

Was Lehm im Gebäude leistet – Ergebnisse der Begleitforschung ECOsights

Susanne Schwickert
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe |
Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau
iFE - Institut für Energieforschung

Freilichtmuseum als Vorbild

Historische, traditionsbehaftete regionale Bauweisen

Regionale, nachwachsende Rohstoffquellen liegen als natürlicher, nahezu „fertiger Baustoff“ vor und werden relativ einfach, handwerklich und ressourcenarm aufbereitet

Massenproduktionen mit Einzug der Industrialisierung

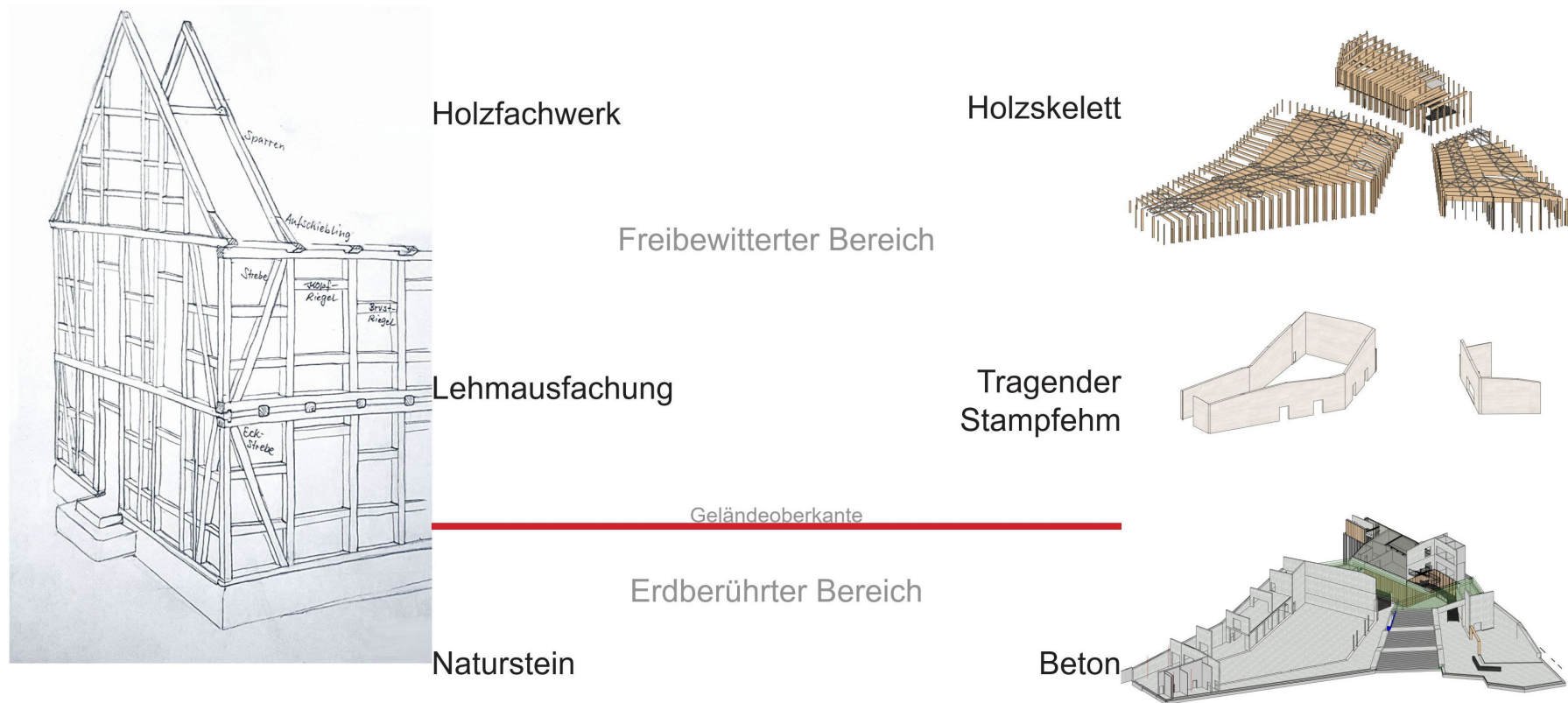
Überregional werden künstliche Baustoffe in Serien für eine stetig wachsende Bauindustrie erzeugt, mit großen Belastungen für Klima und Umwelt

Erst mit Aufkommen eines Bewusstseins für Klima- und Umweltthemen, scheint eine zögerliche Rückkehr „historischer“ Baustoffe im kontemporären Bauen stattzufinden

Foto: LWL Freilichtmuseum Detmold

IDEE DES HAUSES: BAUSTOFFLICHES KONZEPT

- Bildung eines massiven, widerstandsfähigen Sockels / Speichers
- Aufsatz einer suffizienten Tragstruktur aus regional verfügbaren, biotischen Stoffen



Gliederung

- 01 Kennwerte des Lehms
- 02 Raumklima mit Erdbreichkontakt
- 03 Raumklima mit Lehm
- 04 Raumakustik mit Lehm
- 05 Einzelaspekte der Ökobilanz eines Gebäudes
- 06 Erkenntnisse aus der Begleitforschung

01

KENNWERTE DES LEHMS

ERMITTLUNG VON MATERIALKENNWERTEN FÜR STAMPFLEHM

- Untersuchung an kleinformatischen Prüfkörpern anhand der Fertigmischung Stampflehm Grob der Firma Conluto in zwei Chargen (durchgeführt an der Jade Hochschule Oldenburg).
- Vergleich mit Vorgaben aus Regelwerken
- gemittelt **Endschwindmaß** der beiden Chargen 1,14% und 1,11 % liegt in den allgemeinen Vorgaben der Lehmbauregeln ($\leq 2\%$): damit eingehalten
- Vorgaben für Sichtbauteile ($< 0,5\%$) nicht eingehalten

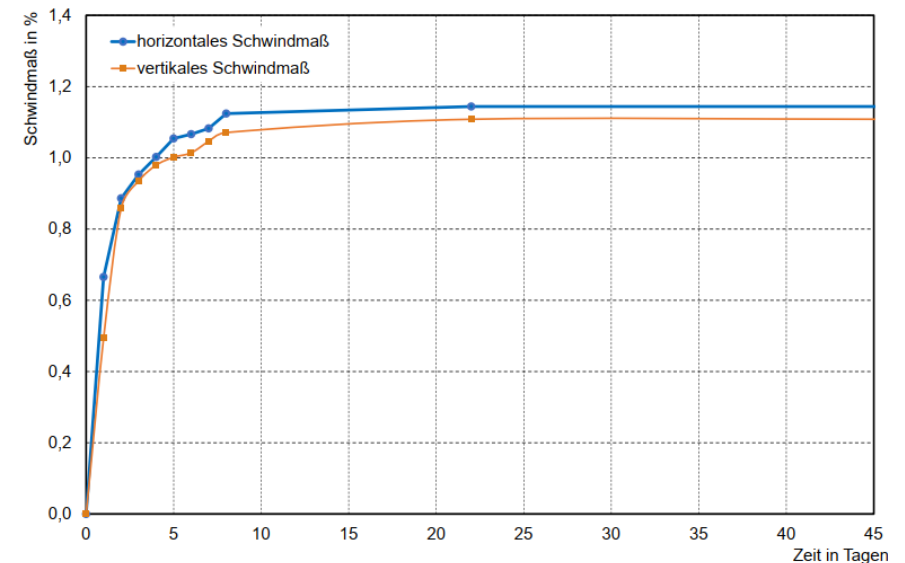


Bild 3: Schwindverlauf an Würfeln (200 x 200 x 200 mm³)

ERMITTLUNG VON MATERIALKENNWERTEN FÜR STAMPFLEHM

- Untersuchung an kleinformatischen Prüfkörpern anhand der Fertigmischung Stampflehm Grob der Firma Conluto in zwei Chargen (durchgeführt an der Jade Hochschule Oldenburg).
- Vergleich mit Vorgaben aus Regelwerken
- **Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen** ($\mu = 9$ und $13,3$) der Stampflehmchargen z.T. im Bereich der in den Lehmbauregeln angegebenen Richtwerte (5 bis 10)

Tabelle 3: Vergleichswerte der Rohdichten und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) für Stampflehmchargen F und A mit den Richtwerten aus den Lehmbau Regeln [L 1]

