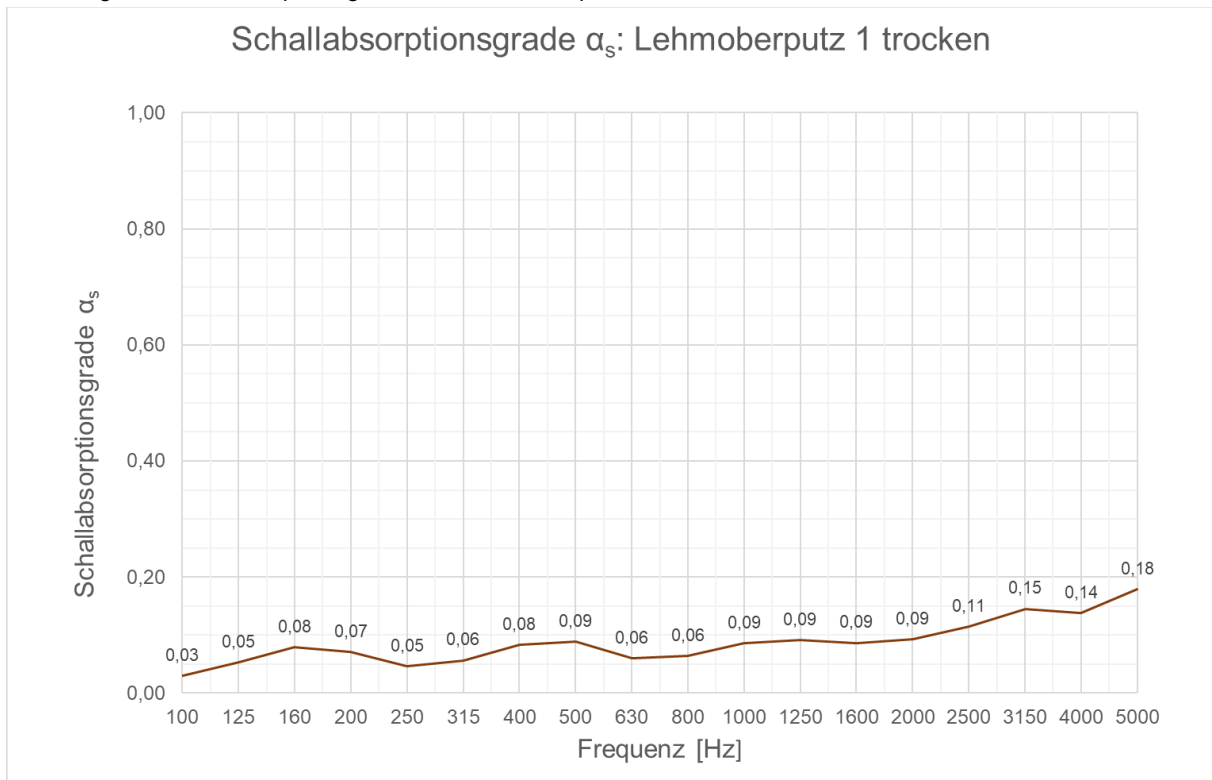


Abbildung 49: Schallabsorptionsgrad α_s Lehmoberputz 1 trocken

Tabelle 15: Lehmoberputz 1 trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654

f [Hz]	α_s	α_p	α_w
100	0,03		0,15
125	0,05	0,05	
160	0,08		
200	0,07		
250	0,05	0,06	
315	0,06		
400	0,08		
500	0,09	0,08	
630	0,06		
800	0,06		
1000	0,09	0,08	
1250	0,09		
1600	0,09		
2000	0,09	0,10	
2500	0,11		
3150	0,15		
4000	0,14	0,15	
5000	0,18		

Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 liegt bei 0,15 und kann damit der Schallabsorberklasse E zugeordnet werden.

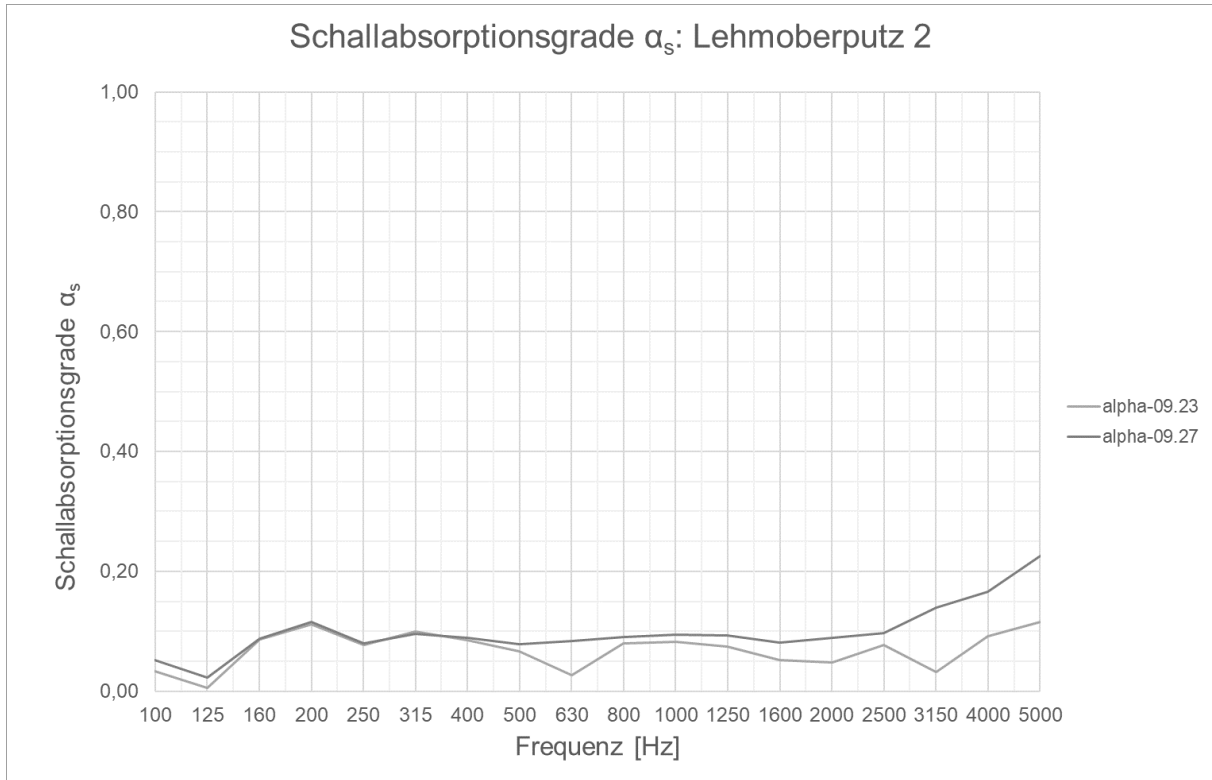


Abbildung 50: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmoberputzoberfläche 2

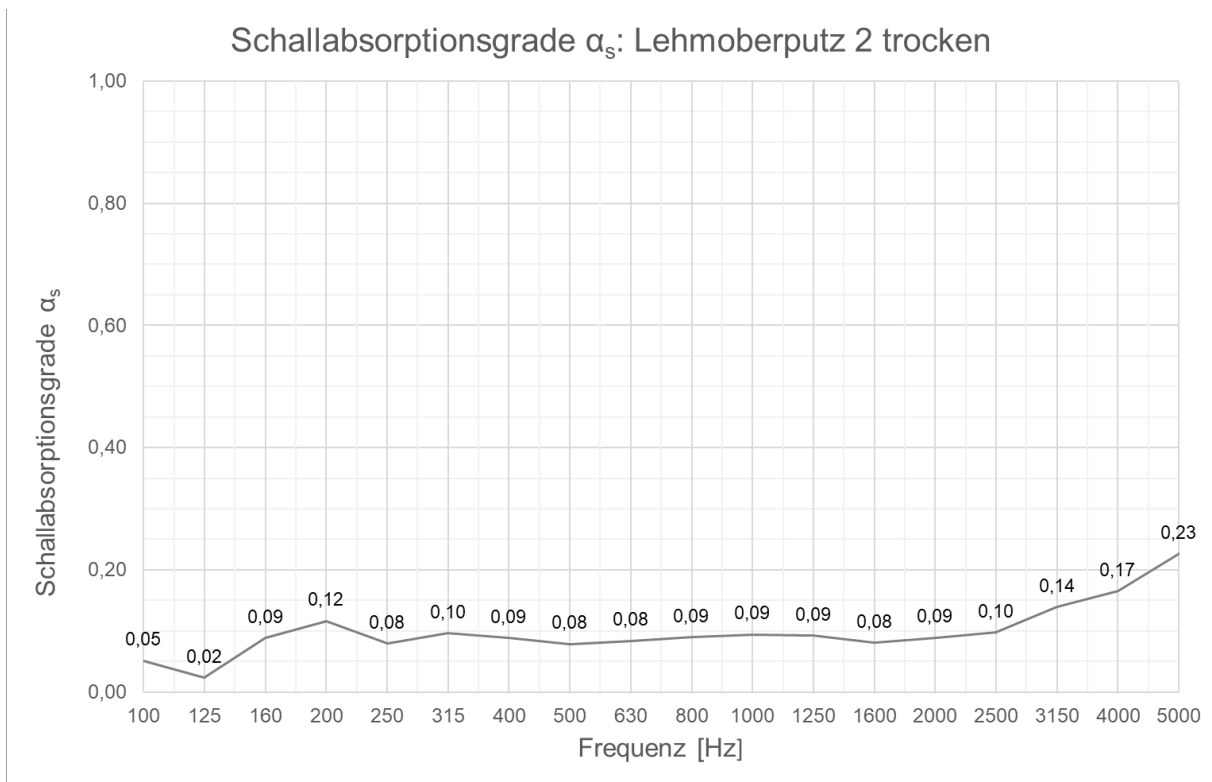


Abbildung 51: Schallabsorptionsgrad α_s Lehmoberputz 2 trocken

Tabelle 16: Lehmoberputz trocken α_s nach DIN EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654

f [Hz]	α_s	α_p	α_w
100	0,05		0,15
125	0,02	0,05	
160	0,09		
200	0,12		
250	0,08	0,10	
315	0,10		
400	0,09		
500	0,08	0,08	
630	0,08		
800	0,09		
1000	0,09	0,09	
1250	0,09		
1600	0,08		
2000	0,09	0,09	
2500	0,10		
3150	0,14		
4000	0,17	0,18	
5000	0,23		

Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 liegt bei 0,15 und kann damit der Schallabsorberklasse E zugeordnet werden.

Vergleich der Ergebnisse mit in der Baupraxis üblichen Materialien

Die Abbildung 52 zeigt die für die Lehmoberputze ermittelten Schallabsorptionsgrade umgewandelt in praktische Schallabsorptionsgrade α_p nach DIN EN ISO 11654:1997-07 im Vergleich mit Planungswerten von Kalkzementputz aus der Literatur (Fasold & Veres, 2003).

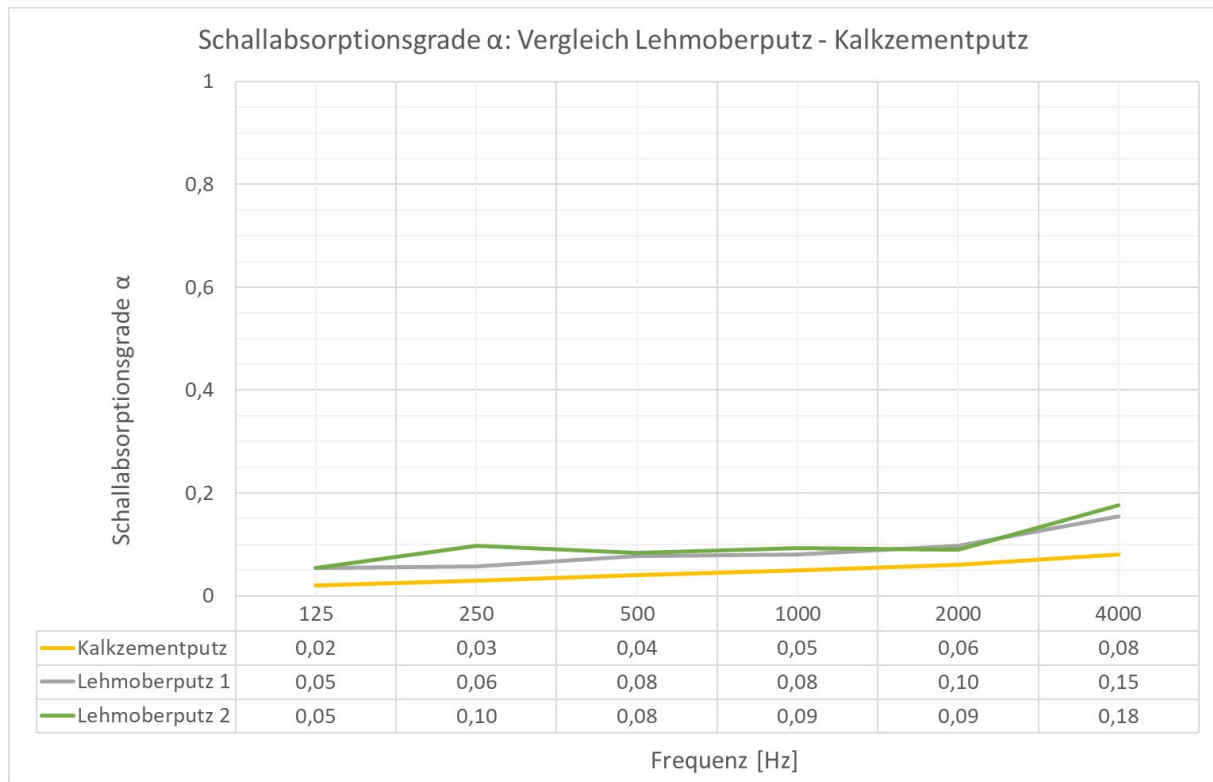


Abbildung 52: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade α_p von den Lehmoberputzen mit Planungswerten von Kalkzementputz

Bei der Gegenüberstellung ist festzustellen, dass die Verläufe annähernd parallel sind. Die Schallabsorptionsgrade des Kalkzementputzes liegen ca. 0,03 unter denen des Lehmoberputzes. Demnach besitzt der untersuchte Lehmoberputz ein höheres Schallabsorptionsvermögen.

6.2.5.3 Vergleich der Ergebnisse Stampflehm und Lehmoberputz

Der Vergleich der messtechnisch ermittelten Schallabsorptionsgrade des Stampflehms und des Lehmoberputzes (Abbildung 53; Abbildung 54) verdeutlicht, dass das Verputzen der Oberfläche ein starkes Herabsetzen des Schallabsorptionsgrades bewirkt. Der Schallabsorptionsgrad sinkt auf ein Drittel ab.