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

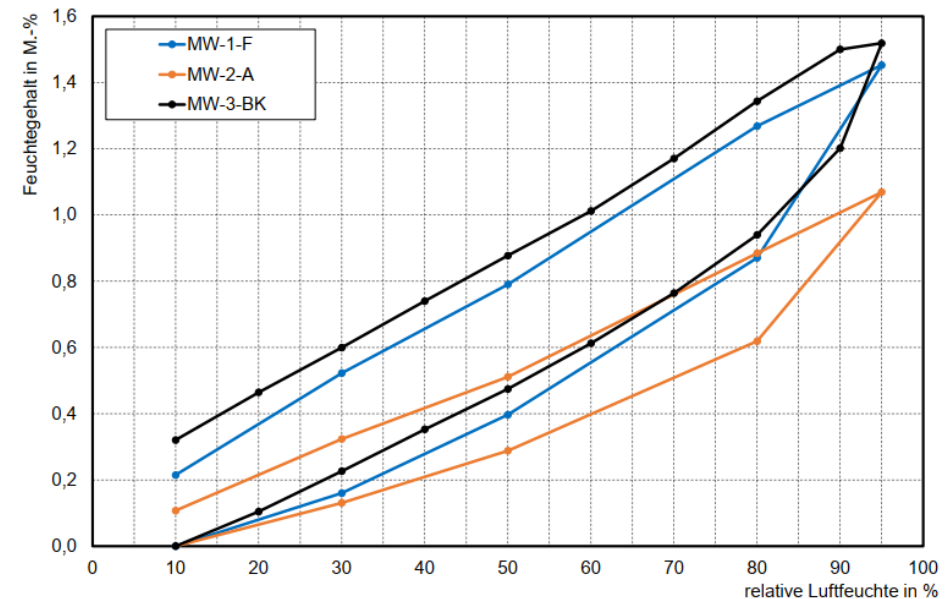


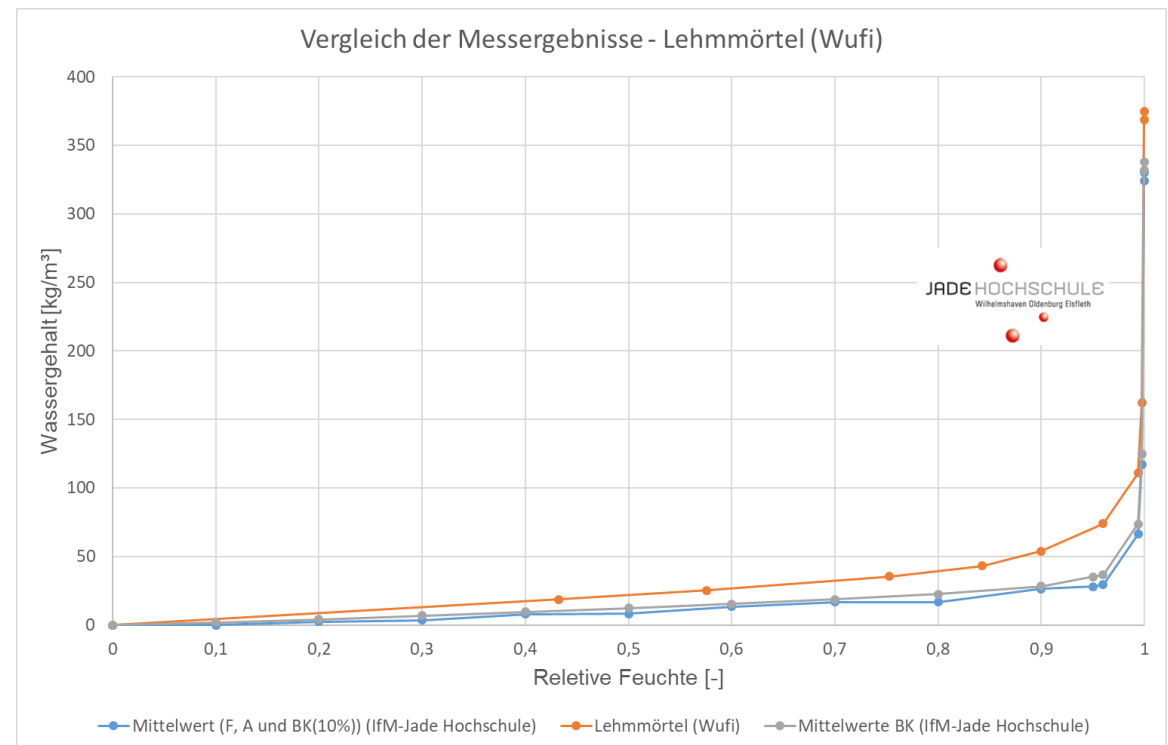
Bild 4: Mittlere Feuchtegehalte der Versuchsreihen 1-F, 2-A und 3-BK in der Sorptionsuntersuchung bezogen auf 10 % relativer Luftfeuchte

ERMITTLUNG VON MATERIALKENNWERTEN FÜR STAMPFLEHM

- Untersuchung an kleinformatischen Prüfkörpern anhand der Fertigmischung Stampflehm Grob der Firma Conluto in zwei Chargen (durchgeführt an der Jade Hochschule Oldenburg).
- Vergleich mit Vorgaben aus Regelwerken
- **Sorptionsisotherme** liegt unterhalb der bislang bekannten Werten (Software Wufi für Lehm/Lehmputz und TUM)

Im Vergleich durchgängig den niedrigsten Verlauf des Wassergehaltes

Grund: Variabilität der Art und des Anteils der enthaltenden Tonminerale

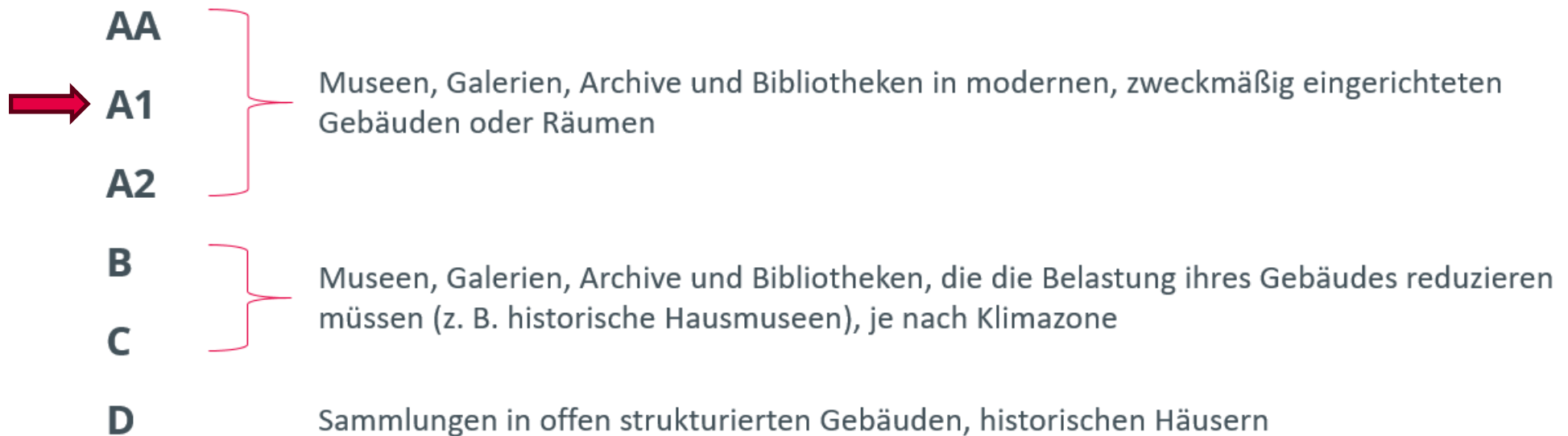


02

RAUMKLIMA

MIT ERDREICHKONTAKT

KATEGORIEN FÜR DAS RAUMKLIMA IN MUSEEN, GALERIEN, ARCHIVEN UND BIBLIOTHEKEN DER ASHRAE



American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

ANFORDERUNGEN FÜR DAS RAUMKLIMA IN MUSEEN, GALERIEN, ARCHIVEN UND BIBLIOTHEKEN DER ASHRAE KAT. A1

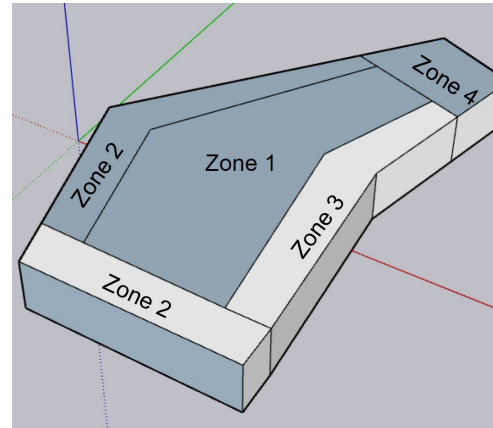
- Langzeit-Schwankungen (1 Jahr)
 - rel. Luftfeuchte: $\geq 35 \% \text{ rel.F.}$, $\leq 65 \% \text{ rel.F.}$
 - Temperatur: 10 bis 25°C
- Saisonale Schwankungen (Temp. 7 d; rel.F 30 d)
 - rel. Luftfeuchte: $\pm 10 \% \text{ rel.F.}$
 - Temperatur: +5 K, - 10 K
- Kurzzeit-Schwankungen (kürzer als saisonale Schwankungen: Temperatur weniger als 7 d; rel. Luftfeuchte weniger als 30 d))
 - rel. Luftfeuchte: $\pm 5 \% \text{ rel.F.}$
 - Temperatur: $\pm 2 \text{ K}$

Maßgebliche Gebäudeparameter für Schwankungen:

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

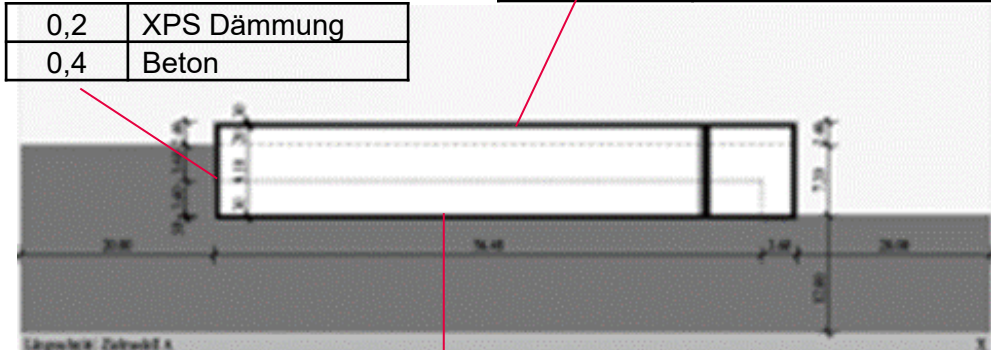
POTENZIAL DER ERDMASSE FÜR TEMPERATURSTABILITÄT

- hervorragender Wärmeschutz und große Masse Voraussetzungen für klimastabile Gebäude
- Größe, Kompaktheit sowie Hanglage ideal
- Untersuchung der raumklimastabilisierenden Wirkung des Erdreichs sollten theoretisch wie messtechnisch erfolgen



0,2	XPS Dämmung
0,4	Beton

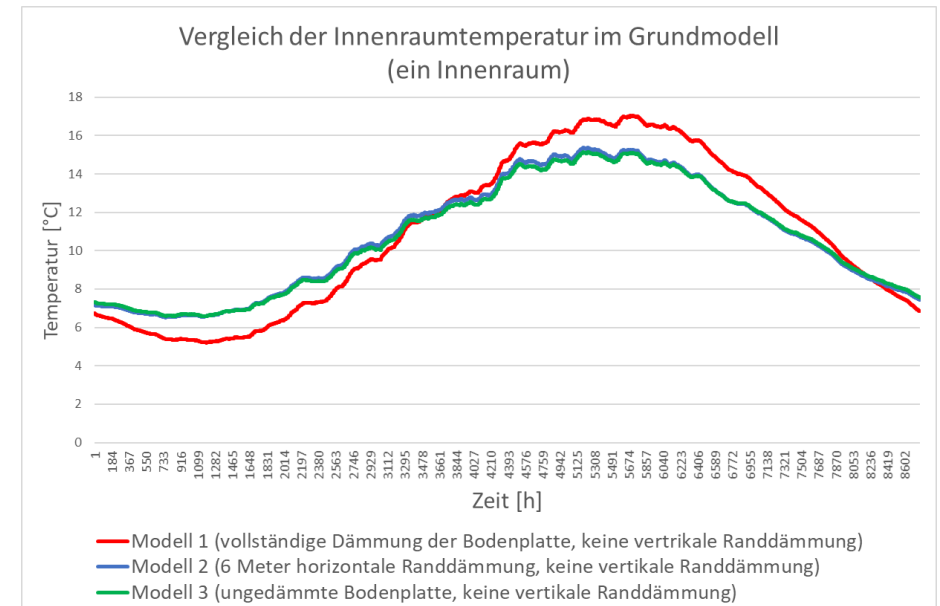
0,08	Brettstapelholz
0,24	Holzfaserdämmung WLS 040
0,02	DHF Platte



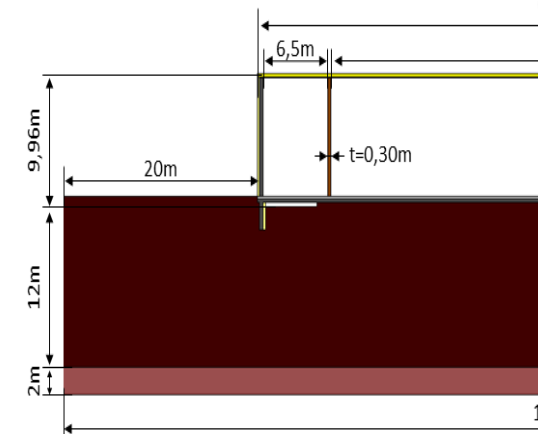
0,18	Estrichbeton
0,05	EPS-Platte WLG 035
0,25	Beton
0,28	Schaumglas-schotter

WAS PASSIERT BEI WELCHER DÄMMVARIANTE?