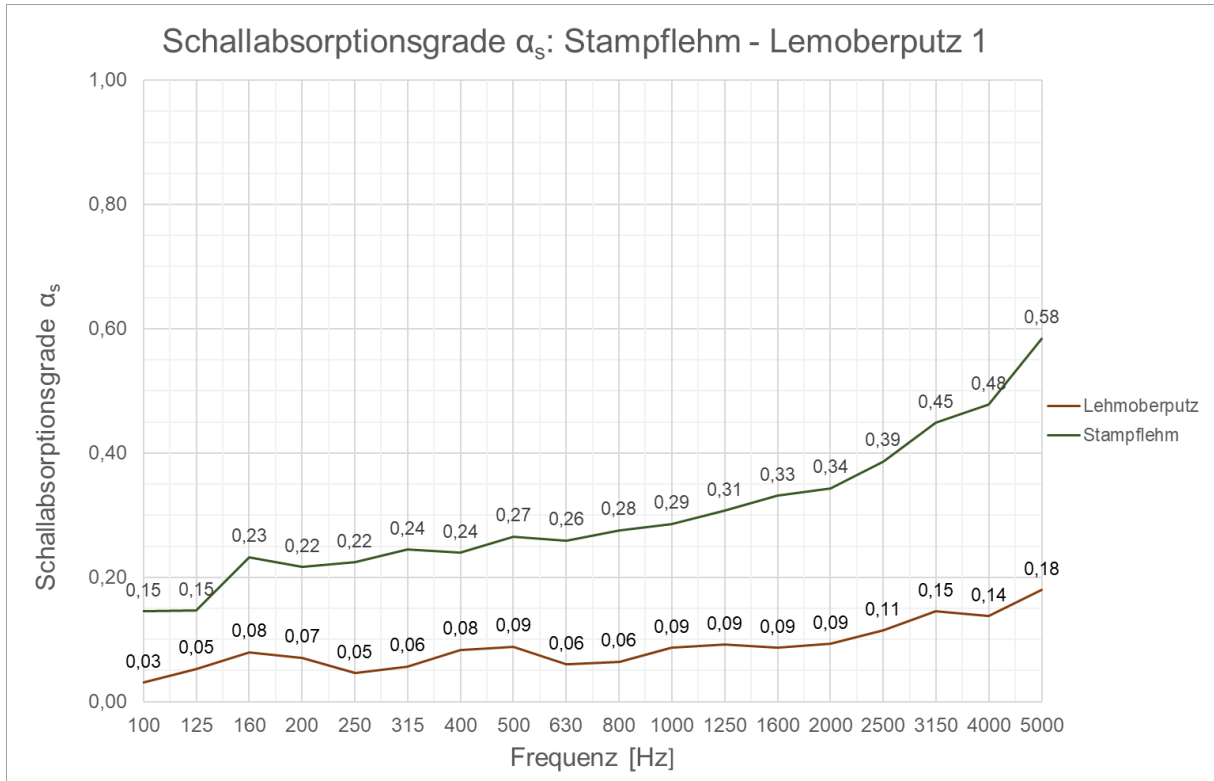


Abbildung 53: Vergleich Schallabsorptionsgrade α_s : Stampflehm – Lemoberputz Messkampagne 1

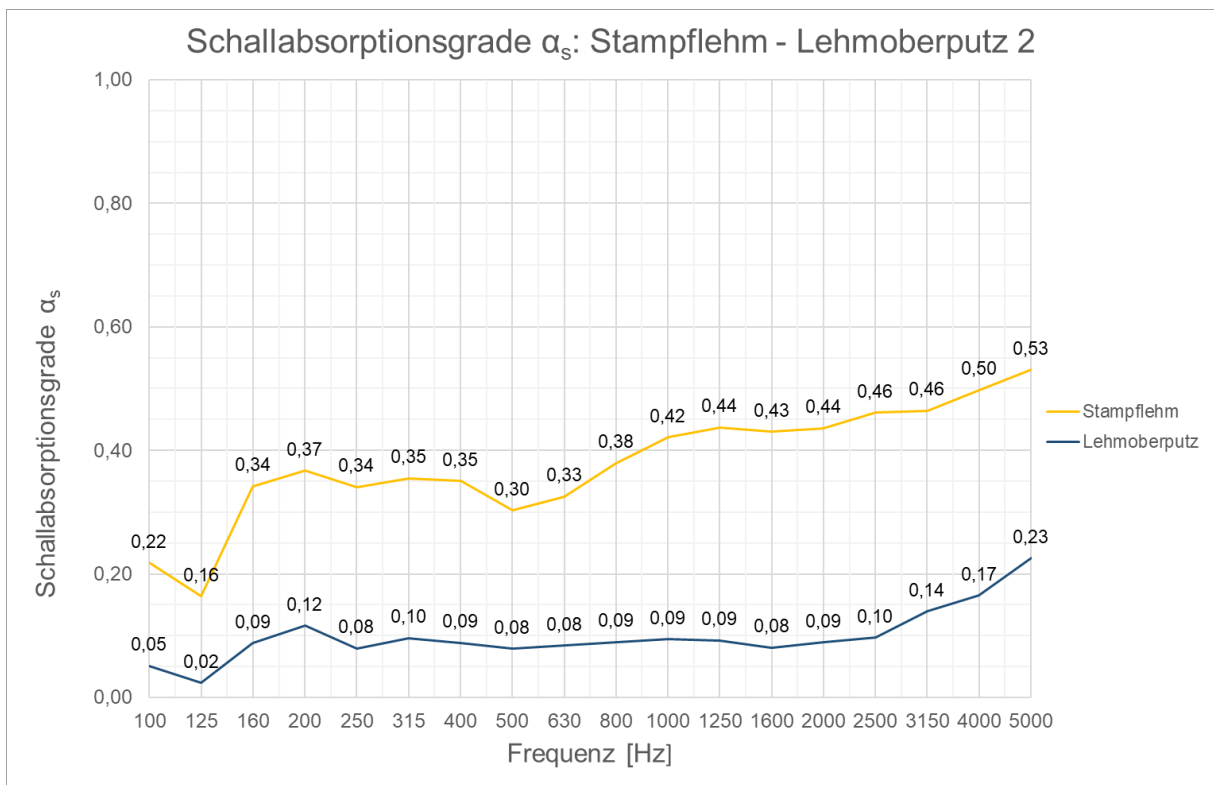


Abbildung 54: Vergleich Schallabsorptionsgrade α_s : Stampflehm – Lemoberputz Messkampagne 2

6.2.5.4 Veränderung der Putzoberfläche

Für weitere Messungen wurde die getrocknete und verputzte Oberfläche aus der Messkampagne 1 mechanisch verändert. Im ersten Schritt wurde mit einer handelsüblichen Nadelrolle die Oberfläche des Lehmoberputzes aus der vorherigen Messung perforiert. Im zweiten Schritt wurden mit einem elektrischen Meißel Schlitzte in die zuvor mit der Nadelrolle perforierten Oberfläche eingelassen. Die Rillen verlaufen über die komplette Länge der Prüfoberfläche und wurden in einem Abstand von 25 cm in die Oberfläche geschlitzt. Bei beiden Oberflächenbeschaffenheiten wurden Nachhallmessungen durchgeführt.



Abbildung 55: Lehmverputzte Oberfläche, bearbeitet mit einer Nadelrolle



Abbildung 56: Lehmverputzte Oberfläche, bearbeitet mit einer Nadelrolle und Rillen



Abbildung 57: Oberflächenbeschaffenheit veränderter Lehmoberputz – Nadelrolle

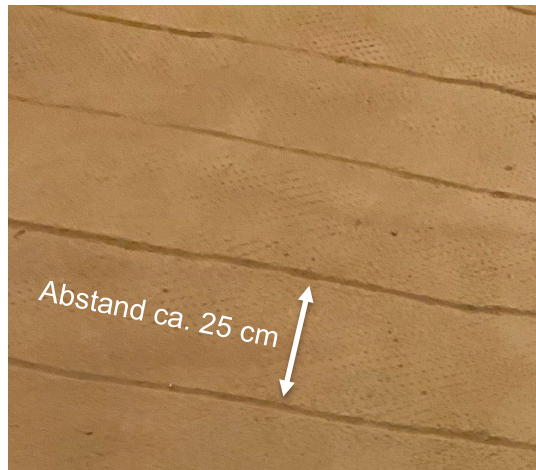


Abbildung 58: Oberflächenbeschaffenheit veränderter Lehmoberputz – Nadelrollen und Rillen – Darstellung Abstand zwischen den Rillen

Messergebnisse

Die Abbildung 59 zeigt die Verläufe der Schallabsorptionsgrade α_s der mechanisch veränderten Lehmoberputzoberflächen und des ursprünglichen Lehmoberputzes 1. Zu erkennen ist, dass sich zur ursprünglichen Lehmoberputzoberfläche keine signifikanten Veränderungen ergeben haben. Lediglich in dem Bereich von 160 Hz bis 1250 Hz, lassen sich minimale Unterschiede erkennen.

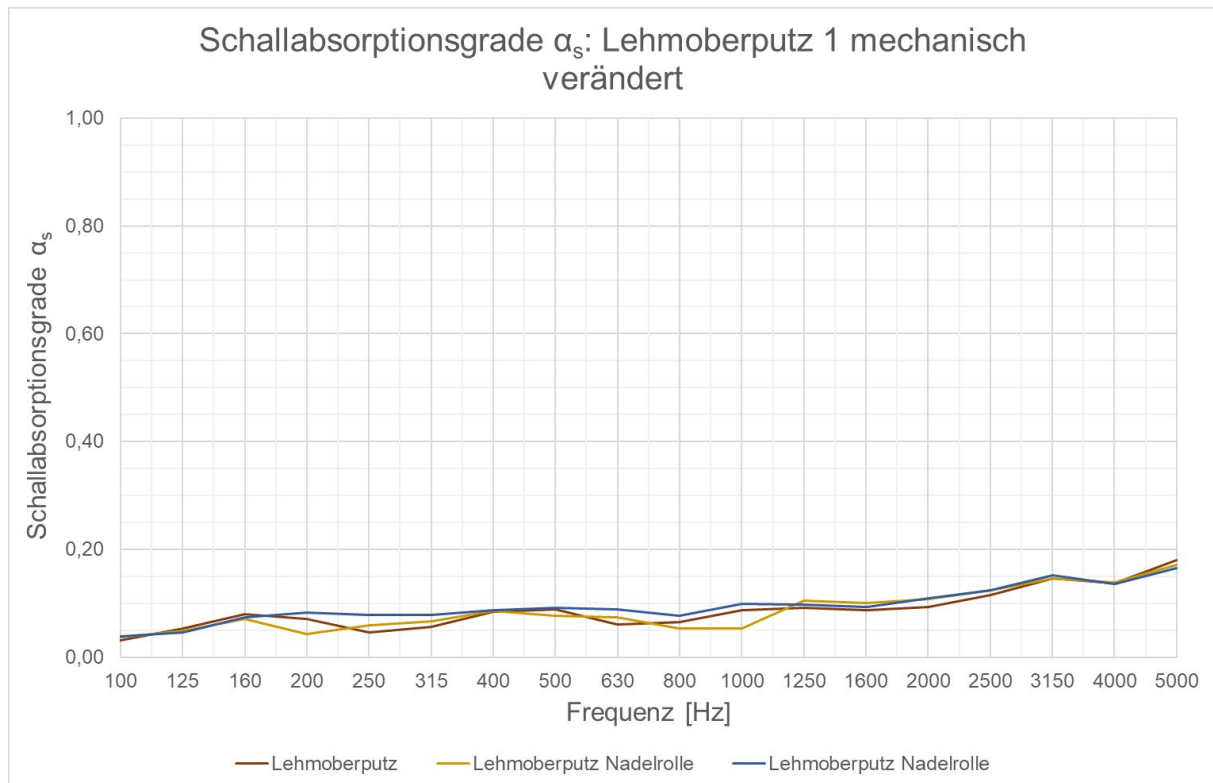


Abbildung 59: Messergebnisse veränderte Lehmputzoberfläche

6.2.5.5 Lehmbauplatten

Für die Messung zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades von Lehmbauplatten wurden Lehmbauplatten mit den Abmessungen 625 mm x 1250 mm mit einer Stärke von 16 mm verwendet. Aufgrund der geringen Tragfähigkeit der Platten, die diese trotz der Bewehrung mit Jutegewebe aufwiesen, wurden die Platten ohne Unterkonstruktion direkt auf den Boden aufgelegt. Im Verband verlegt, bildeten die Platten eine Prüffläche von 10,85 m². Anschließend wurde die Oberfläche, wie empfohlen, mit Lehmfeinputz verspachtelt und vollflächig mit einer dünnen Schicht (1-3 mm) überzogen. Gemessen wurde die Oberfläche der Lehmbauplatte im rohen Zustand, sowie im mit Lehmfeinputz beschichteten Endzustand.

Bei den Messungen musste aufgrund der geringen Stärke und dem spontan geänderten Aufbau auf eine Randabdichtung verzichtet werden.

Das Auftreten von Effekten, die durch die nicht vorhandene Randabdichtung und durch das nicht satte Aufliegen der Platten auf dem Boden entstanden sein könnten, sind nicht auszuschließen.



Abbildung 60: Lehmbauplatten Oberfläche unbehandelt



Abbildung 61: Lehmbauplatte mit Lehmfeinputz



Abbildung 62: Oberflächenbeschaffenheit Lehm-
platte



Abbildung 63: Oberflächenbeschaffenheit Lehm-
platte mit Lehmfeinputz

Messergebnisse

Die ermittelten Schallabsorptionsgrade α_s für die Prüfoberfläche aus der rohen Lehm- bauplatte und der mit Lehmfeinputz beschichteten Lehm- bauplatte sind in Abbildung 64.

abgebildet. Die beiden Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei die unbehandelte Lehm- bauplatte ein höheres Schallabsorptionsvermögen aufweist als die beschichtete Lehm- bauplatte. Beide Verläufe sind von 100 Hz zu 5.000 Hz ansteigend. Ab 1.600 Hz steigen, bei beiden Messungen, die Werte verstärkt an. Bei der verspachtelten Lehm- bauplatte steigt der Schallabsorptionsgrad von 0,10 bei 1.600 Hz auf 0,34 bei 5.000 Hz an.

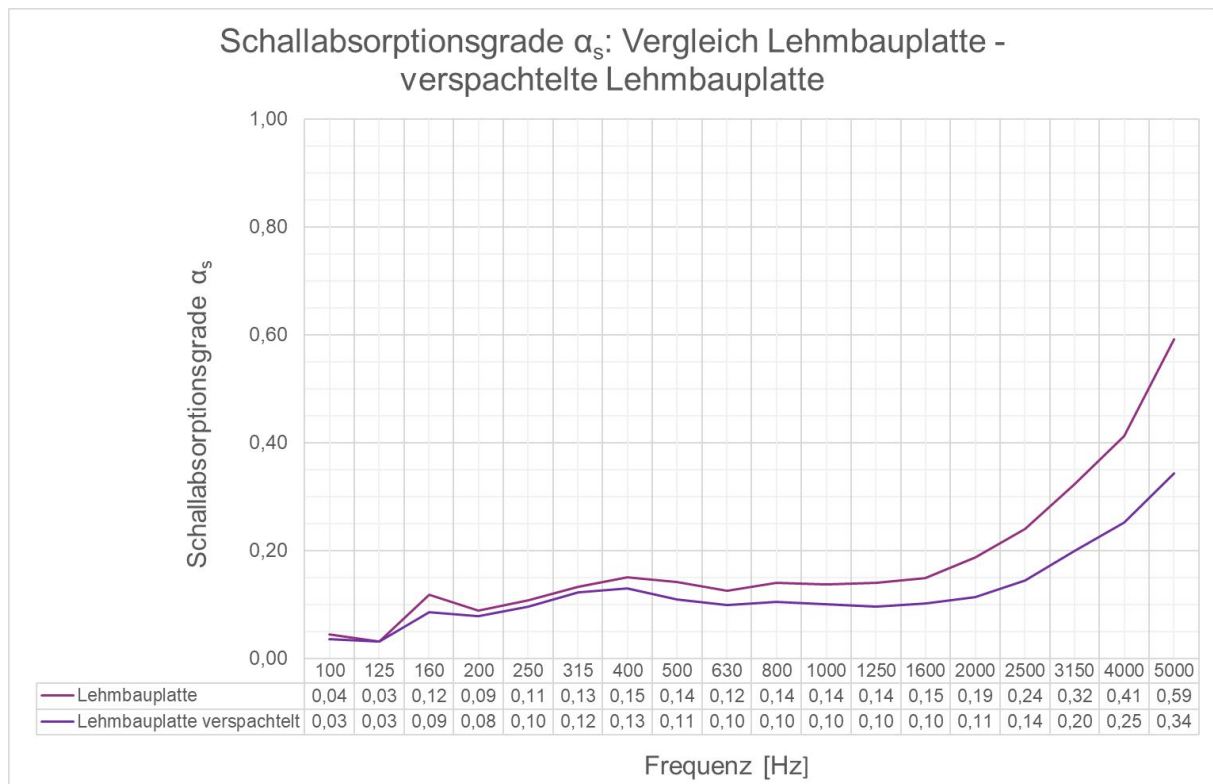


Abbildung 64: Schallabsorptionsgrad α_s der Lehmplattenoberflächen aus der Messkampagne 1

Tabelle 17: Lehm- bauplatte beschichtet mit Lehmfeinputz: α_s nach EN ISO 354 und α_p DIN EN ISO 11654

f [Hz]	α_s	α_p	α_w
100	0,03		0,20
125	0,03	0,05	
160	0,09		
200	0,08		
250	0,10	0,10	
315	0,12		
400	0,13		
500	0,11	0,11	
630	0,10		
800	0,10		
1000	0,10	0,10	
1250	0,10		
1600	0,10		
2000	0,11	0,12	
2500	0,14		
3150	0,20		
4000	0,25	0,26	
5000	0,34		

Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 liegt bei 0,2 und kann damit der Schallabsorberklasse E zugeordnet werden.

Vergleich der Ergebnisse Lehm- bauplatte beschichtet und Lehmoberputz

Die Abbildung 65 zeigt die für die für die beschichtet Lehm- bauplatte ermittelten Schallabsorptionsgrade umgewandelt in praktische Schallabsorptionsgrade α_p im Vergleich zu den Schallabsorptionsgradem α_p vom trocknen Lehmoberputz aus Messkampagne 1 und 2.