- Ungedämmte Bodenplatte **GRÜN**
- 6m breite Horizontaldämmung **BLAU**
- Vollflächig gedämmte Bodenplatte **ROT**
 - Jeweils mit/ohne 2m Vertikaldämmung
- Ohne Beheizung und **ohne** Besucherverkehr

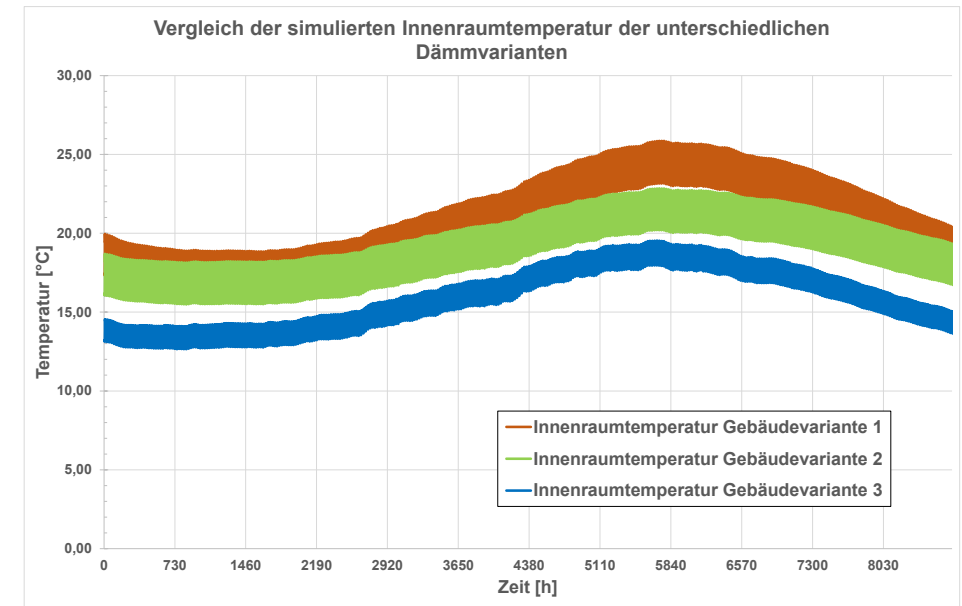


1. Platz: Mit ungedämmter Bodenplatte sind Schwankungen am geringsten,
 2. Platz: etwas mehr bei Randdämmung,
 3. Platz: vollflächig gedämmt große Schwankungen
- Vertikale Dämmung stabilisiert zusätzlich etwas



WAS PASSIERT BEI WELCHER DÄMMVARIANTE?

- Ungedämmte Bodenplatte **BLAU**
- 6m breite Horizontaldämmung **GRÜN**
- Vollflächig gedämmte Bodenplatte **ROT**
 - Jeweils mit/ohne 2m Vertikaldämmung
- Ohne Beheizung und **mit** Besucherverkehr



- Vollflächige Bodenplattendämmung am wenigsten stabil,
- mit horizontaler Randdämmung und ohne Bodenplattendämmung deutlich stabileres Klima,
- mit horizontaler Randdämmung durchgängig wärmer,
- mit zusätzlich vertikaler Randdämmung alles etwas ausgeglichener

ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE

Grundvoraussetzungen:

- hohes Maß an Kompaktheit,
- Erdkontakt **mit vorzugsweise im Randbereich gedämmten erdberührten Bauteilen**,
- hohes wärmeschutztechnisches Niveau der Gebäudehülle gegen Außenluft,
- nordorientierte Verglasungsflächen,
- Innenbauteile in sehr schwerer Bauweise sowie
- Vorschalten einer voluminösen Pufferzone

im Museumsbetrieb im normalen Modus (d.h. ohne nennenswerten Besucherspitzenzeiten)



Einhaltung der **ASHRAE Kategorie A1** (Kurz- und Langzeitschwankungen)
bei sich frei einstellenden Innentemperaturen **vollends erfüllt** ohne
jegliche Art von Beheizung oder Kühlung und bei Lüftung mit
unkonditionierter Außenluft

UMPLANUNG DURCH DIE BAUHERRSCHAFT

- Entscheidung für Flächenheizung im Fußbodenaufbau statt Wandtemperierung
- Empfehlung hinfällig, die Bodenfläche eher wenig oder ungedämmt zu belassen
- Strategiewechsel: **jetzt unbedingt Wärmedämmung unterhalb der Fußbodenheizung!**
- Messung entfällt...

03

RAUMKLIMA

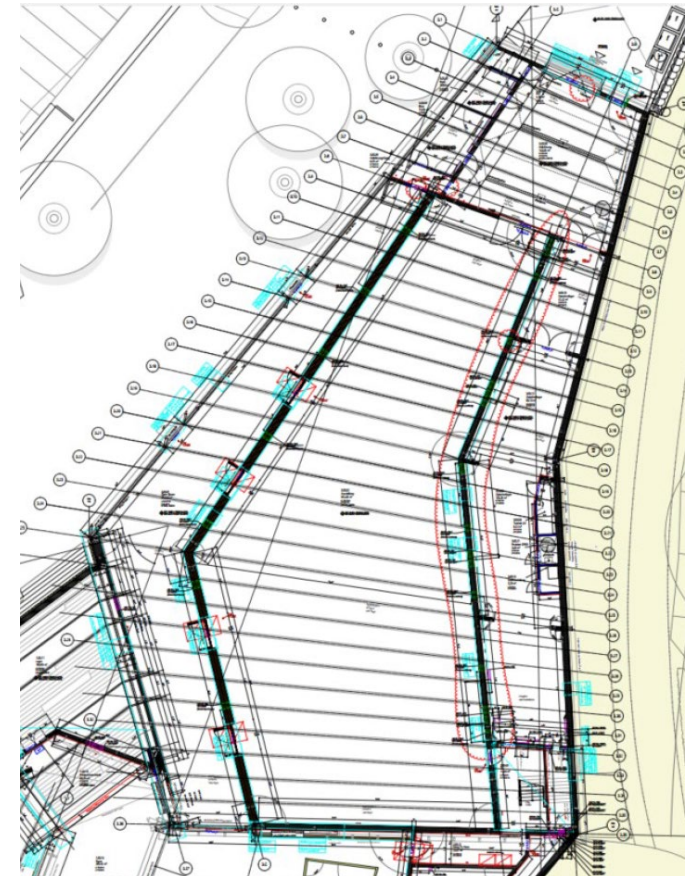
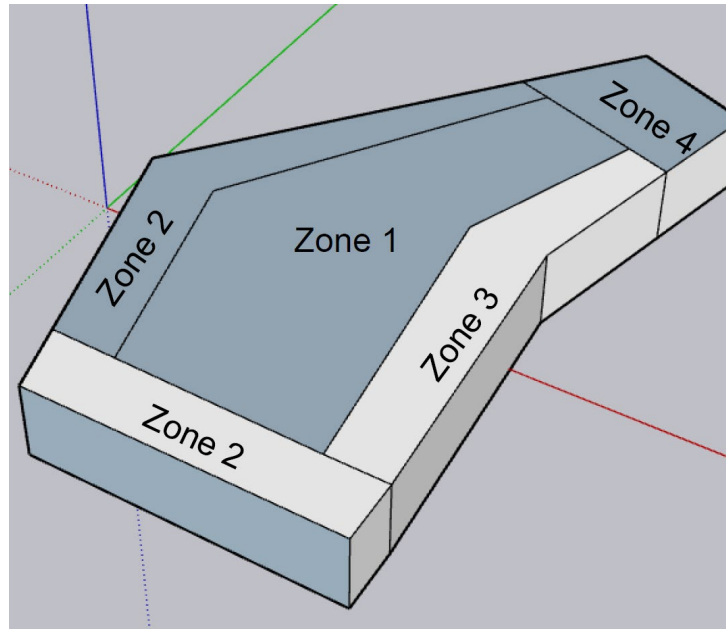
MIT LEHM

SENSITIVITÄTSANALYSEN MITTELS RAUMKLIMASIMULATION

Grundlagenermittlung zu

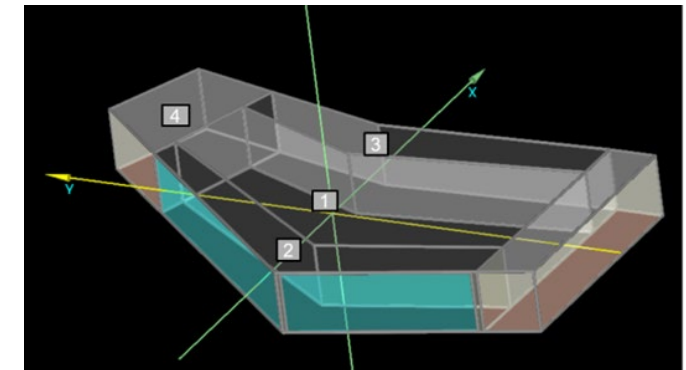
- Baumaterialien (Beton, Holz, Lehm) im Innenausbau und als Tragelemente
- Stärken der Stampflehmwand
- Einsatzgrad feuchtepuffernder Materialien
- Besucherzahlen, Luftwechselraten, Zonierung

Modellbildung



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:	• Ausstellungsraum • Open Space • Anlieferung • Lager
Lüftung	Ganzes Jahr, 0,05 1/h
Anfangsbedingung	20 °C, 50 %
Anlagentechnik	Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten (ideale HLK)



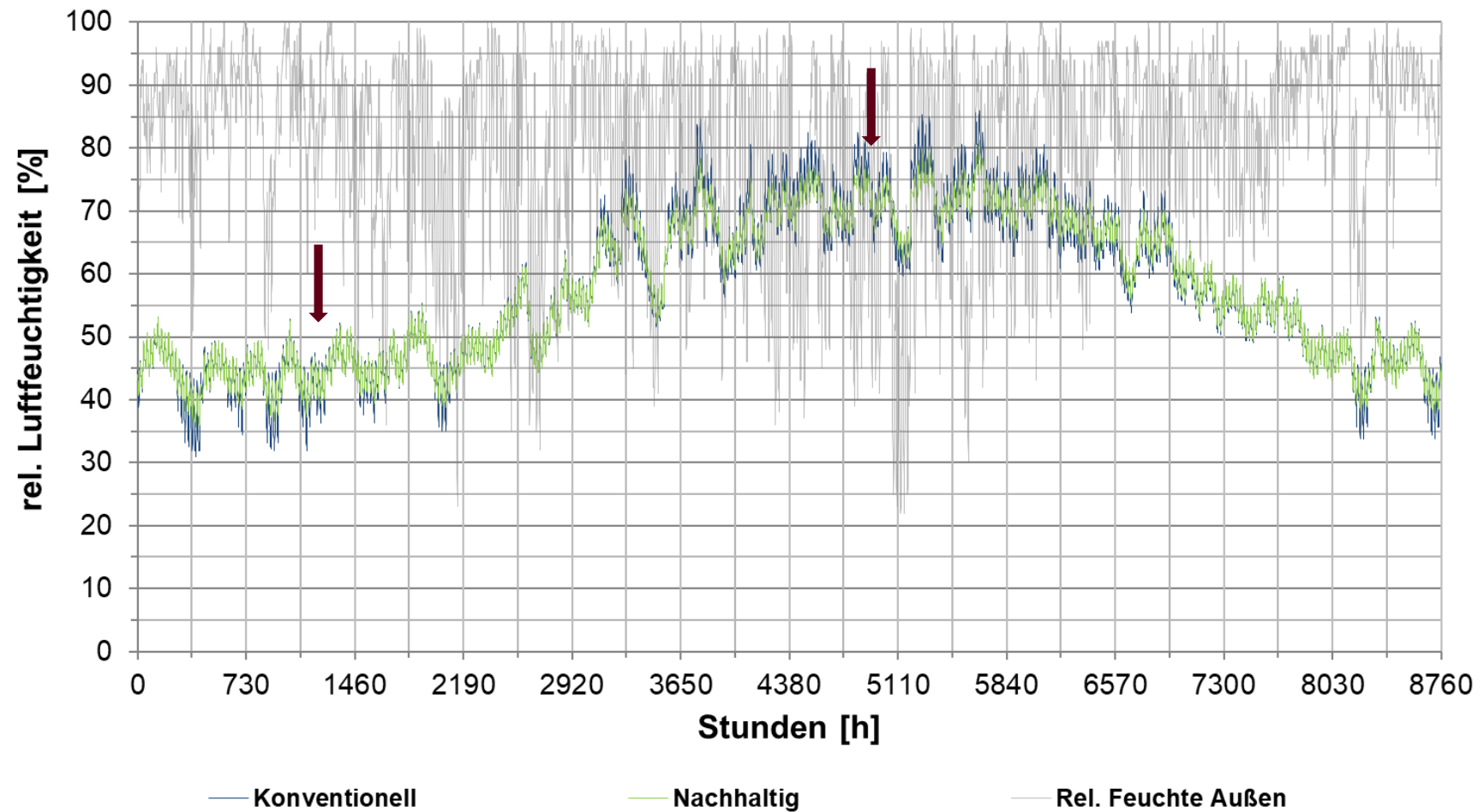
- 1 Ausstellungsraum
- 2 Open-Space
- 3 Zwischenlager/Depot
- 4 Anlieferung

GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUTEILAUFBAUTEN DER RAUMUMFASSUNGSFLÄCHEN (AUßEN – INNEN)

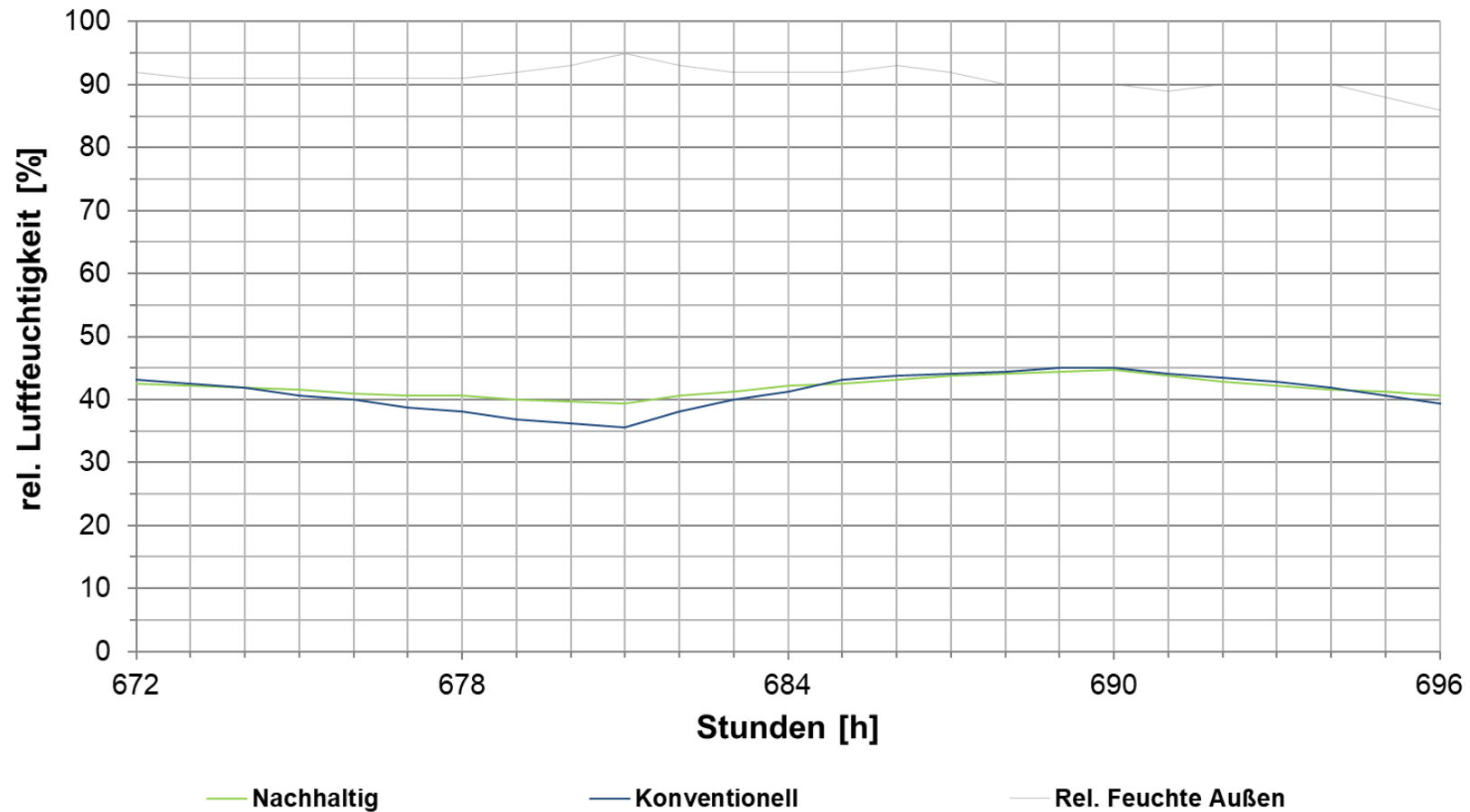
Nachhaltig/Aktuelle Planung FLM	Konventionelle Bauweise
Dach: • Abdichtung • Dämmung WLG 040 – 24 cm • Dampfsperre • Brettstapelholzdecke – 12 cm	Dach: • Abdichtung • Dämmung XPS WLG 040 – 32 cm • Stahlbetondecke – 25 cm
Tragende Innenwand: • Stampflehm – 60 cm	Tragende Innenwand: • Stahlbeton in Sicht Qualität – 35 cm
Nicht tragende Innenwand: • Lehmputz – 3 cm • Stahlbeton – 30 cm • Lehmputz – 3 cm	Nicht tragende Innenwand: • Stahlbeton in Sicht Qualität – 35 cm
Bodenaufbau: • Schaumglas WLG 040 – 28 cm • Stahlbeton – 25 cm • Trittschalldämmung WLG 035 – 5 cm • Estrich – 18 cm	

LUFTFEUCHTE

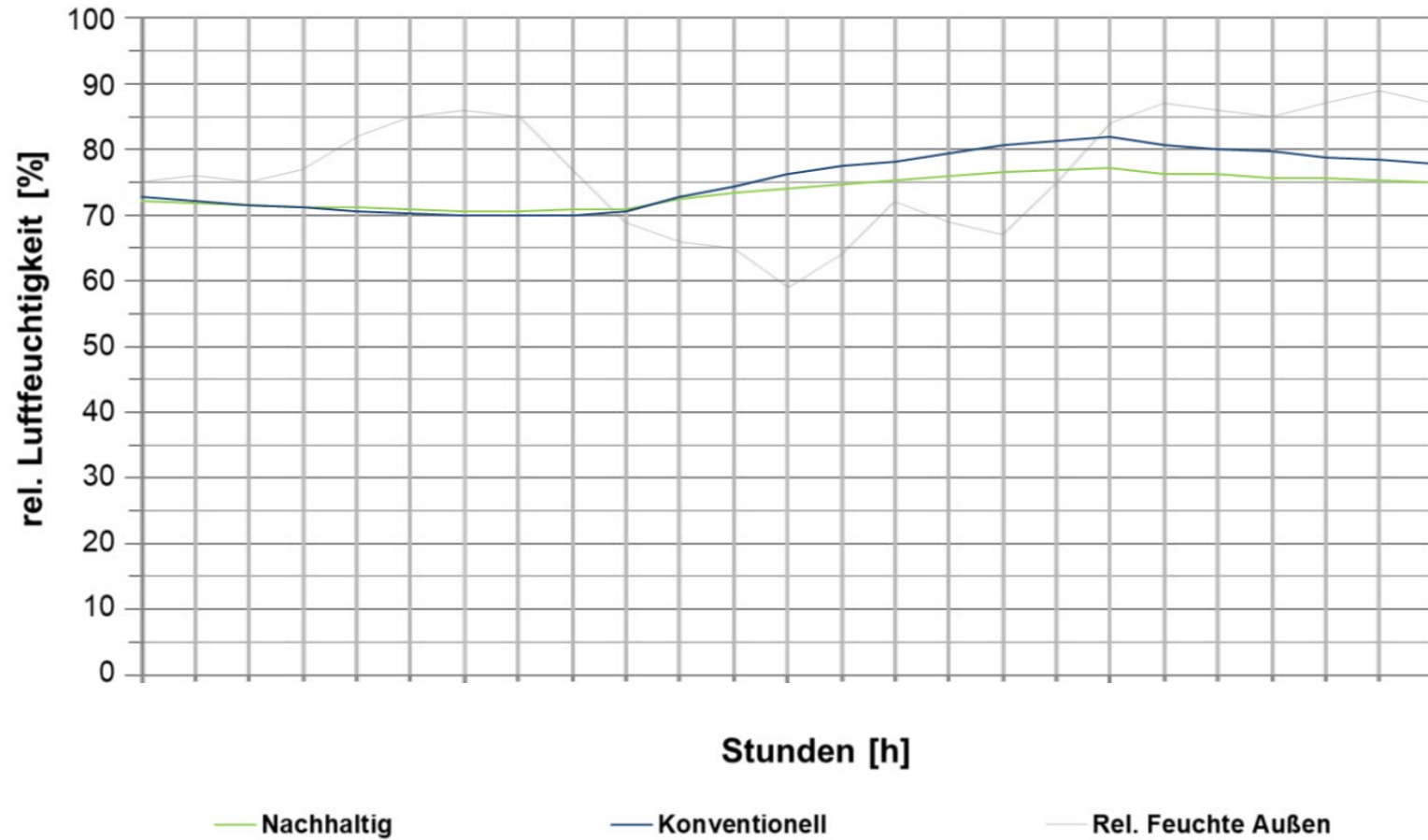
Jahresübersicht



TAGESVERLAUF REL. LF AM 29.01. – EIN TAG IM WINTER



TAGESVERLAUF REL. LF AM 22.07. – EIN TAG IM SOMMER



04

RAUMAKUSTIK MIT LEHM



Alnatura Campus in Darmstadt

Quelle: Alnatura



Seminarhaus EcoLut-Forum in Engelskirchen

Quelle: Claytec



Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude des
Freilichtmuseums in Detmold,