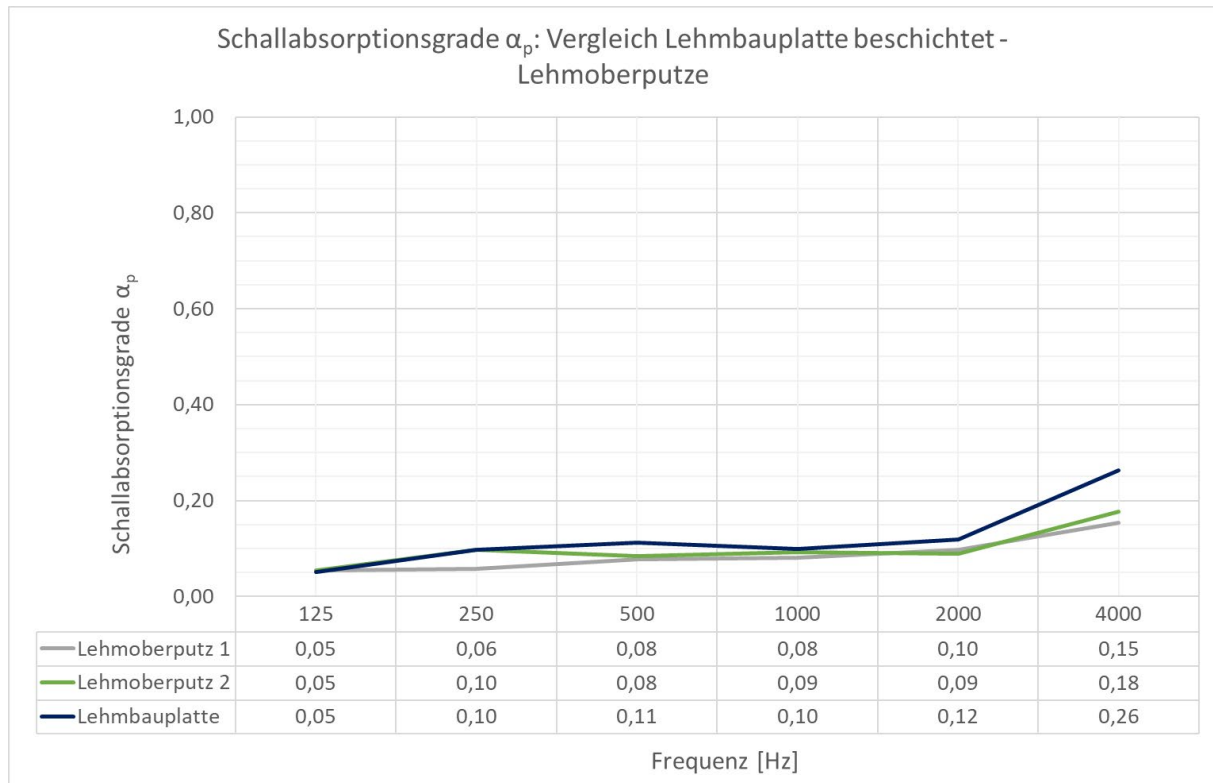


Abbildung 65: Vergleich der praktischen Schallabsorptionsgrade α_p von der beschichteten Lehm-
bauplatte und dem Lehmoberputz

Bei der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass das Schallabsorptionsvermögen der be-
schichteten Lehm-
bauplatte leicht höher ist, als das Schallabsorptionsvermögen der Lehm-
oberputze. In den Oktavband-Mittelfrequenzen von 125 Hz – 2.000 Hz ist der Unterschied der
Schallabsorptionsgrade minimal, der Lehmoberputz liegt durchschnittlich um 0,02 unter der
beschichteten Lehm-
bauplatte. Das Delta bei 4.000 Hz ist größer und liegt bei ca. 0,09.

6.2.6 Qualität der Ergebnisse

Aufgrund der natürlichen Inhomogenität von Lehm und Lehmoberflächen sowie einer Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit vom Fertigungsprozess können bei weiteren Messungen Schallabsorptionsgrade ermittelt werden, welche von dieser Studie abweichen.

Für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind exemplarisch die Abweichungen der 12 Wiederholungsmessungen im Hallraum nach Norm in Abbildung 66 dargestellt. Die Abweichungen der Nachhallzeiten variieren im Bereich von $\pm 0,03$ s (5 kHz) bis zu $\pm 0,99$ s (100 Hz). Tieffrequent sind die Abweichungen aufgrund der Raummoden höher als im hochfrequenten Bereich. Vergleichbare Abweichungen ergaben sich ebenfalls für die anderen Messungen der verschiedenen Lehmoberflächen.

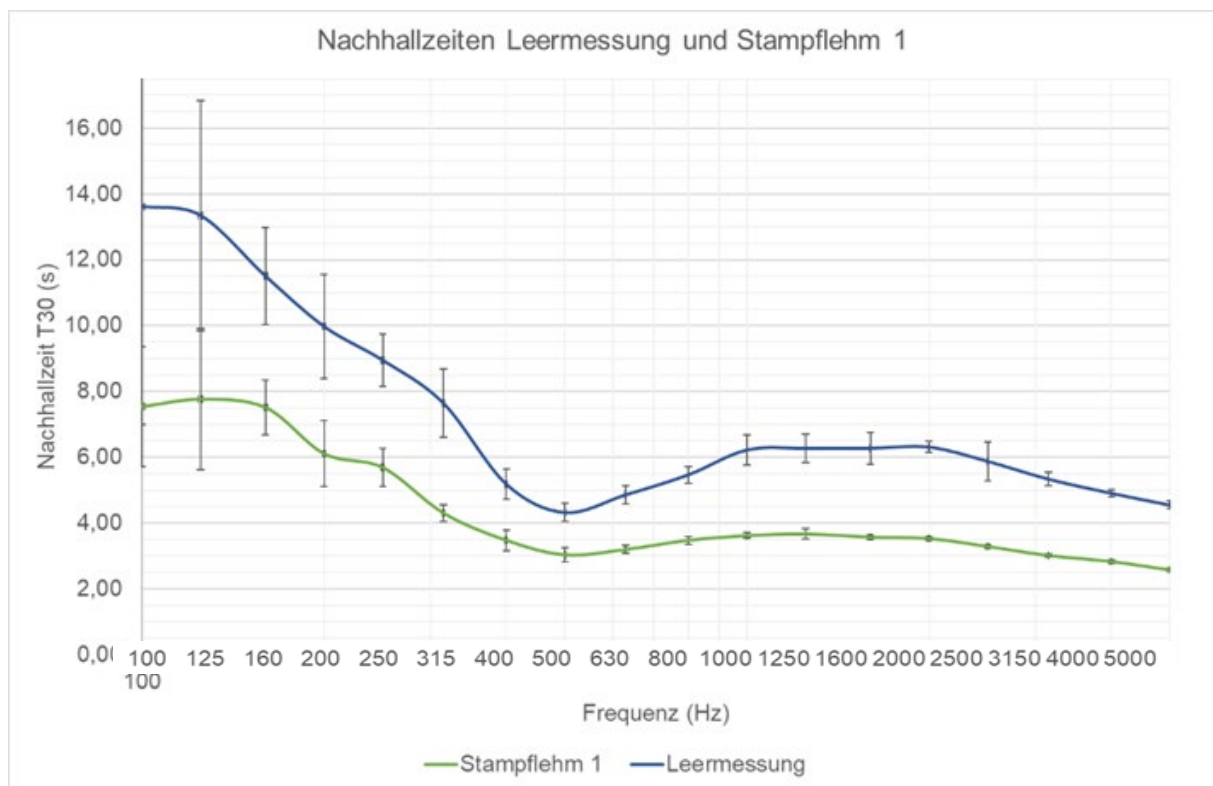


Abbildung 66: Nachhallzeiten der Leermessung und des trockenen Stampflehms 1

6.2.7 Fazit

Durch die Messungen wurden neue Erkenntnisse im Bereich der raumakustischen Eigenschaften von Lehmoberflächen erlangt. Bei der Betrachtung der Messergebnisse von Stampflehm und Lehmoberputz wurde festgestellt, dass das Schallabsorptionsvermögen mit Fortschreiten der Trocknung angestiegen ist. Eine weitere Feststellung ist, dass das Beschichten der Lehmoberflächen mit Lehmputzen (Lehmoberputz und Lehmfeinputz) ein Herabsetzen des Schallabsorptionsvermögens bewirkt. Bei der Betrachtung der Schallabsorptionsgrade der Putzoberflächen mit Strukturveränderungen wurde deutlich, dass die gewählten mechanischen Bearbeitungsschritte keine Veränderungen des Schallabsorptionsvermögens bewirkt haben.

Die Zunahme des Schallabsorptionsgrades im Trocknungsverlauf lässt auf eine äußere und innere Strukturveränderung schließen. Wahrscheinlich ist, dass durch das Trocknen die Porosität erhöht wird; die zu Beginn mit Wasser gefüllten Poren sind nach Trocknung am Schallabsorptionsvorgang beteiligt. Weiter kann auch die Veränderung der Oberfläche z.B. durch trockenbedingte entstandene Risse eine Rolle spielen. Für genaue Interpretation sind hier weitere Untersuchungen notwendig. Hilfreich könnte unter anderem das Messen der Porosität und des Strömungswiderstandes während der unterschiedlichen Trockenstadien sein.

Eine Erklärung für das Herabsetzen des Schallabsorptionsvermögens von Lehmoberflächen durch das Auftragen von Putzen beruht wie in (Fuchs, 2010) beschrieben darauf, dass die zuvor vorhandene Porosität gegeben durch die inhomogene Oberflächenstruktur, durch den Putz verschlossen wird.

Dass sich durch die mechanischen Oberflächenbehandlungen keine großen Veränderungen im Schallabsorptionsvermögen eingestellt haben, kann daraus resultieren, dass die Bearbeitungen der Oberflächen nicht gravierend genug waren. Die Lehmoberputzoberfläche wies zuvor schon eine gewisse Rauigkeit auf, die durch die Behandlung mit der Nadelrolle sowie durch das Einbringen der Rillen augenscheinlich nicht nennenswert erhöht wurde.

Insgesamt kann dennoch festgehalten werden, dass die Untersuchungen gezeigt haben, dass die ermittelten Schallabsorptionsgrade im Vergleich zu Planungswerten von in der Baupraxis zweckentsprechend eingesetzten, konventionellen Materialien wie Beton oder Kalkzementputz ein signifikant höheres Schallabsorptionsvermögen aufweisen.

6.3 Schallimpedanzrohr Messungen

6.3.1 Einleitung

In einem zweiten Teil der Studie wurden Messungen mit dem Schallimpedanzrohr durchgeführt. Diese Messkampagne wurde ergänzt durch Wiegen der Prüfkörper und die Untersuchung der Oberflächenveränderung mittels Auflichtmikroskop der Proben in verschiedenen Trockenstadien.

6.3.2 Probenherstellung

Für die Messungen wurde ebenfalls Stampflehm von Conluto – Vielfalt aus Lehm verwendet. Der Feuchtegehalt des Stampflehms betrug im Lieferzustand, vor der Verarbeitung, 7,6 % die Materialfeuchte wurde mit einer Darrprobe und nach Formel 2 ermittelt.

Formel 2:

$$w = \frac{m_f - m_d}{m_d} \times 100 [\%]$$

Für die Probenentnahme wurden handgestampfte Stampflehmwürfel in den Maßen 200mm x 200mm x 90 mm erstellt. Zur Verdichtung wurden ein Fäustel-Hammer und ein Kantholz verwendet. Die Einfüllhöhe des Stampflehms betrug ca. 8 cm. Nach dem Ausschalen wurden die Proben aus dem Probekörper gestanzt. Als Stanzform wurden angeschrägte Hülsen verwendet, in denen die Proben anschließend verblieben sind und gemessen wurden. Die Fuge zwischen der Stahlhülse und dem Stampflehm wurde mit Lehmörtel verschlossen.

Es wurden acht Proben mit einem Durchmesser von 99 mm entnommen und weitere acht Proben mit einem Durchmesser von 29 mm. Von den jeweils acht entnommenen Proben je Größe waren aufgrund frühzeitigen Bruchs zwei Proben unbrauchbar.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Proben war glatt, die Lagenstruktur war nicht deutlich erkennbar. Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen eine Probe mit großen und eine mit kleinem Durchmesser im feuchten Zustand.



Abbildung 67: Probe mit einem Durchmesser von 99 mm im feuchten Zustand



Abbildung 68: Probe mit einem Durchmesser von 29 mm im feuchten Zustand

6.3.3 Planung der Versuchsreihen

Die nutzbaren Proben wurden in zwei Messreihen aufgeteilt. Dementsprechend wurden in jeder Messreihe drei Proben mit großem und drei Proben mit kleinem Durchmesser untersucht. Die Proben in Messreihe 1 wurden bei ca. 20 °C im Probenlager gelagert. Teil der Untersuchungen war, die Bestimmung des Schallabsorptionsgrades α_0 im Schallimpedanzrohr, Ermittlung des Gewichtsverlustes durch Wiegen und Analysieren der Oberflächenstruktur mittels eines Mikroskops. Die Untersuchungen wurden in zeitlichen Abständen von sechs Tagen und fünfzehn Tagen durchgeführt. Fertiggestellt wurde die Probe am 11.03.22, untersucht am 15.03.22 (Messung 1), 21.03.22 (Messung 2) und am 05.04.2022 (Messung 3) (vgl. Tabelle 19). Die Proben der Messreihe 2 wurden bei 60°C im Trockenschrank bis zur Gleichgewichtsfeuchte getrocknet. Diese Messreihe sollte lediglich das Messen des Schallabsorptionsgrades α_0 der trockenen Proben beinhalten.

Im Verlauf der Untersuchungen haben sich einige Proben als unbrauchbar erwiesen. Von den insgesamt 20 Prüfkörpern in jeweils einem Prüfzylinder konnten letztlich nur sechs Prüfkörper für die Messungen herangezogen werden; zum einen sind Prüfzylinder aufgrund des Grobkorns im Zuschlag beim Stanzvorgang beschädigt worden, zum anderen kam es an manchen Prüfkörpern mit zunehmender Trocknung zu Abplatzungen. Aus diesem Grund ist in dieser Arbeit die Auswertung der Messreihe 2 nicht vollständig möglich gewesen.

Tabelle 18: Nutzbare Proben für die Untersuchungen

Messreihe	Große Proben	Kleine Proben
1	9,4	7,5
2	3,5,6	-

Tabelle 19: Bezeichnung der Messung durchgeführten Messungen

Datum	Bezeichnung
15.03.2022	Messung 1
21.03.2022	Messung 2
05.04.2022	Messung 3

6.3.4 Messungen und Ergebnisse

6.3.4.1 Schallimpedanzrohr-Messungen

Messaufbau

Die Schallabsorptionsgradbestimmung für senkrechten Schalleinfall mithilfe des Schallimpedanzrohres (Kundt'sches Rohr) fand im Labor des Erich-Thienhaus-Instituts in Detmold statt. Bei den Messungen kam folgendes Equipment und Messverfahren zum Einsatz:

- Impedanzrohr: Brüel & Kjaer Type 4002; Seriennummer 491900
 - Eigenentwickelte Schlittenmotorisierung und automatisierte Messungen mit Linear-Antrieb (ISEL)
 - Kreisrunde Prüflingshalter: $d_s = 29$ mm; $d_b = 99$ mm mit schallhartem Abschluss
- Audio Interface: Babyface Pro von RME
- Rechner: Lenovo ThinkPad L470
 - Messsoftware: ITA-Toolbox & Skripte in Matlab
- Sweep-Anregung (Länge 2^{15} samples, 48 kHz Abtastrate), Auswertung in theoretisch nutzbaren Frequenzbereichen (untere Grenze: Rohrlänge $> \lambda/4$; obere Grenze: Rohrdurchmesser $< \lambda/2$).



Abbildung 69: Schallimpedanzrohr inkl. Lautsprecher, Schlitten, ISEL mit kreisrundem Prüflingshalter ($d_s = 29$ mm)

Auswertung

Die Messungen wurden nach DIN EN ISO 10534-1:2001-10 durchgeführt. Der Messaufbau wurde durch automatisierte Messungen mit einer eigenentwickelten Schlittenmotorisierung mittels Linear-Antrieb (ISEL) erweitert. Die Auswertung erfolgte direkt in einem geschriebenen Matlab Skript. In diesem wurden die Schallabsorptionsgrade α_0 für senkrechten Schalleinfall berechnet. Bestimmt wurden diese mittels des Stehwellenverhältnisses von Schalldruckminima (P_{\min}) und Schalldruckmaxima (P_{\max}), die während des Ab tastens des Schallfeldes gemessen wurden. (vgl. Formel 3 und Formel 4)

Formel 3:

$$n = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$$

Formel 4:

$$\alpha_0 = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{1}{n + \frac{1}{n} + 2}$$

Während der Messung muss sichergestellt werden, dass sich keine Quermoden im Rohr bilden. Aus diesem Grund sind die gewählten Rohrdurchmesser kleiner als die Schallwellenlänge. Der auswertbare Frequenzbereich des Rohres und der Probe mit einem Durchmesser von 99 mm liegt dementsprechend von 90 Hz bis 1800 Hz und für den Durchmesser von 29 mm von 800 Hz bis 6500 Hz. Die Auswertung in Matlab erfolgte in theoretisch nutzbaren Frequenzbereichen.

Dargestellt sind in den folgenden Abschnitten die gemittelten Schallabsorptionsgrade α_0 der von der Messung 1, 2 und 3. Hier wurde das arithmetische Mittel der Schallabsorptionsgrade der gemessenen Proben je Messtag gebildet. Anschließend wurden mittels Terzbandfilter die Terzbandmittenfrequenzen bestimmt.