Quelle: OWL GmbH

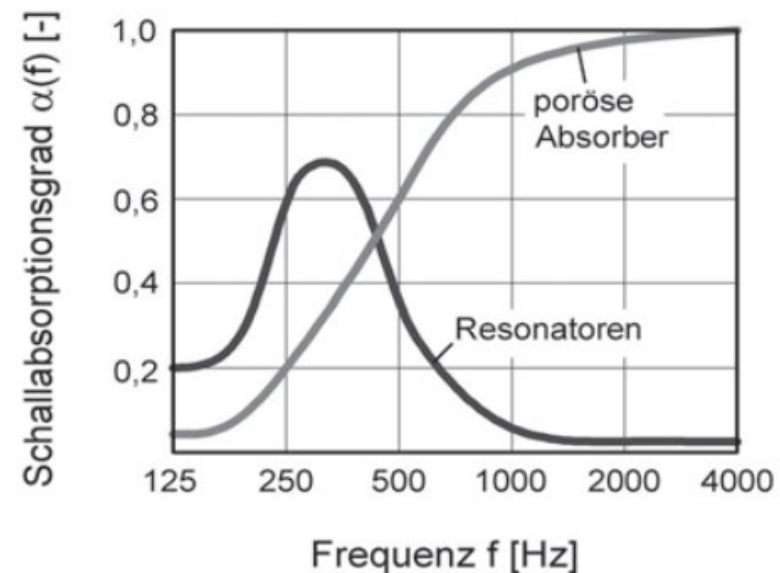
Lehm = gute Raumakustik?

...wer weiß?

Keine Daten,
aber unterschiedlichste Einschätzungen

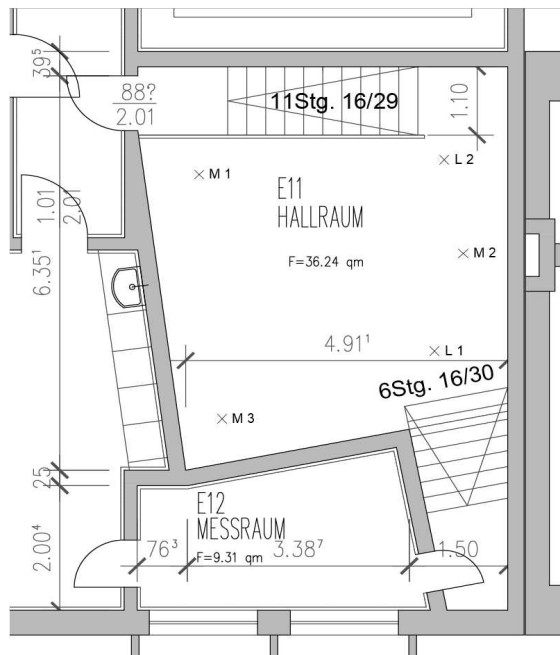
THEORETISCHE GRUNDLAGEN

- Schallabsorptionsgrad: α
- Messverfahren
 - DIN EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in **Hallräumen**
 - DIN EN ISO 10534: Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in **Impedanzrohren** Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis; Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion
- Schallabsorption von Flächen
 - Poröse Absorber
 - Resonatoren



MESSKAMPANE: MESSUNGEN VON LEHMOBERFLÄCHEN IN HALLRÄUMEN

- Lehmoberflächen:
 - Stampflehmwand aus einer groben Stampflehmmischung 0-22 mm
 - Stampflehmwand verputzt mit Lehmoberputz
 - Konstruktionsaufbau aus einer Lehmbauplatte (16 mm) mit Lehmfeinputz
- Messungen nach DIN EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen

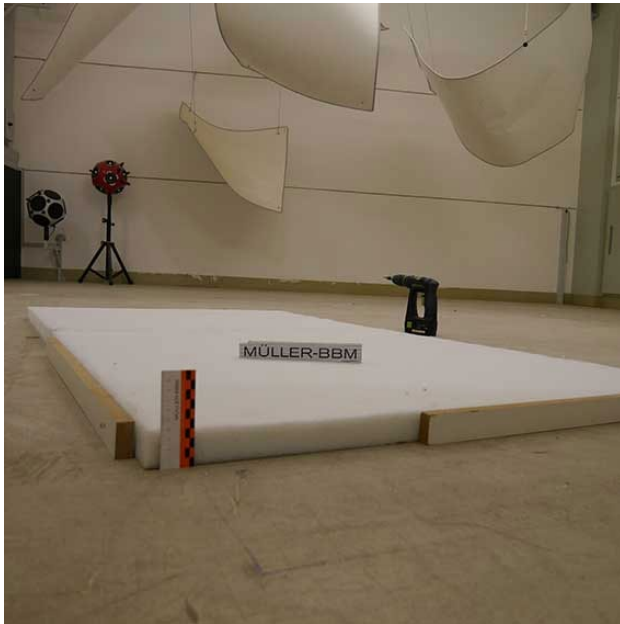


Grundriss des Hallraumes (Ohne Maßstab)

- Messequipment:
 - 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

BESTIMMUNG DES SCHALLABSORPTIONSGRADES IM HALLRAUM

nach ISO 354 an 10,5 – 12 m² großen Musteraufbauten



Quelle: MBBM

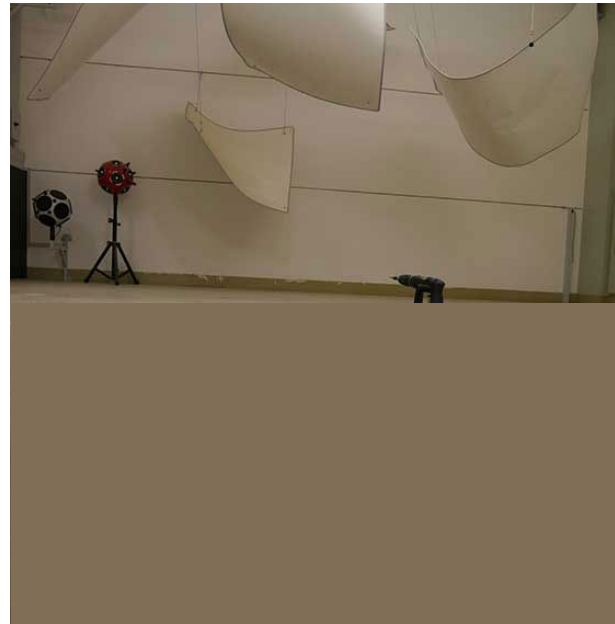
Messung der Nachhallzeit

T_{mit} mit Probe

Berechnung äquivalente Absorptionsfläche A_{mit} im Raum über Sabine'sche Formel

$$T = 0,163 * V / A_{\text{mit}}$$

$$\Rightarrow A_{\text{mit}}$$



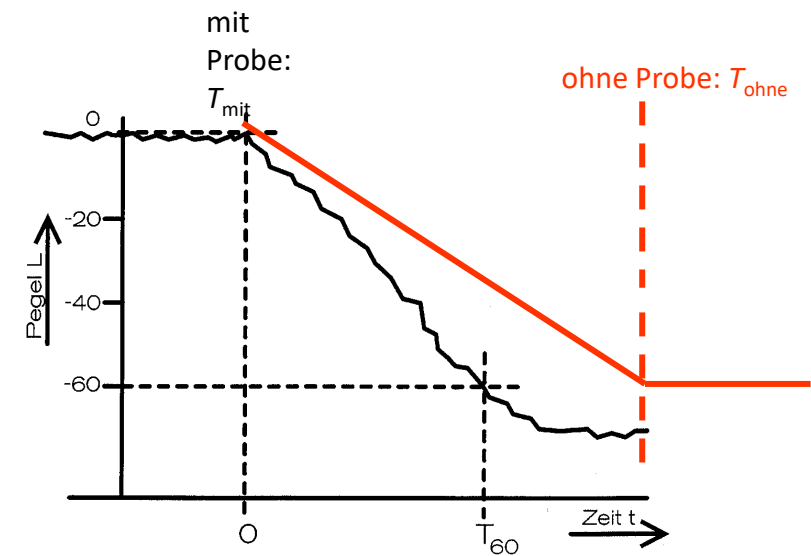
Messung Nachhallzeit

T_{ohne} ohne Probe

Berechnung äquivalente Absorptionsfläche A_{ohne} im Raum über Sabine'sche Formel

$$T = 0,163 * V / A_{\text{ohne}}$$

$$\Rightarrow A_{\text{ohne}}$$



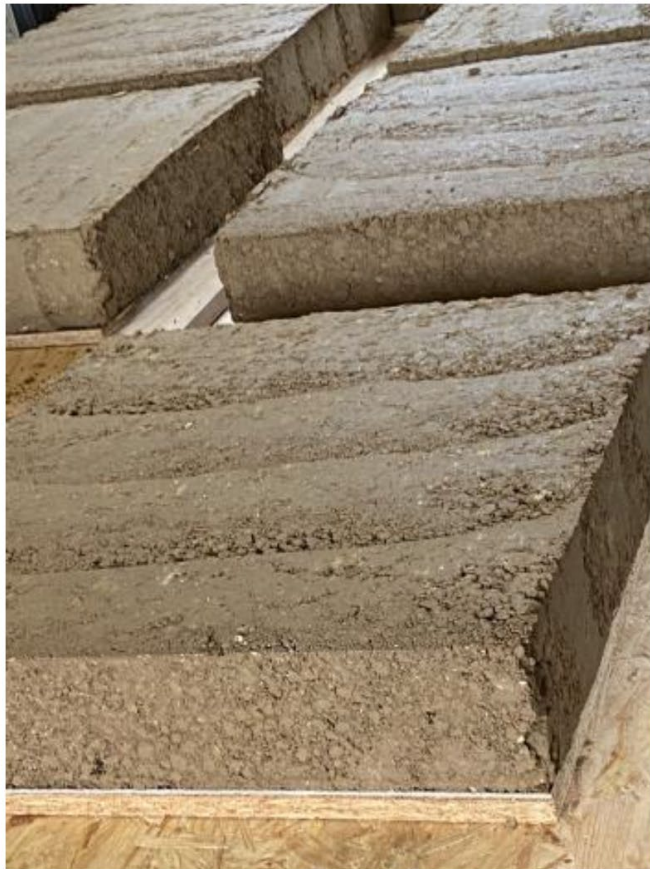
Berechnung äquivalente Absorptionsfläche des Absorbers