Ergebnisse

Die gemessenen und anschließend gemittelten frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall der Messreihe 1 sind der Abbildung 70 zu entnehmen. Es bildet sich ein welliger Absorptionsgradverlauf, dies beruht auf der Auswertung von Matlab in theoretisch nutzbaren Frequenzbereichen. Der Trendlinienverlauf der gemittelten Ergebnisse lässt eine leichte Zunahme des Schallabsorptionsgrades mit Abtrocknen der Proben erkennen sowie ein Anstieg des Schallabsorptionsgrades vom tieffrequenten zum hochfrequenten Bereich.

Abbildung 71 zeigt die gemittelten Schallabsorptionsgrade α_0 in Terzbandmittenfrequenzen. Deutlicher zu sehen ist bei dieser Darstellung die leichte Zunahme des Schallabsorptionsvermögens mit fortgeschrittener Trocknung. Die Zunahme beträgt im Mittel ca. 0,02 bis 2 %-Punkte. Insgesamt haben alle Kurven einen ähnlichen Verlauf. Die Schallabsorptionsgrade schwanken im Bereich von 100 Hz bis 1600 Hz zwischen 0,11 und 0,22. Auffallend ist, dass die gemittelten Schallabsorptionsgrade von Messung 2 und 3 ab 1600 Hz einen fast gleichen Verlauf aufweisen.

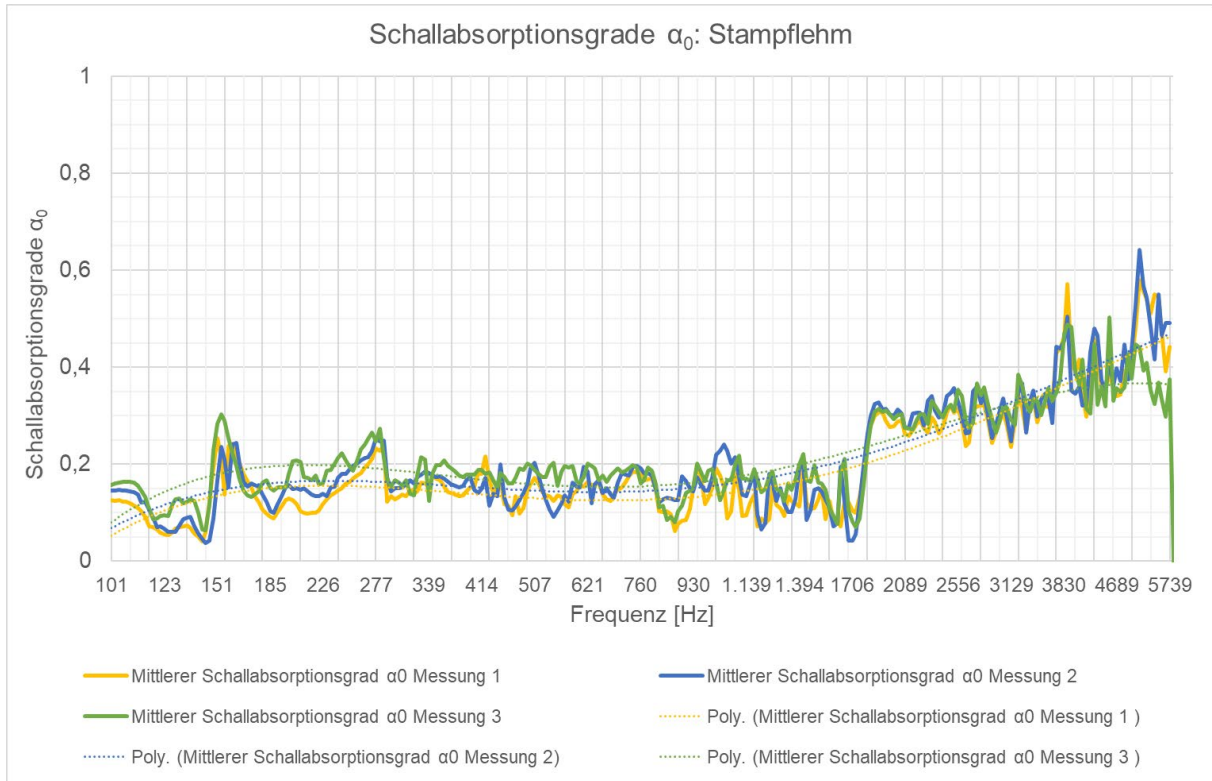


Abbildung 70: Schallabsorptionsgrad α_0 für Stampflehm in theoretisch nutzbaren Frequenzbereichen

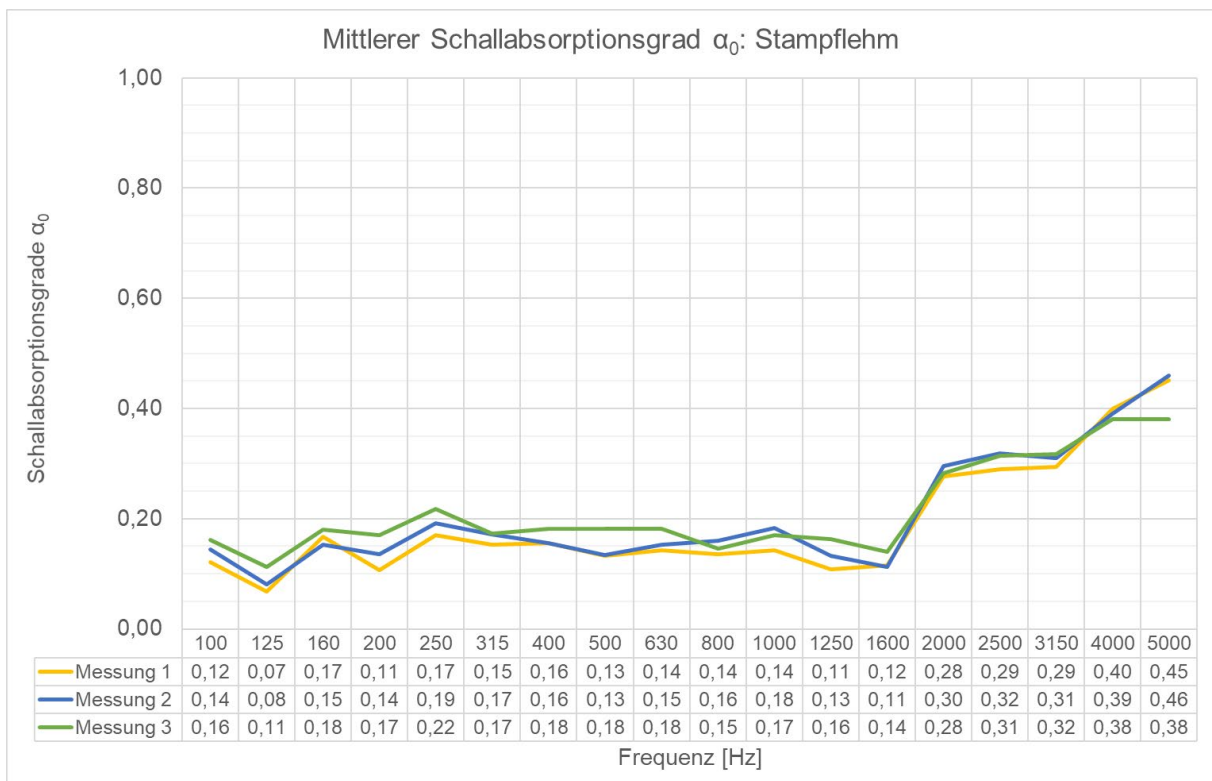


Abbildung 71: Schallabsorptionsgrad α_0 für Stampflehm in Terzbandmittenfrequenzen

6.3.4.2 Mikroskopische Oberflächenaufnahmen

Messaufbau

Für die Oberflächenaufnahmen wurde ein digitales Auflichtmikroskop Keyence VHX 2000 mit 20-facher Vergrößerung verwendet.

Untersucht wurden die Proben 4 und 9 mit dem Durchmesser von 99 mm. In den gewählten Zeitabständen wurden automatisch zusammengesetzte Oberflächenaufnahmen erstellt. Mittels einer Schablone und Markierungen an den Hülsen wurde versucht, bei den Aufnahmen einen einheitlichen Startpunkt zu erzeugen. Ziel war eine bessere Vergleichbarkeit der Aufnahmen.

Auswertung

Mit einem digitalen Auflichtmikroskop ist das Anfertigen einer automatischen Flächenmessung und das Belegen der Aufnahme mit einem Flächenfilter möglich. Bei der automatischen Flächenmessung werden die auf der Aufnahme ermittelten Poren gezählt und deren Fläche gemessen. Diese Poren lassen sich durch das Belegen mit dem Flächenfilter darstellen. Anschließend wird ein Flächenverhältnis berechnet (Porenfläche zu Gesamtfläche). Die Ergebnisse dienen jedoch nicht der konkreten Auswertung, sie dienen lediglich der Unterstützung der optischen Analyse.

Ergebnisse

Die mikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 72 und Abbildung 73) zeigen, dass die Oberflächenstruktur sich während der Trocknung verändert. Durch den Flächenfilter wird deutlich, dass sich die Poren mit zunehmender Trocknung vergrößern. Optisch ist zu sehen, dass sich die Größe und Anzahl der Poren von der ersten zur zweiten Untersuchung stärker verändert haben als von der zweiten zur dritten Untersuchung.

Die Abbildung 74 zeigt das berechnete Flächenverhältnis der Proben 4, 9 und deren Mittelwert an den Messtagen. Erkennbar ist ein Anstieg des Flächenverhältnisses während der Trocknung. Im Mittel steigt das Flächenverhältnis in den 3 Wochen von 26,5 % auf 31 % an. Sichtbar wird, dass der Anstieg von der Messung 1 zur Messung 2 größer als der Anstieg von der Messung 2 zur Messung 3 ist.

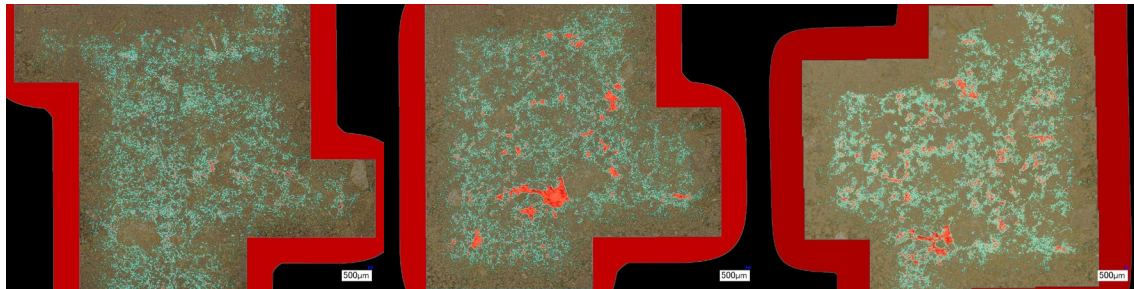


Abbildung 72: Mikroskopische Oberflächen-Aufnahmen mit Flächenfilter Probe 4 vom 15.03.2022 (links), 21.03.2022 (mitte) und 05.04.2022 (rechts)

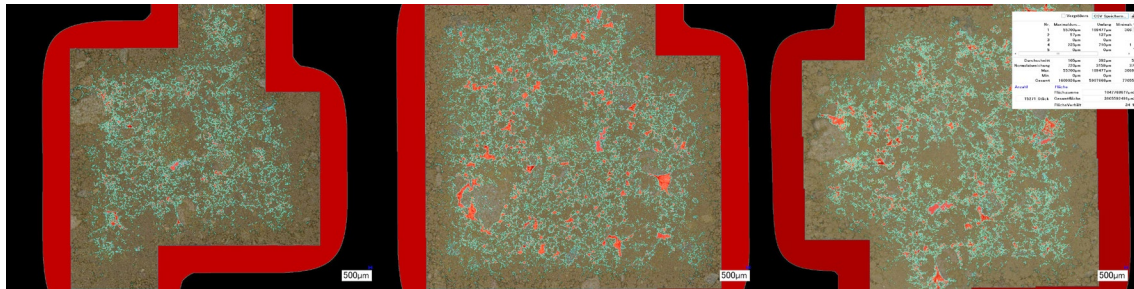


Abbildung 73: Mikroskopische Oberflächen-Aufnahmen mit Flächenfilter Probe 9 vom 15.03.2022 (links), 21.03.2022 (mitte) und 05.04.2022 (rechts)

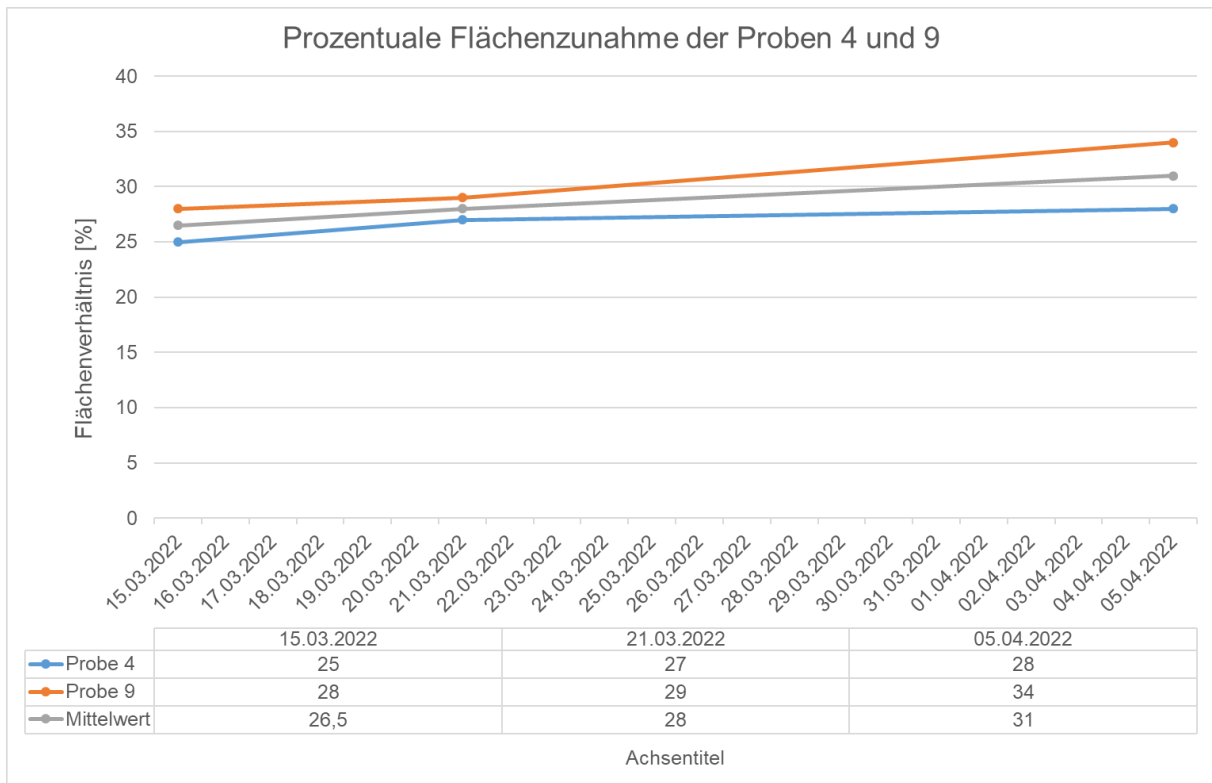


Abbildung 74: Prozentuales Flächenverhältnis der Proben 4 und 9

6.3.4.3 Gewichtsdocumentation

Messaufbau und Auswertung

In der Messreihe 1 wurde das Abtrocknen der Proben durch Wiegen festgehalten. Dazu wurden die Proben am Tag der Fertigstellung und an den Tagen, an denen die Untersuchungen stattgefunden haben, gewogen. Ausgewertet wurde der Gewichtsverlust im Verhältnis zum Gewicht am Tag der Fertigstellung.

Ergebnisse

Das prozentuale Verhältnis des Gewichtsverlusts der Probe ist der Abbildung 75 zu entnehmen. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass der Verlust der jeweiligen Proben vom Tag der Fertigstellung zum ersten Untersuchungstag der Messreihe am höchsten ist. Es ist ebenso sichtbar, dass der Gewichtsverlust der kleinen Proben zu Beginn stärker ist als der der großen Proben. Bei allen Proben liegt die Abnahme am letzten Tag der Messreihe bei ca. 6 %. Bei den kleinen Proben ist unter anderem auffällig, dass vom 21.03.2022 zum 05.04.2022 keine Abnahme mehr stattgefunden hat.

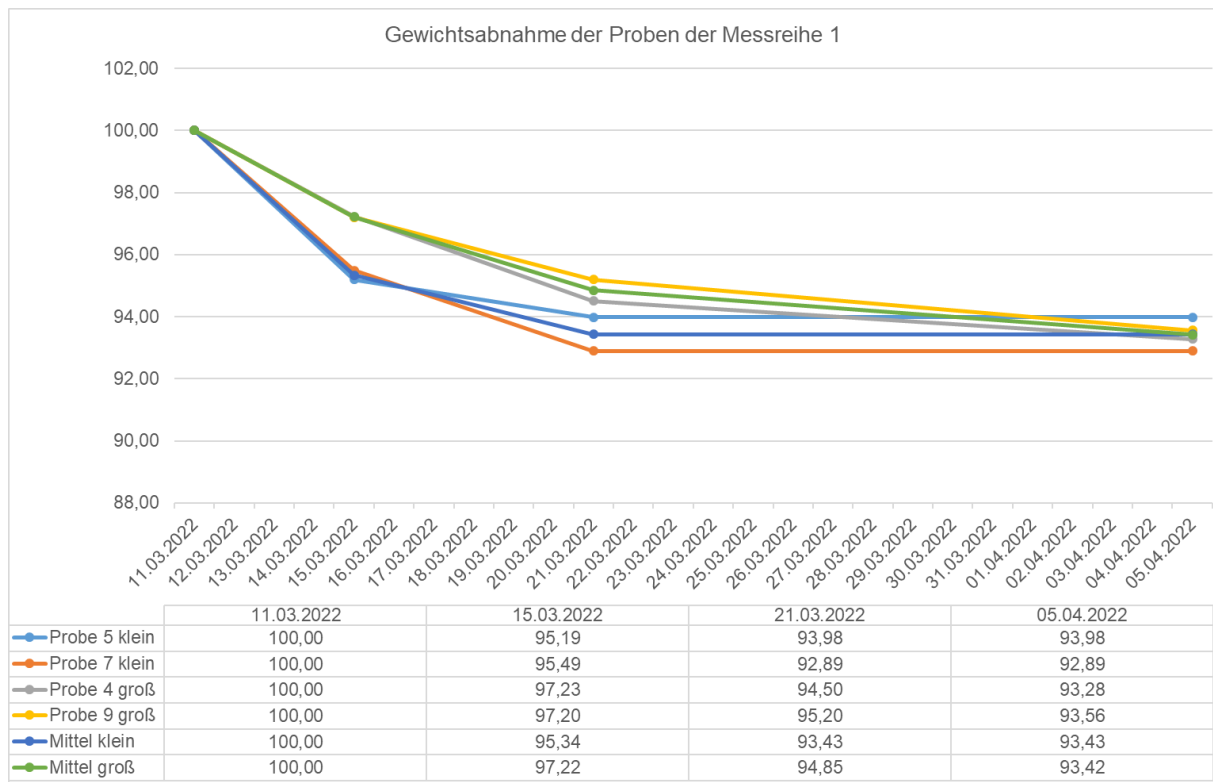


Abbildung 75: Gewichtsabnahme der Probe der Messreihe 1

6.3.5 Fazit

Anhand der Messergebnisse lassen sich Zusammenhänge zwischen den Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit, der Materialfeuchte und dem Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall des Stampflehms erkennen. Es kann festgehalten werden, dass mit Abnahme der Materialfeuchte und Zunahme der Oberflächenporen das Schallabsorptionsvermögen steigt.

Deutlich wird, je geringer die Abnahme der Materialfeuchte ist, desto geringer ist die Zunahme der Oberflächenporen und des Schallabsorptionsgrades.

Dass die Gesamtzunahme des Schallabsorptionsgrades in dieser Messkampagne sehr gering war, lag vermutlich daran, dass die Proben am ersten Messtag bereits einen großen Teil ihrer Materialfeuchte verloren hatten.

Im Gesamtkontext erscheint nun plausibel, dass die Kurven des Schallabsorptionsgrades α_0 ab 1600 Hz (bis auf den Wert bei 5.000 Hz) keine Unterschiede zwischen der Messung 2 und der Messung 3 aufweisen. Denn die kleinen Proben, die für diesen Frequenzbereich die Ergebnisse liefern, waren laut der Gewichtsdocumentation bereits bei der Messung 2 vollständig getrocknet.

Das Schallabsorptionsvermögen von Lehm ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Einige dieser Faktoren konnten im Rahmen der Messungen erfasst und erste Zusammenhänge dargestellt werden.

Die Probenentnahme und das Erhalten der Proben hat sich allerdings als sehr herausfordernd erwiesen.

6.4 Gesamtfazit

Die akustischen Untersuchungen an den Lehmoberflächen haben gezeigt, dass die ermittelten Schallabsorptionsgrade im Vergleich zu Planungswerten von in der Baupraxis zweckentsprechend eingesetzten, konventionellen Materialien wie Beton oder Kalkzementputz ein signifikant höheres Schallabsorptionsvermögen aufweisen.

Dieses vielversprechende Ergebnis deutet darauf hin, dass Lehm nicht nur als ökologisch nachhaltige Alternative in Bauprojekten betrachtet werden kann, sondern auch gezielt zur Verringerung von Nachhallzeiten in Räumen dient - besonders wenn zugleich eine gute thermisch-hygrische Pufferwirkung erzielt und bewusst reduzierte gestalterische Mittel im Sinne eines minimalistischen Baustils eingesetzt werden sollen. Umgekehrt kann aufgrund der vergleichsweise guten schallabsorbierenden Eigenschaften des Lehms ggf. auf zusätzliche absorbierende Akustik-Verkleidungen verzichtet werden, was als Voraussetzung zur Nutzung der thermisch-hygrischen Pufferwirkung des Lehms betrachtet werden muss.

Denkbare Anwendungsbereiche erstrecken sich von Ausstellungsräumen, Schulen, Sitzungs- und Vortragsräumen hin zu Foyers, Aufnahmestudios, Kirchen und Kapellen.

Zusätzliche Forschung und Praxiserfahrungen könnten dazu beitragen, die Einsatzfähigkeit von Lehm als raumakustisch wirksames Baumaterial weiter zu verbessern und seine Potenziale auszuschöpfen.

7 Museumspädagogik

7.1 Inhalte und Herangehensweise

Der neue Museumsbau thematisiert vorrangig zwei zentrale Aspekte des nachhaltigen Bauens. Auf der einen Seite soll das Gebäude klima- und ressourcenschonend errichtet werden. Darüber hinaus soll während der Nutzungsphase ein hocheffizienter Betrieb gewährleistet werden, welcher den Energieverbrauch des Gebäudes minimiert.

Diese beiden Kernthemen beinhalten mehrere zusammenhängende Faktoren, die durch didaktische Komponenten an die Museumsbesucher herangetragen werden sollen. Dazu werden den Besuchern die einzelnen Themen und Baustoffe anhand von Informationstexten und Veranschaulichungen nähergebracht und erläutert mit dem Ziel, ein differenziertes Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln zu fördern.

Dazu ist es zunächst wichtig, ein grundlegendes Verständnis des Begriffes „Nachhaltigkeit“ im Zusammenhang der Baubranche zu schaffen. Dazu wird der untenstehende Text genutzt und die drei Hauptschlagwörter inszeniert oder bildlich hervorgehoben.

Anschließend werden vier nachhaltige, im Museum verbaute Materialien betrachtet: *Ökobeton*, *Holz*, *Lehm* und *Stroh*. Zunächst erfolgt jeweils eine geschichtliche Zusammenfassung über die Verwendung des Baustoffes, dann eine Betrachtung unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und zuletzt eine Einordnung, wie und wo der Baustoff im Museum verwendet worden ist. Dazu soll ein Modell oder Grundriss ausgestellt werden, in denen farblich die zuvor beschriebenen Materialien verortet werden. Zusätzlich werden dann im Museum selbst die Bauteile aus Ökobeton, Holz, Lehm und Stroh durch ein Logo markiert werden, sodass der Besucher diese im gebauten Raum wiederfinden kann.

7.2 Ausstellung

Wichtige Kernaussagen oder Merkmale der einzelnen Baustoffe werden zusätzlich hervorgehoben und sichtbar gemacht. Beim *Ökobeton* soll der Fokus auf das Potenzial des CO₂-Einsparens im Vergleich zu herkömmlichem Beton gelegt werden. Dazu werden als Didaktik-Elemente Glasröhren aufgestellt, die mit den Bestandteilen des Betons gefüllt werden. Dabei ist auch das Verhältnis dieser untereinander zu berücksichtigen und abzubilden. Daneben findet sich eine zweite Glasröhre, die die Anteile der CO₂-Emissionen der einzelnen Bestandteile wiedergibt. Hier wird verdeutlicht, dass nicht nur die Menge des Betons maßgeblich Einfluss auf den CO₂-Ausstoß auf die Umwelt hat, sondern auch die Zusammensetzung, da die Herstellung bestimmter Bestandteile mehr oder weniger CO₂ freisetzt. Um die Werte, Größen und Verhältnisse für den durchschnittlichen Besucher greifbar zu machen, sollen diese immer auf eine Menge heruntergerechnet werden, die man sich vorstellen kann. Zum Beispiel könnte man die Mengen an CO₂, die bei der Herstellung für eine Tonne Beton anfällt, auf den CO₂-Ausstoß von Autos umrechnen, die von Detmold nach Berlin fahren.

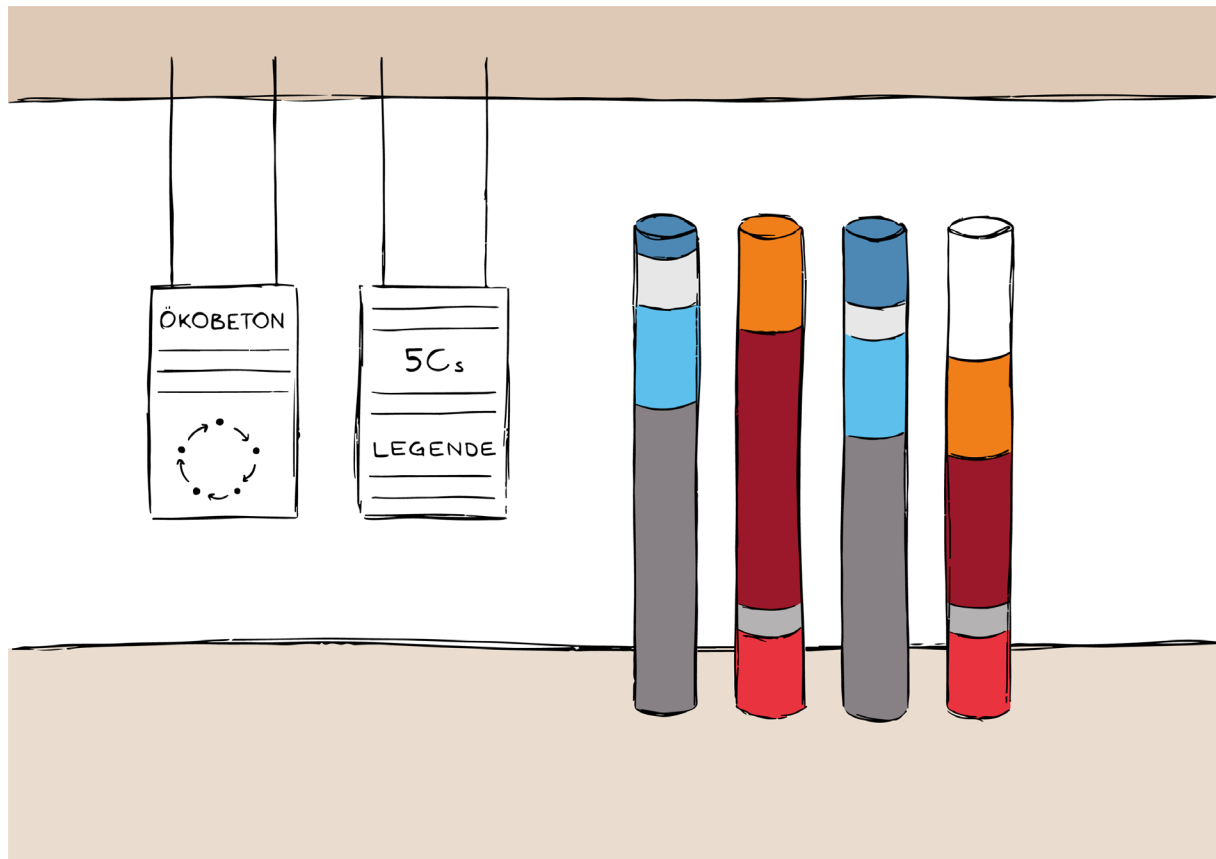


Abbildung 76: Didaktik-Element Ökobeton

Der Informationsbereich zum Thema *Holz* setzt den Fokus auf die leimfreie Verbindung der Binder, da diese eine einfache und reine Rückbaubarkeit und somit Kaskadennutzung ermöglicht. Im Vergleich zu einem Vollholz und einem gelemten Binder soll gezeigt werden, dass die im Museum verwendete Konstruktion den statischen Anforderungen problemlos standhalten kann. Für den Besucher soll die Belastbarkeit und die dazugehörige Durchbiegung der Binder erlebbar gemacht werden. Dazu wird ein Versuchsaufbau installiert, bei dem gleich dicke Holzbinder, Vollholz, Leim- und Steckverbindung, auf Füßen aufgelagert werden. Die Museumsbesucher können nun die verschiedenen Binder besteigen und das Verhalten des Holzes erspüren. Gleichzeitig soll die Durchbiegung visuell in Form einer Linie auf die dahinterliegende Wand projiziert werden, sodass man das Ergebnis nicht nur erlebt, sondern auch sehen kann. Dabei kann die Durchbiegung in cm angegeben werden, um eine konkrete und vergleichbare Größe zu erhalten. Alternativ könnte ein Aufbau inszeniert werden, bei dem die drei unterschiedlichen Holzbinder mit dem jeweils gleichen Gewicht belastet werden. Die Dicke des Holzes muss dann jeweils an die Belastung angepasst werden. So wird verdeutlicht, dass alle Binder die Last tragen können, dabei aber ein anderer Materialverbrauch vorliegt.

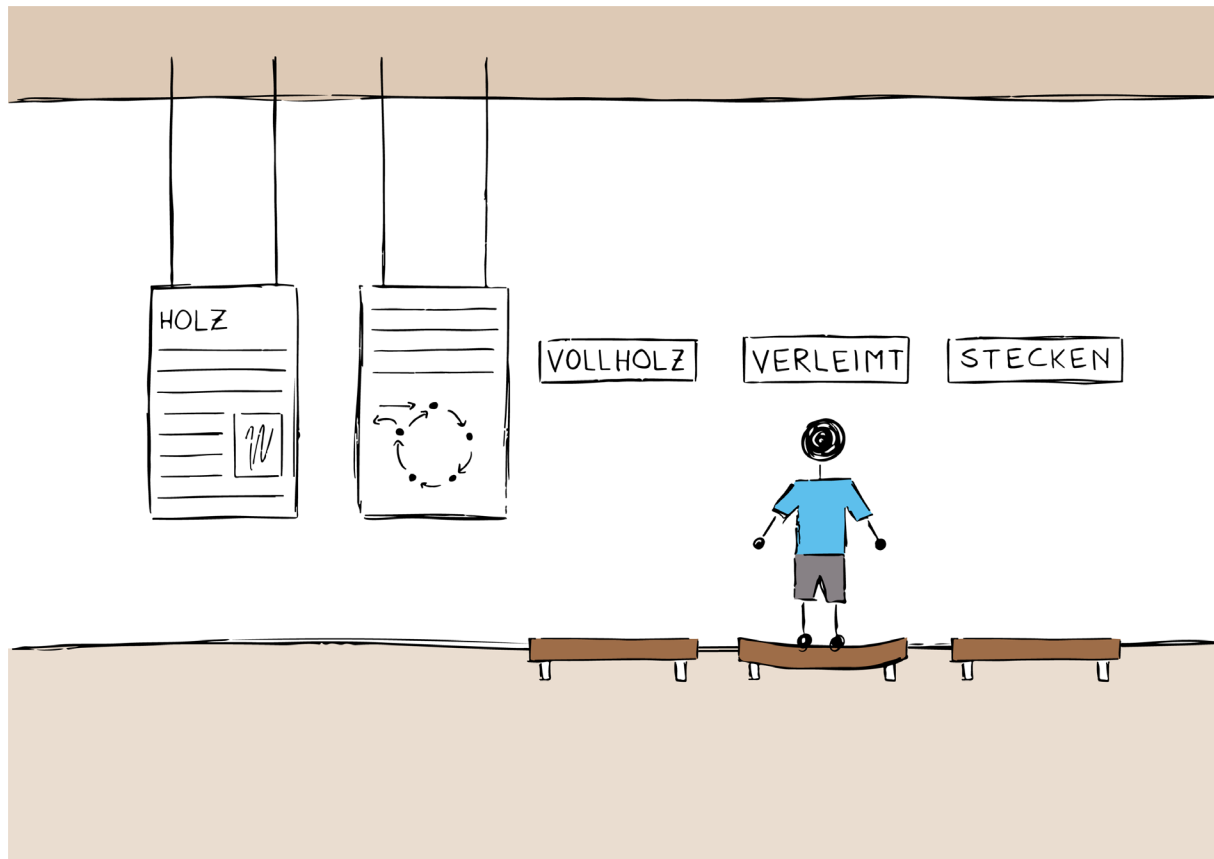


Abbildung 77: Didaktik-Element Holz

Die Station zum Baustoff *Lehm* geht im Wesentlichen auf das Merkmal der Umsetzbarkeit des Cradle to Cradle Prinzips ein. Neben den Informationstafeln soll es „Lehm zum Anfassen“ geben, um das Verhalten von Lehm selber erfahren zu können. Dazu wird eine Knetstation eingerichtet, bei der die Besucher diesen kneten und formen können und so ein Gefühl für das Material vermittelt bekommen. Zusätzlich werden sie dazu aufgefordert, bereits angefangene kleine Lehmwände zu erweitern, sodass man in Schichten den Prozess des Trocknens ablesen, aber auch schon bereits verwendeten Lehm auf der Fläche neugestalten kann. Um zu verdeutlichen, dass sich Lehm nach seiner Verarbeitung als Baumaterial dazu eignet, wieder der Erde zurückgeführt werden zu können, stehen kleine Töpfchen mit Lehm als Mutterboden auf der Station, in denen die Besucher Kresse einpflanzen können. Diese bleiben mit Datum versehen im Museum stehen und nachfolgende Personen können sehen, wie die Pflanzen aus dem Lehm wachsen. Darüber hinaus soll auf die wärmespeichernde Eigenschaft von Lehm eingegangen werden. Dazu sollen mehrere Wandaufbauten bzw. Oberflächen, ausgestellt werden, die zeitweise Wärmestrahlung (künstlich oder solar) ausgesetzt sind und dann von den Museumsbesuchern mit einer Thermographiekamera untersucht werden können. Hier wird deutlich werden, dass die Lehmoberflächen wärmer (bzw. kälter) sind, was auf ihre hohe Wärmespeicherkapazität zurückzuführen ist.