$$A_{\text{mit}} - A_{\text{ohne}} = A_{\text{abs}}$$

Schallabsorptionsgrad

$$\alpha = A_{\text{abs}} / S$$

HERSTELLUNG DES PRÜFOBJEKTS



Ausgeschalte Stamflehm-kacheln

HALLRAUMMESSUNG – STAMPFLEHM

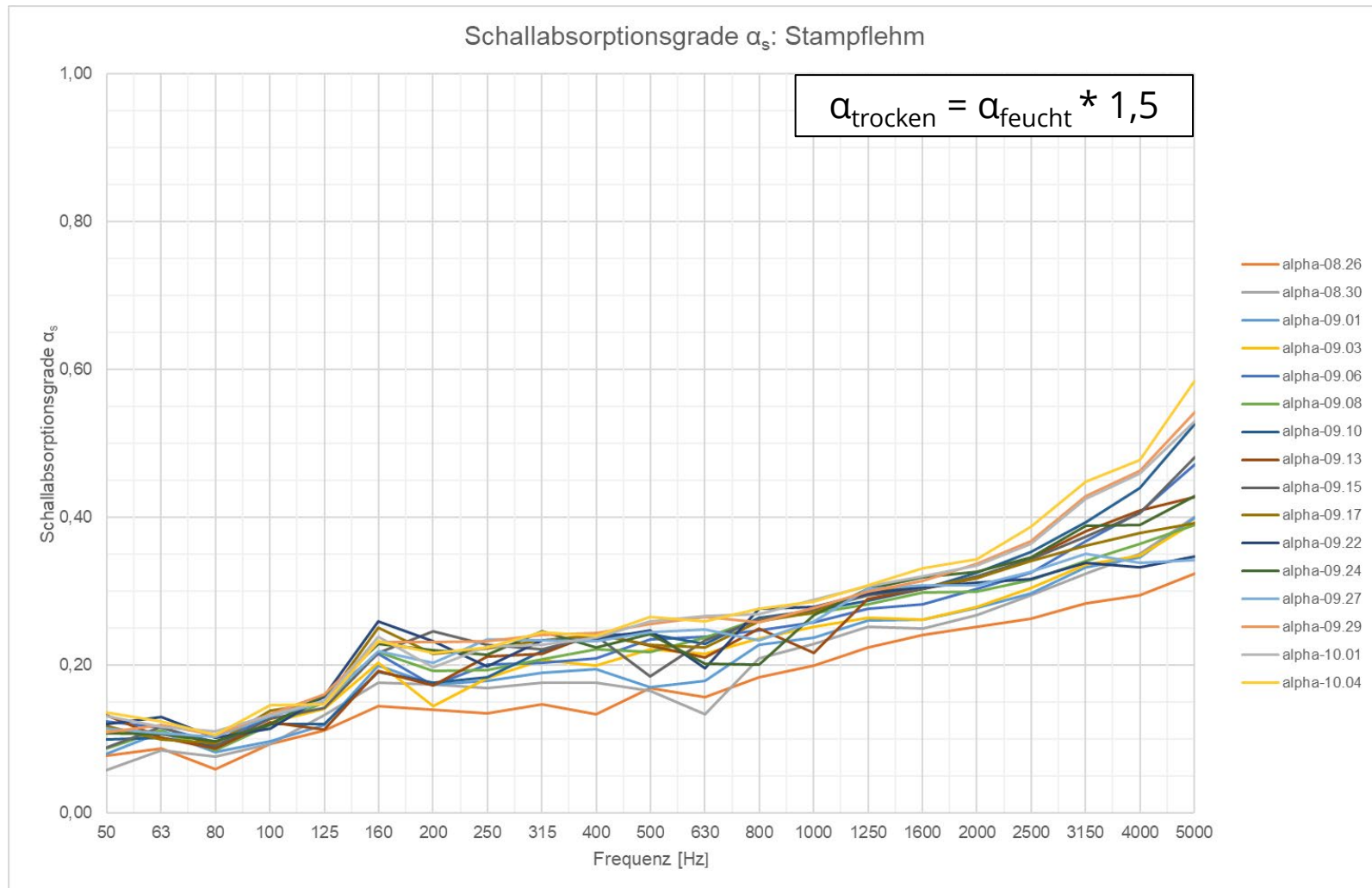


Oberflächenbeschaffenheit Stampflehm



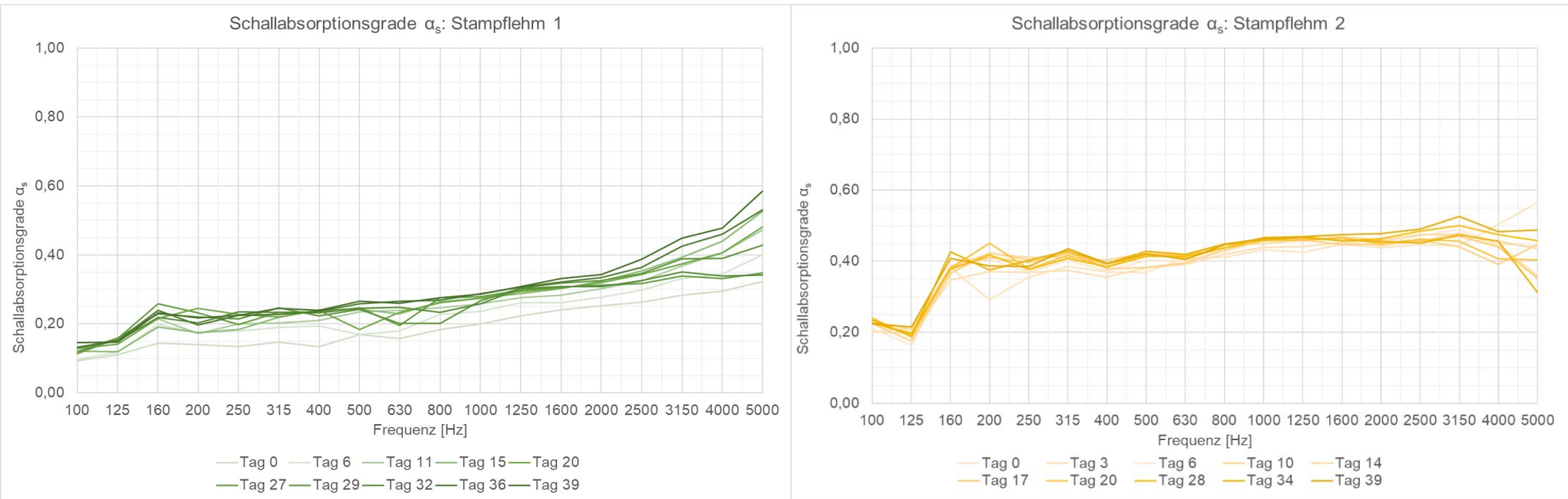
Stampflehmprüffläche Hallraum

HALLRAUMMESSUNG – STAMPFLEHM: SCHALLABSORPTIONSGRADE

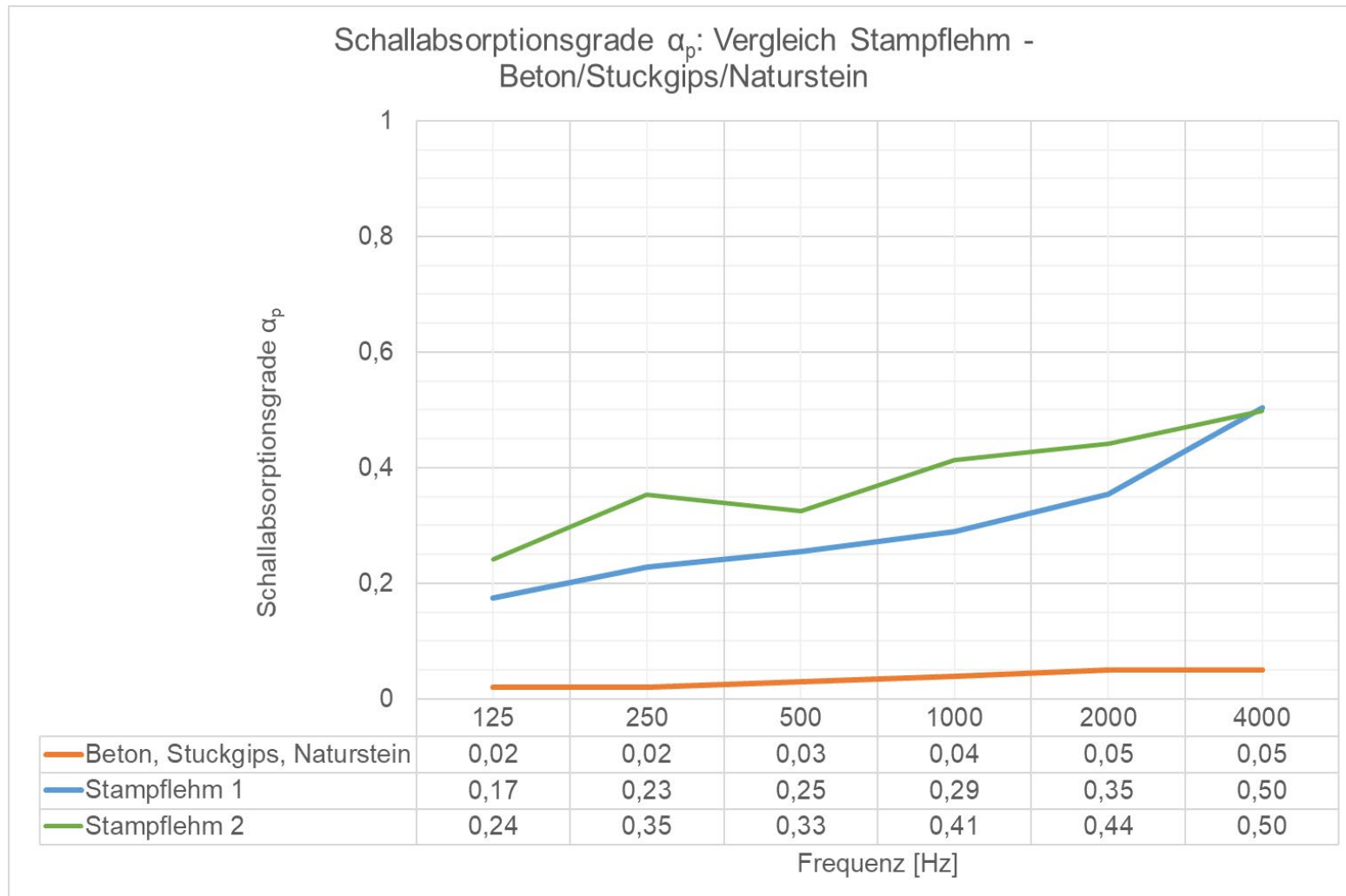