Abbildung 78: Didaktik-Element Lehm

Das letzte Material *Stroh* setzt den Fokus auf das Thema der Ressourcenschonung. Über Texte und Grafiken wird der Vorteil hervorgehoben, dass Stroh ein nachwachsender Rohstoff ist und darüber hinaus auch noch als Abfallprodukt der Landwirtschaft ohne weiteren Aufwand regional zu Verfügung steht. Gleichzeitig wird veranschaulicht, dass man mit dem Einsatz einer Strohdämmung die CO₂-Emissionen eines Gebäudes senken kann. Hierzu werden zwei herkömmliche Wandaufbauten und eine mit Stroh als Dämmung im Raum aufgestellt, wobei die Kopfseiten offen sind und der Besucher die einzelnen Schichten ablesen kann. Alle drei Wände weisen dabei denselben Wärmedurchgangskoeffizienten auf, sprich sie dämmen gleich gut. Auf einer Informationstafel findet sich dann ein Säulendiagramm wieder, das den CO₂-Ausstoß von Rohstoffabbau über Transport bis zur Herstellung und Einbau abbildet. Hierbei wird deutlich, dass Stroh großes Potenzial zum Einsparen von CO₂-Emissionen aufweist und dabei genauso gute Dämmeigenschaften der Wände erreichen kann wie handelsübliche Dämmstoffe.

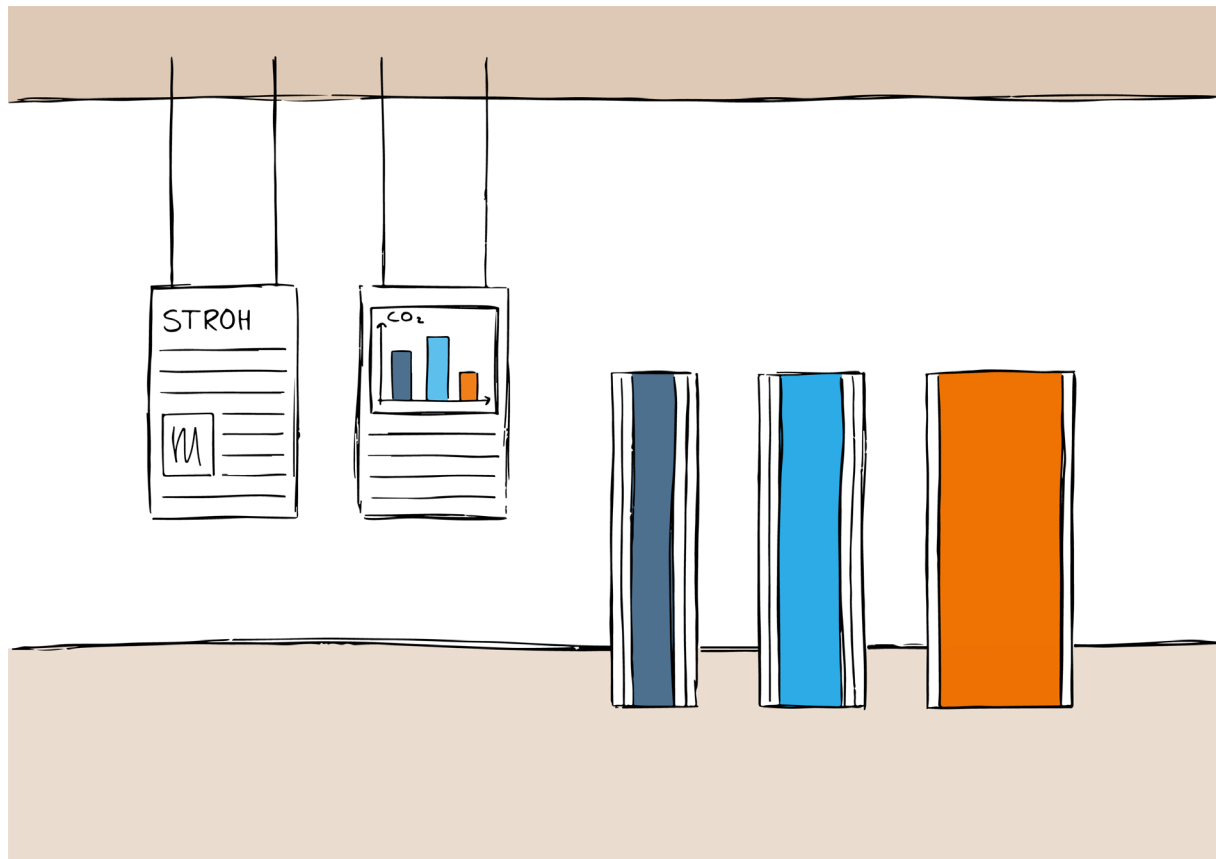


Abbildung 79: Didaktik-Element Stroh

Nach der Vorstellung der einzelnen Baustoffe geht die Ausstellung in einen Bereich über, in dem das Freilichtmuseum einem herkömmlichen Museum gegenübergestellt wird. Hierdurch soll verdeutlicht werden, wieviel nachhaltiger das Gebäude aber auch der Besuch in dem Museum selber ist, da ja neben nachhaltigen Rohstoffen auch auf einen effizienten Betrieb Wert gelegt wird. Zusätzlich soll der Besucher dafür sensibilisiert werden, welchen Einfluss sein persönliches Verhalten auf die Umwelt hat.

Dazu wird zunächst in einem Video das Freilichtmuseum in Hinblick auf die *Ökobilanz* und den Einfluss auf die Umwelt mit einer herkömmlichen Bauweise verglichen. Hauptsächlich wird dabei auf den Ausstoß von CO₂ und das Einsparen von Energie im Betrieb eingegangen. Die Keywords sollen dabei plakativ dargestellt werden, um den Zuschauern im Kopf zu bleiben, während die genauen Inhalte sprachlich erklärt werden. Unterschiedliche Größen oder Mengen, beispielsweise der CO₂-Anteil oder Stromverbrauch, werden in einem Säulendiagramm bzw. Graphen dargestellt, um eine direkte Vergleichbarkeit zu schaffen. Auch hier sollen die Größen, wie bereits beim Ökobeton erwähnt, in eine verständliche Einheit bzw. Größenordnung runtergebrochen werden, um sie für den Besucher greifbar zu machen.

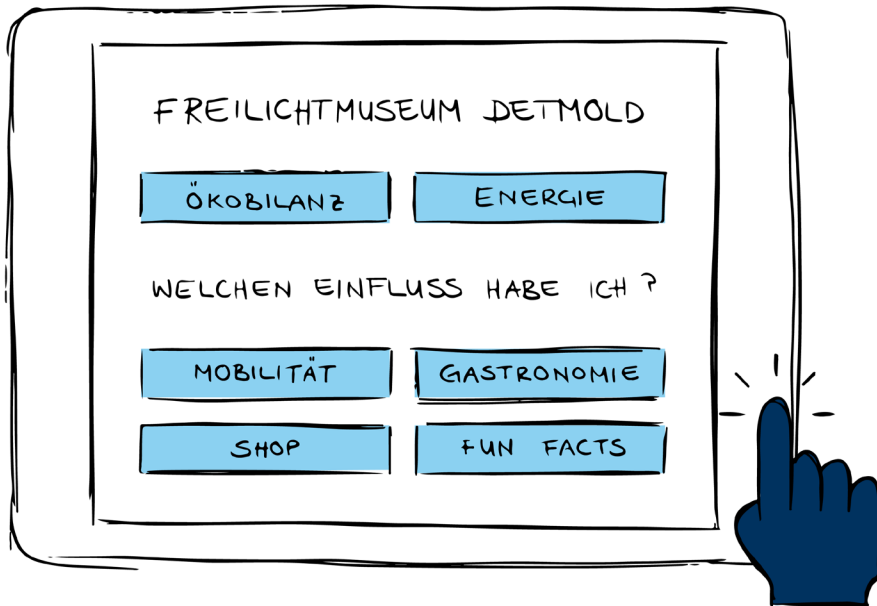


Abbildung 80: Dashboard-Oberfläche

Im anschließenden Teil soll dem Besucher sein persönlicher Einfluss auf die Umwelt durch seinen Besuch im Freilichtmuseum vor Augen geführt werden. Hier gibt es mehrere Kategorien, die man auf einem Bildschirm mit Touchscreen auswählen und sich durcharbeiten kann: Mobilität, Gastronomie, Shop, Fun Facts, Good to know, etc.

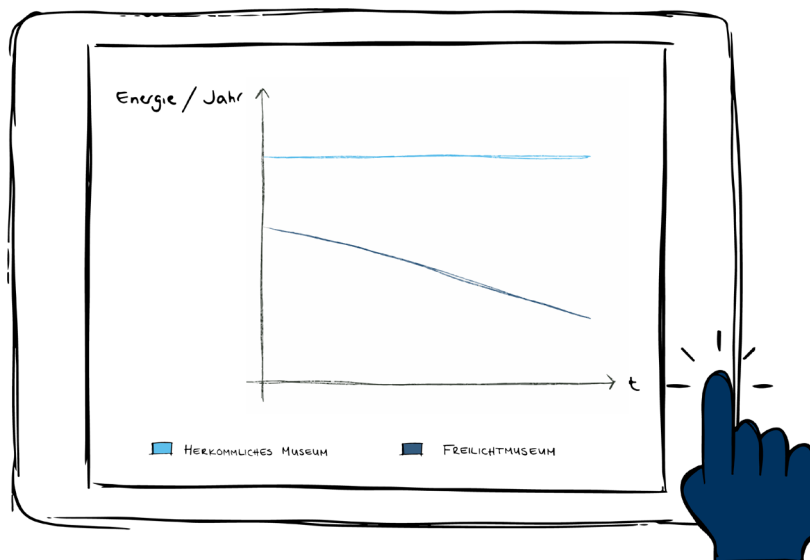


Abbildung 81: Dashboard Energieverbrauch Museum aktuell und herkömmlich

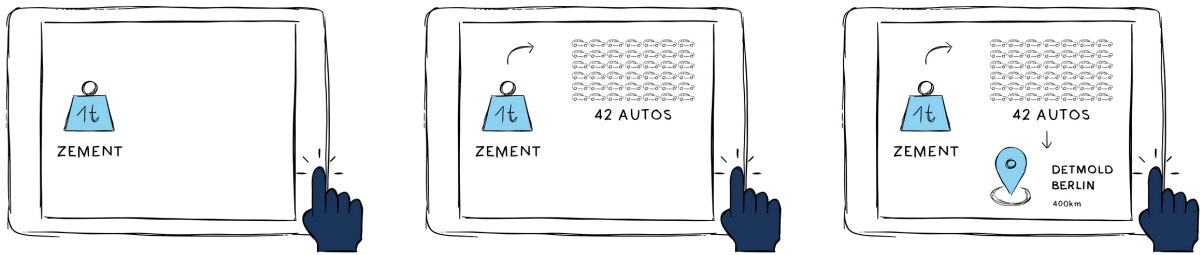


Abbildung 82: Grafik Vergleich CO₂-Emissionen Mobilität und Baustoffverwendung

Beim Thema „Mobilität“ geht es um die persönliche Anreise des Besuchers. Hier wählt er sein Transportmittel, die zurückgelegte Strecke und die Anzahl der Personen aus. Das System berechnet nun, wieviel CO₂ auf der Fahrt freigesetzt wurde. Indem der Besucher die einzelnen Parameter beliebig ändern kann, wird ihm gezeigt, wieviel CO₂ er mit einer anderen Anreise hätte einsparen können oder auch bereits gegenüber einem anderen Transportmittel eingespart hat.

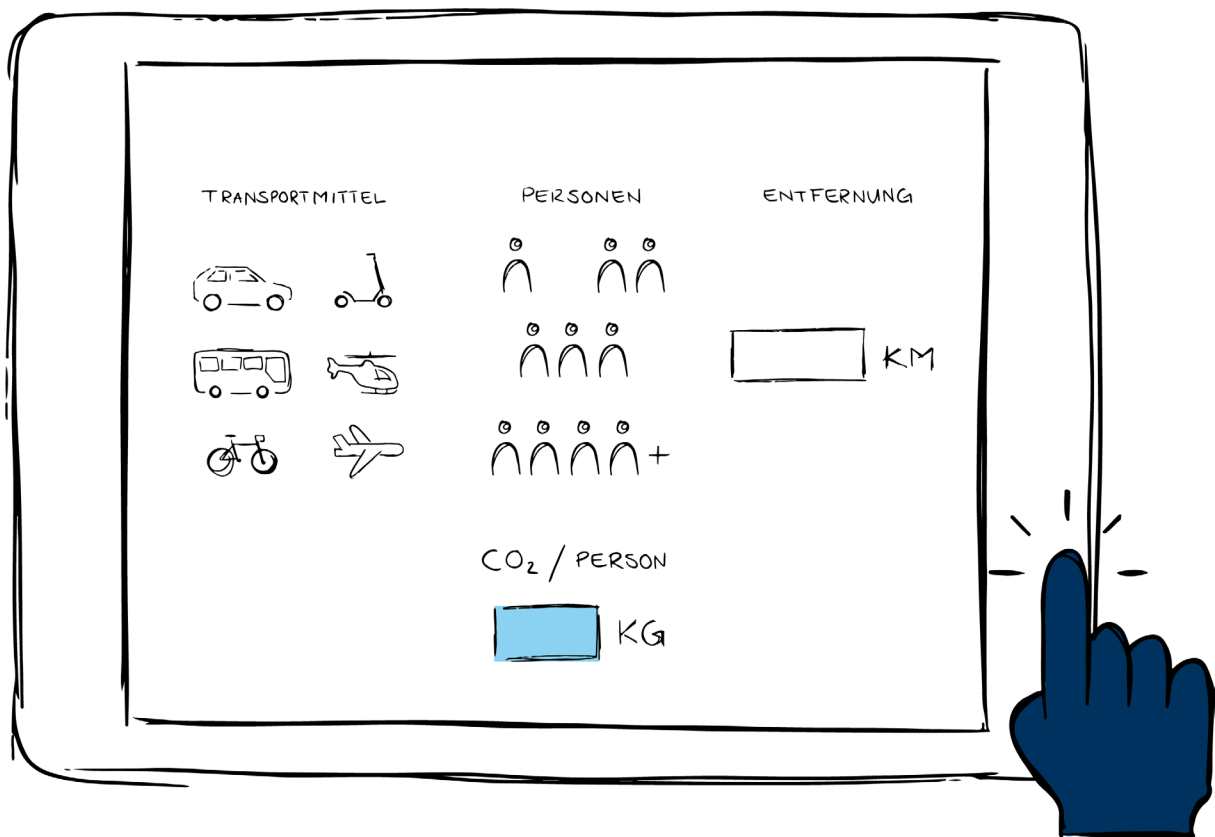


Abbildung 83: Vergleich CO₂-Emissionen Transportmittel

Beim Bereich „Shop“ wird dem Museumsbesucher verdeutlicht, dass jeder Einkauf natürlich einen Einfluss auf die Umwelt hat, dieser aber durch nachhaltige Materialien und regionale Produktion möglichst geringgehalten wird. Hierzu werden einige Artikel, die es auch wirklich im Museumsshop zu erwerben gibt, mit herkömmlichen verglichen. So können beispielsweise ein Kugelschreiber aus recyceltem Plastik einem Standard-Stift gegenübergestellt werden oder etwa ein Schlüsselanhänger aus Holz dem aus Metall. Auch hier sollen die Mengenangaben wieder vereinfacht runtergebrochen und bildlich dargestellt werden.