STAMPFLEHM: SCHALLABSORPTIONSGRADE

Zwei Fertigmischungen



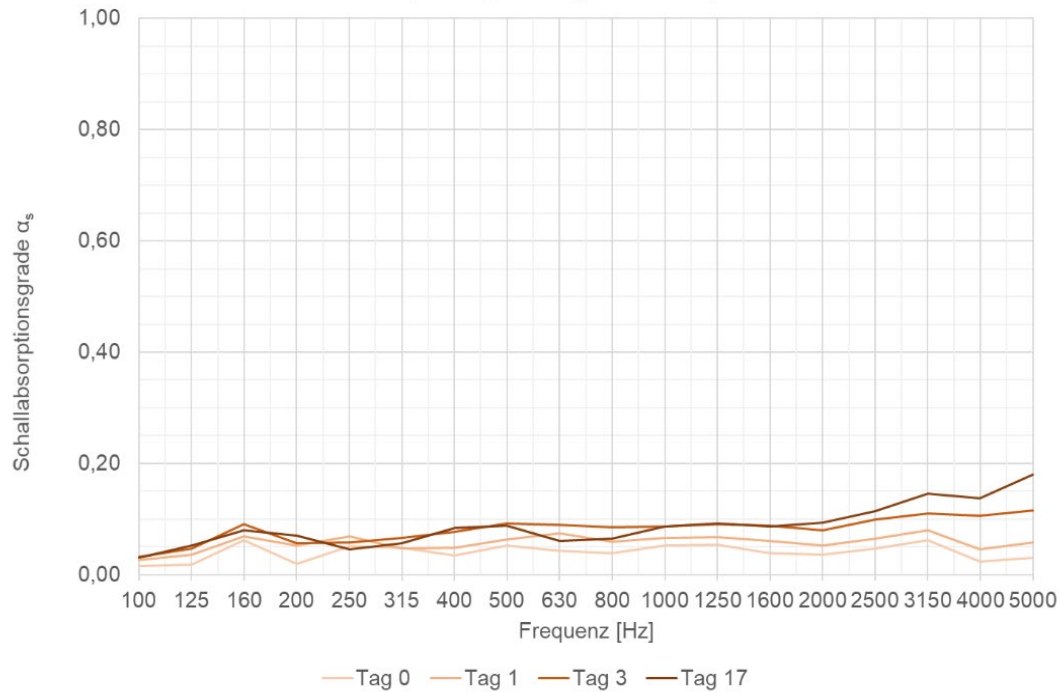
HALLRAUMMESSUNG – STAMPFLEHM: VERGLEICH



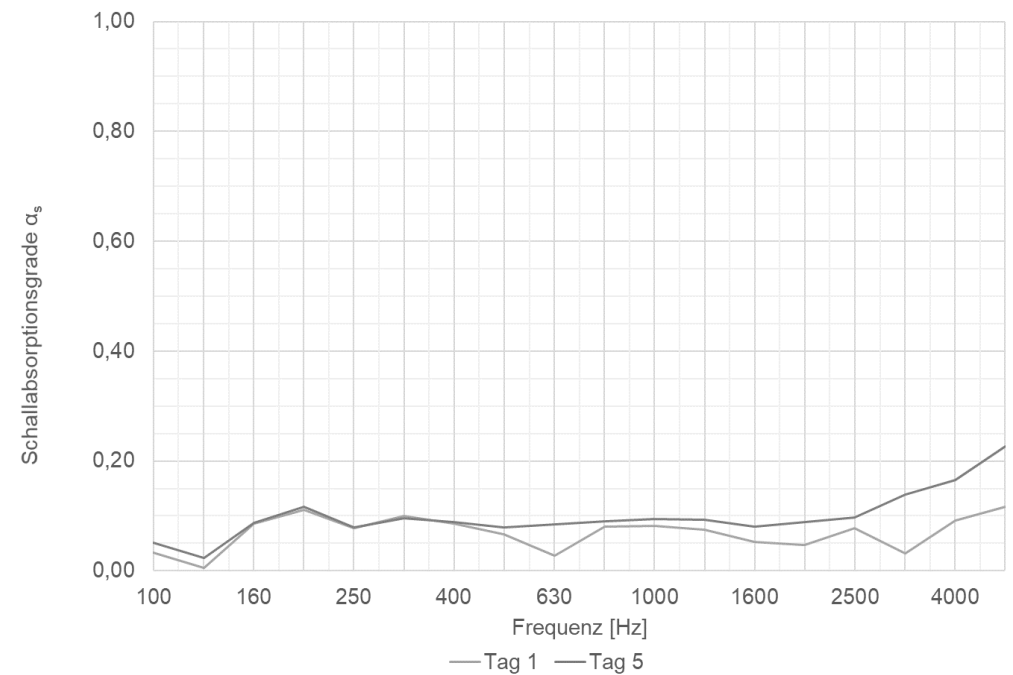
LEHMOBERPUTZ: SCHALLABSORPTIONSGRADE

Zwei Fertigmischungen

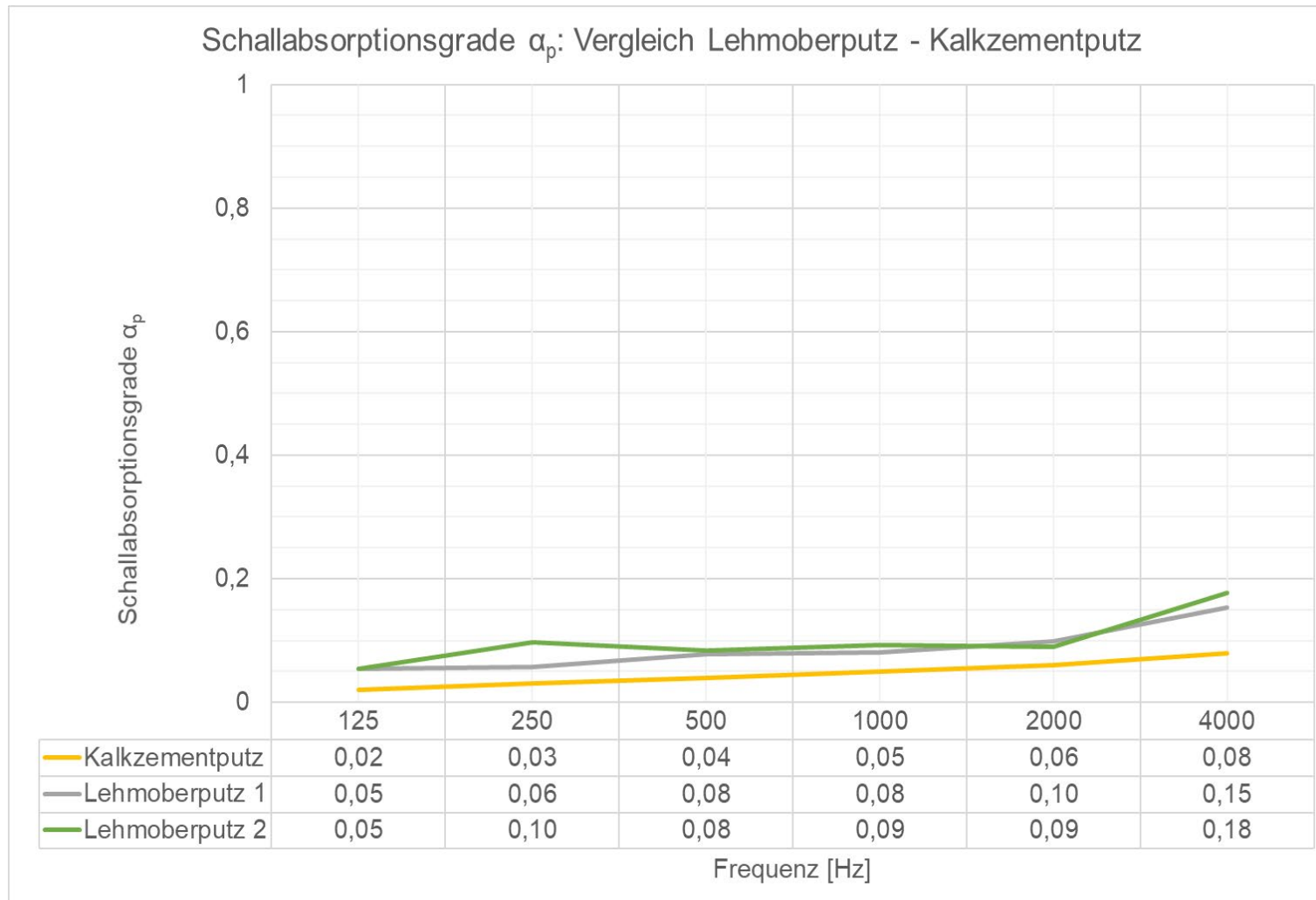
Schallabsorptionsgrade α_s : Lehmoberputz 1



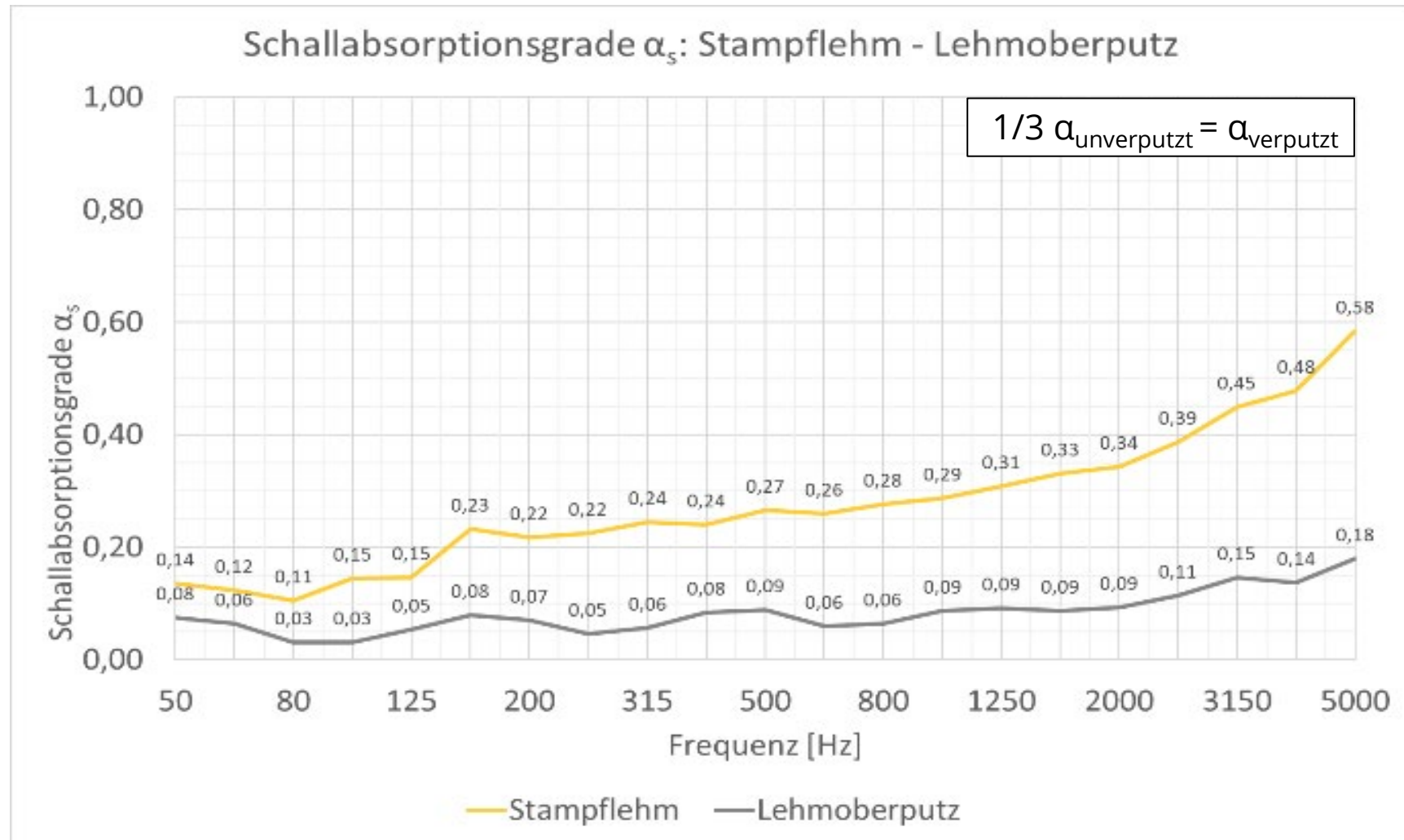
Schallabsorptionsgrade α_s : Lehmoberputz 2