Ähnlich soll der Themenaspekt „Gastronomie“ beleuchtet werden. Hier spielen die Themen Regionalität und Energieverbrauch die wesentliche Rolle, die auch wieder an konkreten Beispielen erläutert werden. So kann man anhand eines Burgers mit regionalem oder importiertem Rindfleisch den CO₂-Abdruck durch lange Transportwege veranschaulichen. Am Beispiel einer Portion Pommes wird gezeigt, wieviel Energie im Freilichtmuseum gegenüber einer herkömmlichen Fritteuse eingespart werden kann. Natürlich werden beide Aspekte an mehreren Angeboten der Gastronomie verdeutlicht und auch wieder auf verständliche Größen umgerechnet und dargestellt.

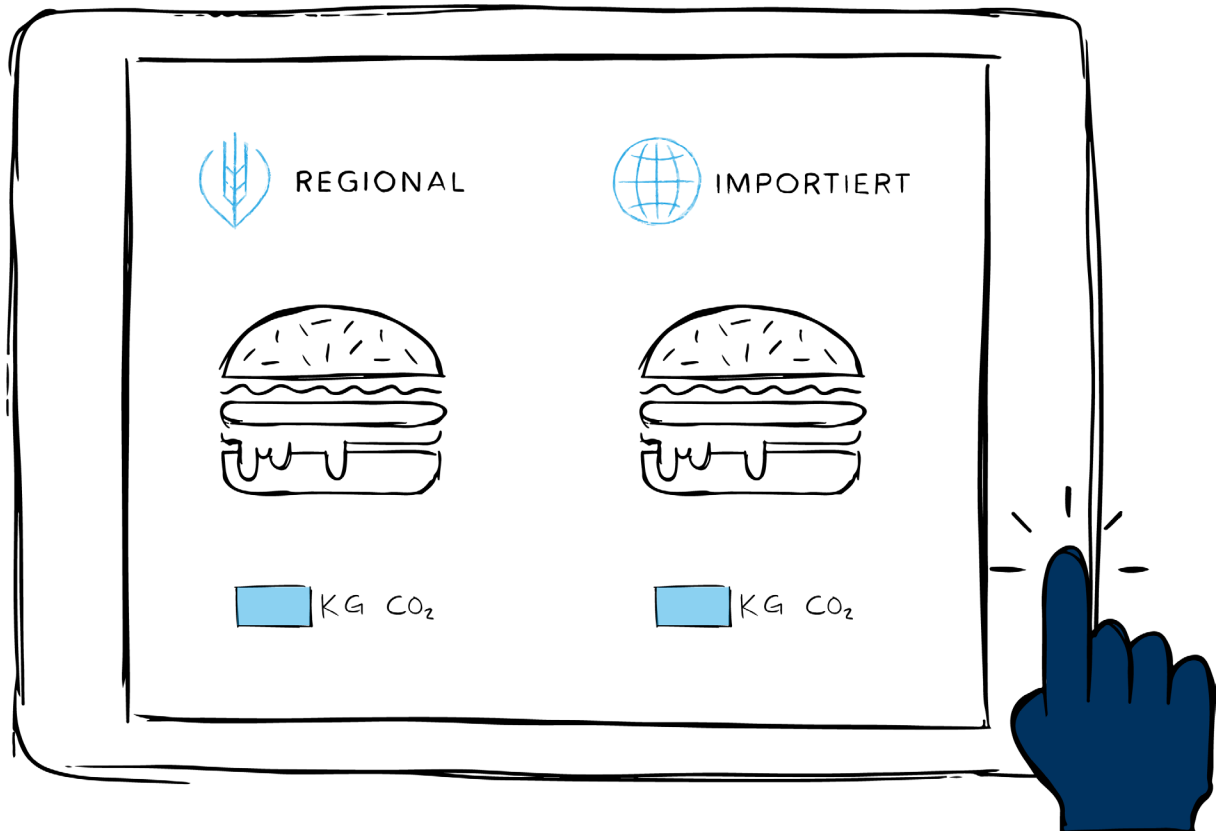


Abbildung 84: Grafik Vergleich CO₂-Emissionen Gastronomie

Als letztes sollen kleine und auch lustige Fakten über den Museumsbesuch herausgestellt werden, bei denen auch wieder die Kerngedanken des CO₂-Ausstoßes und des Energiesparens herausgestellt werden. Beispiele könnten hier folgende sein: Wieviel weniger Wasser verbraucht die Toilettenspülung im Freilichtmuseum gegenüber einem nicht nachhaltigen Museum, da diese mit Regenwasser betrieben wird? Wieviel sparsamer ist das Heizen im Museum? Werden Flyer auf Recyclingpapier gedruckt und wieviel CO₂ wird dadurch eingespart? Wieviel Strom wird beim Warm-Händewaschen dank des hohen Anteil Grüner Energie im Freilichtmuseum im Vergleich zu einem anderen Gebäude eingespart? Durch die verschiedenen Bereiche soll dem Besucher verdeutlicht werden, dass jede unserer Handlungen einen Einfluss auf unsere Umwelt hat, das ist gar nicht zu vermeiden. Doch es ist wichtig, nach Lösungen zu suchen, die einen negativen Einfluss möglichst geringhalten. Es soll gezeigt werden, dass jeder Einzelne einen Beitrag leisten kann.

7.3 Workshops

Um die vorangegangenen Inhalte zusätzlich für die jüngeren Museumsbesucher zugänglich und heruntergebrochen zu vermitteln, können Workshops zu den einzelnen Materialien angeboten werden. Hier sollen die wichtigsten Fakten, Begriffe und nachhaltigen Aspekte vereinfacht erklärt werden. Anschließend sollen sie die Möglichkeit haben, selber praktisch mit den Materialien zu arbeiten. Aus Beton können die Kinder und Jugendlichen Kerzen, Vasen oder Ähnliches gießen. Zum Thema Holz wird ein TicTacToe-Spiel gefertigt, dass sie selber zu-rechtsägen und bemalen können. Dem Workshop zum Material Lehm kann ein Besuch an die Töpferei angeschlossen werden, um dort mit dem Material zu arbeiten. Aus Stroh können die Workshop-Besucher im Anschluss Sterne basteln. So haben sie in jedem Bereich die Möglichkeit, ihr Wissen zu erweitern und die gefertigten Sachen als Erinnerung mit nach Hause zu nehmen.

7.4 Mögliche textliche Inhalte zu den Ständen der Ausstellung

7.4.1 Nachhaltigkeit

Was ist eigentlich Nachhaltigkeit?

Jeder von uns hat dieses Wort schon mal gehört und das wahrscheinlich in den unterschiedlichsten Bereichen des Alltags. Und je nachdem in welchem Kontext man von Nachhaltigkeit spricht, fließen andere Aspekte in die Diskussion mit ein. Im Bereich des Bausektors sind drei Merkmale wesentlich, wenn man nachhaltige Gebäude errichten will: *Ressourcenschonung*, *Schutz der globalen und lokalen Umwelt* und die *Reduktion des Gesamtenergiebedarfs*.

Viele Ressourcen, die heute im Bauwesen verwendet werden, sind endlich und werden nicht immer zur Verfügung stehen. Daher ist es schon heute wichtig, den Einsatz nachwachsender Rohstoffe zu fördern und voranzutreiben. Zusätzlich ist es wichtig, nach Lösungen zu suchen, die einen massereduzierten Einsatz von Materialien möglich machen. Ein weiterer Aspekt, der unter das ressourcenschonende Bauen fällt, ist das kreislaufgerechte Bauen und das Recycling, um Abfälle zu vermeiden und das Material möglichst lange und oft zu verwenden. Dieses Prinzip wird unter dem Begriff „Cradle to Cradle“ vorangetrieben. Um dies überhaupt möglich zu machen, sollten Baumaterialien sortenrein und zerlegbar hergestellt werden (z.B. schrauben statt kleben). Nur so kann ein Rückbau und einer Wieder- oder Weiterverwendung gewährleistet werden.

Will man die globale und lokale Umwelt schonen, muss man die Treibhausgase, von denen 36% in der Atmosphäre in den letzten 10 Jahren auf den Bausektor zurückzuführen sind, reduzieren und den Energieverbrauch senken. Dabei ist es wichtig, die beiden Faktoren über den gesamten Lebenszyklus eines Materials oder Gebäudes zu betrachten, also von der Gewinnung, Herstellung, Instandhaltung bis hin zur Entsorgung. Um diese Ziele zu erreichen ist es wichtig darauf zu achten, dass Produkte regional bezogen und hergestellt werden und somit lange Transportwege vermieden werden. Baustoffe, deren Herstellung wenige Arbeitsschritte, keine Verbrennungs- oder Verdichtungsprozesse oder chemische Zusatzstoffe benötigen, fördern den Schutz der Umwelt. Denn diese Faktoren sind maßgeblich für die Entstehung der Treibhausgase und den hohen Energieaufwand bei der Produktion verantwortlich.

Ein weiterer Punkt des nachhaltigen Bauens bezieht sich auf die Reduzierung des Energieverbrauchs des Gebäudes im laufenden Betrieb. Spart man Energie und setzt auf erneuerbare Energien, schont man fossile und somit endliche Ressourcen.

7.4.2 Ökobeton

Ökobeton – was ist das denn?

Beton ist aus der heutigen Baubranche gar nicht mehr wegzudenken. Seit Jahrzehnten gilt er als der moderne Baustoff und viele Großprojekte werden in Beton verwirklicht. Dabei beginnt die Geschichte dieses Baustoffes schon vor rund 2.000 Jahren. Damals haben die Römer das „opus caementitium“ erfunden, was so viel wie „Werk aus Bruchsteinen“ bedeutet. Dieser setzte sich aus Bruchsteinen, gebranntem Kalk, Sand und Wasser zusammen und war noch wasserlöslich. Erst nachdem die Römer auf die Idee kamen, Vulkangestein zu ihrem Beton hinzuzugeben, hatten sie ein hydraulisches Bindemittel gefunden, das den Beton wasserfest machte. So konnte er nun auch für den Bau von Brücken, Wasserleitungen und Häfen verwendet werden. Die Römer sind auch für ihre Prunkbauten bekannt, bei denen sie Dank des „opus caementitium“ große Spannweiten verwirklichen konnten.

Im 5. Jahrhundert n. Chr. ging das Römische Reich unter und mit ihm geriet auch die Bauwerkskunst aus Beton in Vergessenheit. Erst die Erfindung des modernen Betons im 19. Jahrhundert führte zu einer Renaissance des Baustoffes Beton. Dieser unterscheidet sich durch das eingesetzte Bindemittel von dem alten römischen Beton. Anstatt des Vulkangesteins verwendet man seit dem Zement als Bindemittel, der aus Ton und Kalk gebrannt wird und den Beton viel schneller trocknen lässt (Grimm, 2014).

Beton besticht durch viele Vorteile: Eine hohe statische Festigkeit, Witterungsbeständigkeit sowie hervorragenden Brand- und Schallschutzeigenschaften. Auf der anderen Seite hat die Herstellung von Beton viele negative Auswirkungen auf Umwelt und Klima.

Bei den Bestandteilen von Beton handelt es sich zwar um natürliche Rohstoffe, diese stehen aber nicht in unendlicher Menge zu Verfügung. Zusätzlich benötigt der Prozess der Herstellung von Zement ungeheure Mengen an Energie, die hohe CO₂-Emissionen zur Folge haben. Trotzdem kann man den Beton nicht in allen Bereichen einfach durch andere Baustoffe ersetzen, da man oft für die gleiche Leistung viel mehr Material einsetzen müsste, sodass am Ende die negativen Einflüsse auf die Umwelt mindestens genauso hoch - wenn nicht sogar höher - wären.

Für Besserwisser: 5 mal C für nachhaltigen Beton

Der Europäische Zementverband Cembureau hat die sogenannten 5 C-Grundsätze aufgestellt, die dabei helfen sollen, Beton umweltverträglicher herzustellen:

Clinker – Reduktion fossiler Brennstoffe bei der Klinkerherstellung

Cement – Reduktion des Klinkergehalts im Zement

Concrete – Reduktion des Zementgehalts im Beton

Construction – Reduktion des Betonverbrauchs im Bauwerk

Carbonation – Erhöhung der Karbonatisierung

Clinker - Im ersten Punkt geht es im Wesentlichen darum, auf erneuerbare Energiequellen umzusteigen, die nicht endlich sind und weniger bis keine Schadstoffe freisetzen. Hierzu zählen Solarenergie, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Erdwärme.

Cement - Die Herstellung des Klinkers im Zement benötigt viel Energie. Daher sollte dieser Anteil verringert werden und durch alternative Betonzusatzstoffe, wie beispielsweise Flugasche, Hüttensande oder Kalksteinmehl, ersetzt werden.

Concrete - Aber auch der Zementanteil im gesamten sollte möglichst geringgehalten werden und durch alternative Bindemittel ausgetauscht werden. Hierzu wird momentan der Einsatz von Feinfüllern und Fließmitteln erforscht.

Construction - Zusätzlich ist es wichtig, den Betonverbrauch im Gesamten zu reduzieren. Bei Bauprojekten sollte immer der Einsatz des Betons hinterfragt werden und nur dort, wo er unabdingbar ist, auch verwendet werden.

Carbonation - Der letzte Ansatz besteht darin, die Karbonatisierung von Beton zu erhöhen. Dies erhöht zum einen die Druckfestigkeit und bindet gleichzeitig CO₂-Emissionen (Anon., 2022).

Betone, die diese Ansätze verfolgen, werden Ökobetone genannt.



Abbildung 85: Ausstellungsbereich Ökobeton

7.4.3 Holz

Ein Klassiker: Bauen mit Holz

Holz gehört zu den ältesten Baustoffen, die die Menschheit kennt. Der Baustoff fiel durch das Roden von Ackerflächen an und eignete sich durch seine Leichtigkeit, Formgebung und einfache Bearbeitung ideal als Baumaterial. Aus einfachen Hütten entwickelten sich mit der Zeit Block- und Pfostenbauten und im Mittelalter revolutionierten die Fachwerkhäuser den Holzbau. Dieser besticht durch seine detaillierte Konstruktionsbauweise, die in weiten Teilen ablesbar bleibt.

Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wird der Holzbau durch Mauerwerksbauten ersetzt. Nun werden Gebäude in erster Linie aus Stahl und Beton hergestellt, da diese in Massenproduktion hergestellt werden konnten.

Durch die aufkommenden Diskussionen rund um Themen der Nachhaltigkeit und Klimaschutz gewinnt Holz als Baustoff seit der Jahrtausendwende wieder zunehmend an Bedeutung. Seine ökologischen Vorteile, die Entwicklung moderner Technologien und Konstruktionsmethoden führen dazu, dass Holz immer öfter in Gebäuden verbaut wird.

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, die Herstellung von Holzprodukten verursacht nur geringe CO₂-Emissionen und Holz speichert während seiner Wachstumsphase CO₂. Darüber hinaus handelt es sich bei Holz um einen heimischen Baustoff, dessen Verwendung die regionale Wertschöpfung erhöht und für kurze Transportwege sorgt. Dies sind nur einige der vielen positiven Eigenschaften, die Holz in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung in der Bauindustrie gewinnen lassen haben.

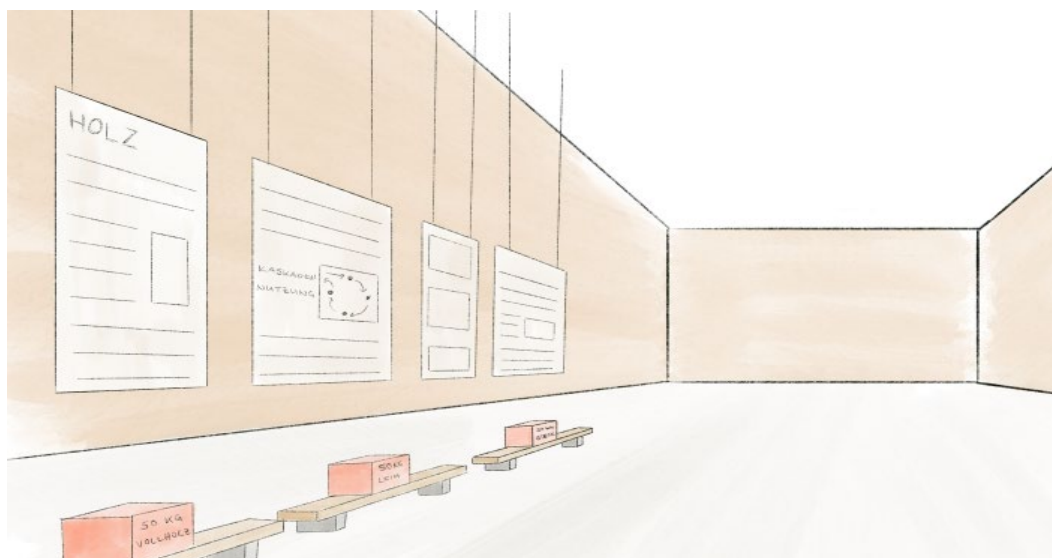


Abbildung 86: Ausstellungsbereich Holz

Bauen mit Holz – auch nicht alles rosarot....

Die hohe Nachfrage an Holz hat aber auch ihre Schattenseite. Bereits heute gibt es nicht genug Holzvorräte, um den Bedarf zu decken, und Deutschland verbraucht doppelt so viel Holz wie der weltweite Durchschnitt. 2020 wurden etwa 5 Milliarden Kubikmeter Holz geschlagen. Diese Menge ist weitaus größer als das, was aus nachhaltigen Forstbeständen entnommen werden kann, ohne dabei die Biodiversität in den Wäldern zu gefährden. Etwa 2 Milliarden Kubikmeter Holz werden in den Wäldern im Jahr zu viel abgeholzt, was der Hälfte aller Waldbestände in Deutschland entspricht.

Es gibt weltweit also zu wenig Holz, um alle Bedürfnisse zu erfüllen. Daher ist es wichtig, über eine sinnvolle und langfristige Verwendung von Holz nachzudenken. Ein erster Schritt wäre die Abwendung der Nutzung von Holz als Energielieferant. Durch die thermische Verwertung kann der Rohstoff nur einmalig genutzt werden und das gespeicherte CO₂ wird im Zuge der Verbrennung freigesetzt. Zusätzlich ist es wichtig, Holz kreislaufgerecht und kaskadenartig zu nutzen. Das bedeutet, dass der Rohstoff so lange, so häufig und so effizient genutzt werden soll, wie es nur geht, anstatt ihn direkt nach dem ersten Einsatz thermisch zu verwerten (Klotz, 2022).

Um diese Kaskadennutzung überhaupt möglich zu machen, ist es wichtig, den Rohstoff Holz sortenrein zu verwenden. Dies bedeutet, dass Konstruktionen wieder lösbar sein sollen und verschiedene Materialien nur dann in einem Produkt kombiniert werden, wenn man sie wieder komplett voneinander trennen kann.

Zu Beginn der Geschichte des Holzbaus haben die Menschen einfach Vollholz verwendet, um Gebäude zu errichten. Irgendwann reichte diese Konstruktionsart aber nicht mehr aus, um den Anforderungen gerecht zu werden. Beispielsweise sollten weitere Spannweiten erreicht werden, dafür wurden Holzbretter zu Holzbindern miteinander verleimt, die gegenüber dem Vollholz höhere statische Ansprüche erfüllen, aber natürlich nicht mehr sortenrein getrennt werden können. Ganz abgesehen davon, dass in dem Leim meist umweltschädliche chemische Stoffe enthalten sind und die Herstellung einen hohen Energieverbrauch aufweist.

Das Freilichtmuseum hat sich daher gegen die klassische Verwendung von verleimten Holzbindern oder Holz-Stahl-Konstruktionen entschieden. Die Stapelholzträger in diesem Gebäude sind leimfrei und einstofflich. Die Verbindung der einzelnen Bretter erfolgt besondere Holzverbindungen.

Die Stapelholzträger im Freilichtmuseum können die gleiche Funktion wie herkömmliche Holzbinder übernehmen, sind dabei aber sortenrein und zerlegbar und einer Kaskadennutzung steht nichts im Weg.

7.4.4 Lehm

Der ewige Allrounder Lehm

Lehmbauten begleiten die Geschichte der Menschheit seit ihren frühen Anfängen und heute lebt ein Drittel der Bevölkerung in Lehmbauten. Meistens findet man Lehmhäuser in heiß-trockenen bis gemäßigten Klimazonen, da dieser hier einfach der Erde entnommen und als Baumaterial verwendet werden kann und Lehm darüber hinaus einen hervorragenden Schutz vor Hitze bietet und Innenräume kühl hält.

In Europa diente Lehm lange Zeit nur als Füllmaterial, beispielsweise in Flechtwänden in Fachwerkbauten, und wurde nicht als konstruktiver und lastabtragender Baustoff eingesetzt. Seit dem Mittelalter wusste man zusätzlich um die guten Feuerschutzeigenschaften von Lehm und setzte ihn als Putz an Fassaden ein oder schützte Strohdächer vor der Brandgefahr. Im 18. Jahrhundert fand dann der Einzug des Massivbaus mit Lehm statt und wurde im Wesentlichen über Westdeutschland aus verbreitet.

Aber ebenso wie das Holz wurde auch der Lehmbau durch die Industrialisierung verdrängt und nur noch als Bauten armer Leute in Entwicklungsländern angesehen. Doch auch hier haben die Diskussionen um das Thema Nachhaltigkeit im Bausektor Lehm wieder in den Fokus rücken lassen. Neben Aspekten einer positiven Ökobilanz wirkt sich Lehm darüber hinaus auch noch positiv auf das Raumklima und somit das Wohlbefinden der Menschen aus. Und gerade in einer Gesellschaft, in der die Gesundheit oberste Priorität hat, ist diese Eigenschaft des Lehms ein großer Faktor, der ihn in der Baukultur hat wiederaufleben lassen.

Lehm ist in vielen Teilen der Erde Bestandteil des Bodens und somit ein regionaler Baustoff, der ohne großen Aufwand gewonnen werden kann. Er entsteht durch die Verwitterung von Ton, Schluff, Sand und Kies, wobei die Mineralschichten im Ton als Bindemittel dienen. Abhängig von den Anteilen der einzelnen Bestandteile weist der Lehm unterschiedliche Eigenschaften auf und kann für verschiedenen Zwecke eingesetzt werden. Ein hoher Tongehalt ermöglicht beispielsweise die Herstellung von Lehmsteinen oder einer Stampflehmwand. Ist der Tongehalt gering, wird der Lehm für Putze verwendet.

Lehm punktet bauphysikalisch

Grundsätzlich gibt es zwei Methoden, in denen Lehm angewendet wird: im Nass- und Trockenverfahren. Zu erstem zählen die Errichtung von Stampflehmwänden und das Aufbringen von Lehmputz. Im Trockenverfahren kommt Lehm in Form von Steinen oder Platten zum Einsatz (Schönburg, 2017).

Eine weitere überaus positive Eigenschaft des Lehms ist seine Fähigkeit, Feuchte zu speichern und in Räumen zu regulieren. Dies wirkt sich wie bereits erwähnt, positiv auf das Raumklima aus. Im Trocknungsprozess oder bei Brennvorgängen des Lehms wird das enthaltene Wasser ausgetrieben und zurück bleiben kleine Poren. Diese können Feuchtigkeit speichern, ohne sie aufzunehmen und im Lehm zu binden. Bei zu niedriger Luftfeuchte im Raum gibt der Lehm diese dann wieder frei und schafft eine angenehme Atmosphäre. Darüber hinaus ist Lehm ein ausgezeichneter Wärmespeicher und sorgt dadurch für ein angenehmes und vor allem gleichmäßiges Raumklima, in denen Temperaturschwankungen geringer ausfallen als bei herkömmlichen Baustoffen. Im Sommer bleibt es in Räumen mit Lehmanteil länger kühl, da die Wärme gespeichert und zeitversetzt, also in der kühleren Nacht, wieder abgegeben wird. Im Winter wird die Wärme des Tages in den Wänden gespeichert und abends bzw. nachts an die Umgebung abgegeben.

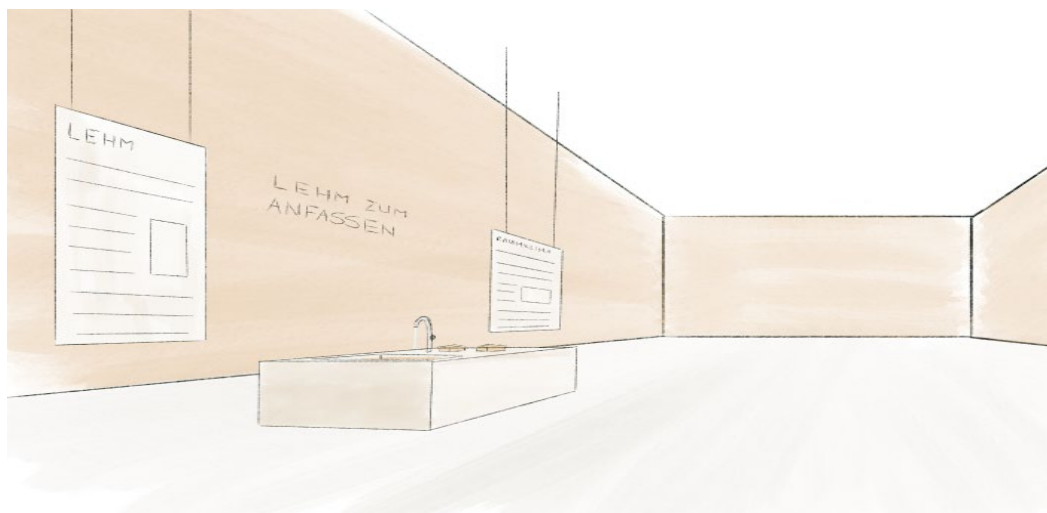


Abbildung 87: Ausstellungsbereich Lehm

Alt und immer wieder neu – Kreislaufgerechter Lehm

Unter der Betrachtung von Nachhaltigkeit weist Lehm positive Eigenschaften auf. Durch die regionale Verfügbarkeit entfallen lange Transportwege, die oft für hohe CO₂-Emissionen verantwortlich sind. Auch sind der Abbau und die Verarbeitung ohne großen Aufwand möglich und wirken sich nicht negativ auf die Umwelt aus. Sollten Lehmteile nach einer gewissen Zeit ausgetauscht oder rückgebaut werden, lassen sich diese sortenrein auseinandernehmen und recyceln und es fällt kein Abfall an. Somit lässt sich Lehm problemlos nach dem Prinzip Cradle to Cradle verwenden. Die natürliche Zusammensetzung von Lehm macht es möglich, diesen wieder in seinen Ursprungszustand zu versetzen und entweder neu zu verarbeiten oder aber der Erde zurückzugeben. Es fällt also kein Abfall an.

Anders sieht es bei den meisten Baustoffen aus, die man heutzutage verwendet, auch wenn man hier auf dem Weg ist, sie möglichst lange wieder- und weiterzunutzen. Dies wird am Beispiel von Beton sichtbar: nach heutigem Forschungsstand ist es nicht möglich Beton, wieder so aufzubereiten, dass man ihn eins zu eins in derselben Qualität beispielsweise wieder als Decke verwenden kann. Also wird er zerkleinert und nur in Teilen als Zuschlag einem neuen Betongemisch zugegeben. Hat dieser dann auch ausgedient, wird er zu Schotter verarbeitet und im Straßenbau eingesetzt. Es findet also ein Downcycling statt, weil die Qualität des Betons immer weiter abnimmt. Und wenn die Straße dann irgendwann auch erneuert werden muss, landet diese auf dem Müll. Es ist also kein C2C-Prinzip, sondern vielmehr ein „Cradle to Grave“, also von der Wiege bis ins Grab, auch wenn man bemüht ist, den Baustoff so lange es geht zu nutzen. Im Gegensatz dazu kann man Lehm tatsächlich unendlich oft neu und wiedernutzen oder seinem Ursprung zurückgeben, sollte er gerade nicht benötigt werden.

7.4.5 Stroh

Stroh – eine regionale Renaissance

Die Geschichte des Bauens mit Stroh beginnt Ende des 19. Jahrhunderts, als die Strohballenpresse erfunden wurde. In Nebraska, einer Gegend die von Getreidefeldern und wenig Holz geprägt ist, wurden die ersten Strohballenhäuser errichtet, von denen manche noch heute erhalten sind (FNR, 2023). Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurden Strohballen in Nordamerika als lastabtragende Mauersteine verwendet, die direkt mit Lehm oder Zement verputzt wurden. Dann jedoch geriet der Strohballenbau in Vergessenheit und wurde erst wieder durch einen Artikel aus dem Jahre 1973 in das Bewusstsein der Menschen gerufen. Zunächst stiegen die Bauten aus Stroh in Nordamerika und Kanada stark an und verbreiteten sich dann aber auch in anderen Gebieten der Erde. In Deutschland fasst der Strohballenbau Anfang der 2000er Fuß, als der Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. gegründet wird. Dieser setzt sich für die Verbreitung und Anerkennung des Strohballenbaus ein. 2020 schätzt der Verein die Zahl der strohgedämmten Gebäude in Deutschland auf 900-1500 (FNR, 2023).

Die trockenen Halme von gedroschenem Getreide nennt man Stroh. Dieses fällt als Nebenprodukt in der Landwirtschaft an. Auf deutschen Äckern fällt so viel Stroh an, dass man damit hunderttausende Gebäude dämmen könnte. Ohne Herstellungs- oder Energieaufwand kann das Produkt regional abgebaut und eingesetzt werden und stellt dadurch keine negative Belastung für die Umwelt dar (FNR, 2023).

Grundsätzlich lässt sich der Bau mit Strohballen in zwei Konstruktionsarten unterteilen. Zum einen kann man die Strohballen, so wie ursprünglich in Nebraska, als lastabtragende Elemente zu einer Wand zusammensetzen. In Deutschland gibt es hierfür aber noch keine allgemeinen Regeln, sodass die Konstruktion immer einzeln geprüft und genehmigt werden muss. Auf der anderen Seite werden Strohballen als nicht druckbelastete Ausfachung und Dämmung, meist in Kombination mit einer Holzständerkonstruktion, eingesetzt. Diese Bauweise ist bauaufsichtlich zugelassen, da die Tauglichkeit von Stroh als Wärmedämmung nachgewiesen werden konnte.

Bauen mit Stroh ist besonders nachhaltig, da es sich um einen schnell nachwachsenden Rohstoff handelt, der als Abfallprodukt in der Landwirtschaft anfällt. Herstellung, Verarbeitung und Instandhaltung haben darüber hinaus keine negativen Einflüsse auf die Umwelt. Vielmehr bindet das Stroh CO₂ und speichert dieses, so wie man es auch von Holz kennt.

Im Vergleich zu einem herkömmlichen Massivbau benötigt die Herstellung eines strohgedämmten Gebäudes nur etwa die Hälfte an Primärenergie, so nennt man den global durch den Bau verschuldeten Gesamtenergiebedarf. Die Menge an Primärenergie, die ein klassischer Massivbau mehr verbraucht als einer aus Stroh, reicht aus, um das strohgedämmte Gebäude für 69 Jahre mit Wärme zu versorgen. Zusätzlich beträgt die Differenz für das Treibhauspotenzial zwischen den beiden Bauweisen 97t CO₂-Äquivalent. Das entspricht einer Menge an CO₂, die ein 5-Liter-



Abbildung 88: Ausstellungsbereich Stroh

Literaturverzeichnis

- Conluto - Vielfalt aus Lehm. *Produktmerkblatt 02.005 - 02.006 - Stampflehm grob 0-22 mm*.
DIN EN ISO 10534-1:2001-10. *Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis*. Beuth.
- DIN EN ISO 11654:1997-07. *Akustik - Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung der Schallabsorption*. Beuth.
- DIN EN ISO 354:2003-12. *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen* (Norm). Beuth.
- Fasold, W. & Veres, E. (2003). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen* (2. Aufl.). Huss-Medien, Verl. Bauwesen. http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage2/2018/06/16/file_353/7937792.pdf
- Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen. *Masea Datenbank: Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung*. <https://www.masea-ensan.de/>
- Fuchs, H. (2010). *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01413-0>
- Gathof, A., Günnewig, D., Hansel, C., Lippe, H., Mittelstädt, J., Rauch, M. & Reeh, U. (2022). *Entwicklung eines Konzepts zur ressourcen- und naturschutzgerechten Konstruktion von Lehmlärmschutz: Naturschutz hochklappen - innovativer Lärmschutz als vertikale Ausgleichsmaßnahme*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-35556_01-Hauptbericht.pdf
- ISO 9613-1:1993-06. *Acoustics - Calculation of the absorption of Acoustics - Calculation of the Absorption of sound by the atmosphere*.
- Leimer, H.-P. & Bode, J. (2001). Klimastabilität in Museen - Bauphysikalische Betrachtungen zum Klimakzept am Beispiel des Herzog- Anton-Ulrich-Museums in Braunschweig / Stability of climate in museums - considerations on a concept for climate in museums based on building physics and elaborated for the Herzog-Anton-Ulrich-Museum in Braunschweig as an example. *Restoration of Buildings and Monuments*, 7. <https://doi.org/10.1515/rbm-2001-5538>
- Minke, G. (2021). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture* (Fourth and revised edition). Birkhäuser. <https://www.degruyter.com/books/9783035622539>; <https://d-nb.info/1234482754/04>
- Randazzo, L., Montana, G., Hein, A., Castiglia, A., Rodonò, G. & Donato, D. I. (2016). Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics. *Applied Clay Science*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.021>
- Volhard, F. & Röhlen, U. (2009). *Lehmbau-Regeln: Begriffe - Baustoffe - Bauteile* (3., überarb. Aufl.). Praxis. Vieweg + Teubner. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2974535&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm; http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2009/12/16/file_10/3379309.pdf
- Wigger, H. & Schmidtman, I.-M. (März 2023). *Abschlussbericht Bauphysikalische Eigenschaften*.