HALLRAUMMESSUNG – LEHMOBERPUTZ: VERGLEICH



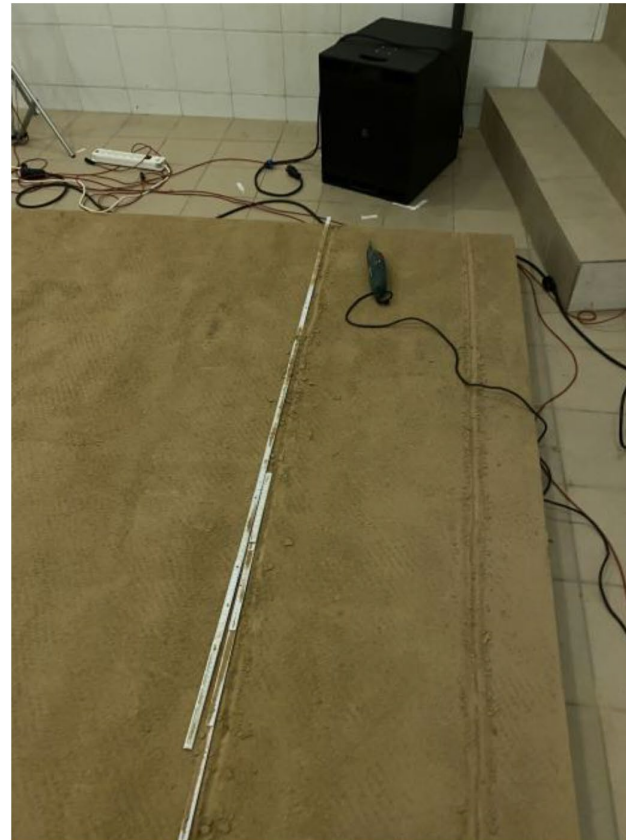
HALLRAUMMESSUNG VERGLEICH: STAMPFLEHM - LEHMOBERPUTZ



HALLRAUMMESSUNG – VERÄNDERUNG DER PUTZOBERFLÄCHE

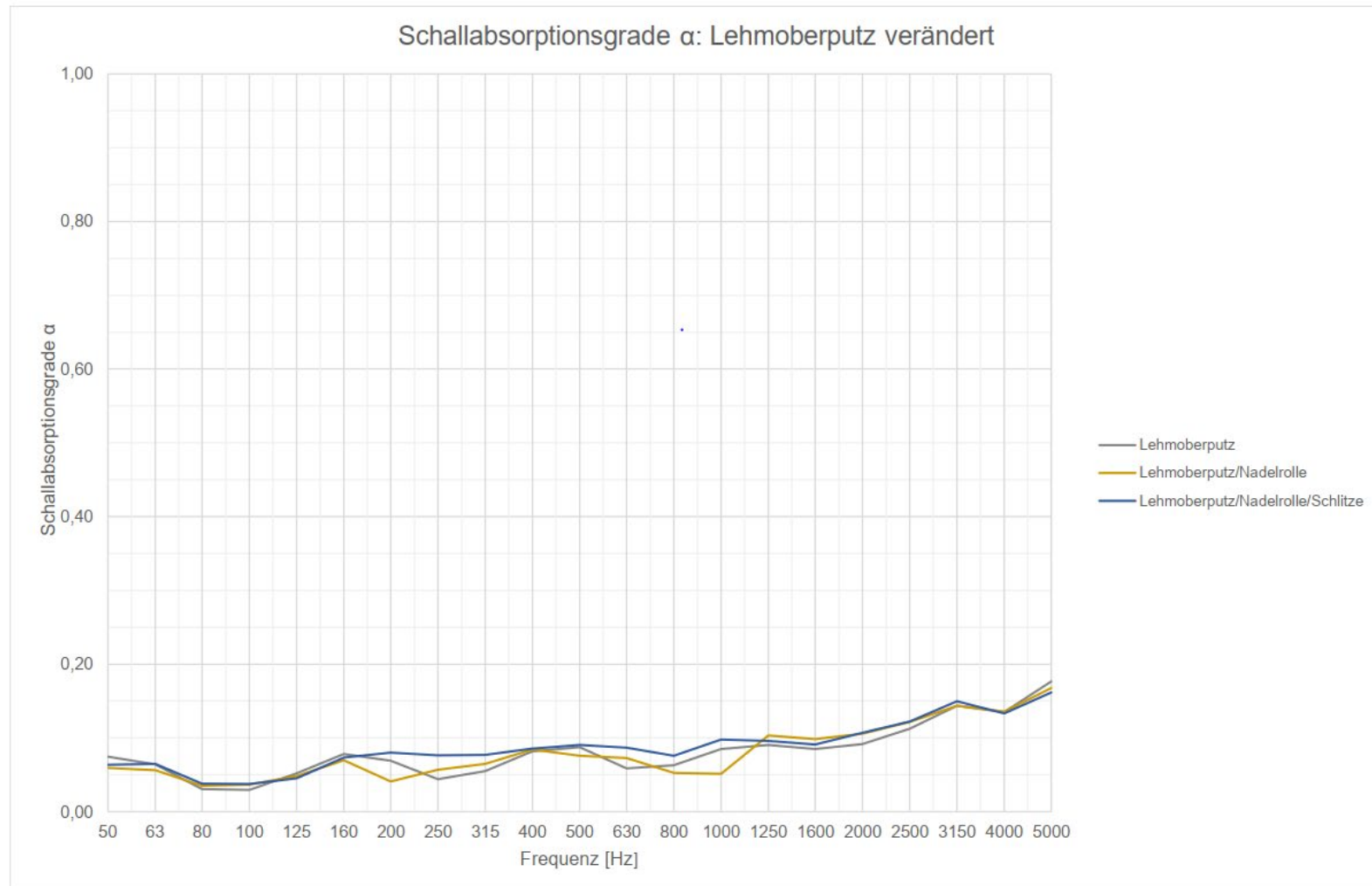


Lehmverputzte Oberfläche,
bearbeitet mit einer Nadelrolle



Lehmverputzte Oberfläche,
bearbeitet mit einer Nadelrolle und Rillen

HALLRAUMMESSUNG – VERÄNDERUNG DER PUTZOBERFLÄCHE

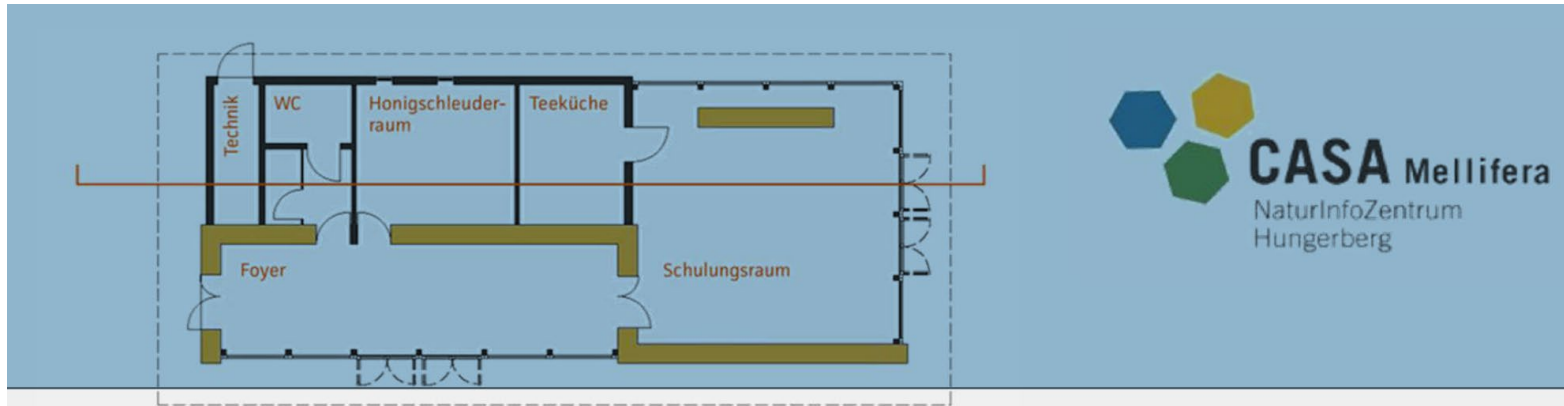


FAZIT

Untersuchte Lehmoberflächen weisen ein höheres Schallabsorptionsvermögen als vergleichbare konventionelle Materialien auf

Weiterer Untersuchungsbedarf:

- Unbekannte Faktoren für eine genaue Interpretation
 - Entwicklung der Porosität
 - Veränderung des Strömungswiderstandes
 - Einfluss des Trocknungsgerätes auf die Rissbildung
 - Schwinden des Lehmes
- Wiederholung der Messungen
 - Aussagekraft der Ergebnisse steigern
 - Planungswerte ermitteln



Casa Mellifera, CAPE

Dachverband Lehm (<https://www.dachverband-lehm.de/bauwerke/naturinfozentrum-casa-mellifera>)

Stadt Ludwigsburg (<https://www.ludwigsburg.de/start/leben+in+ludwigsburg/casa+mellifera+-+raeume+nutzen.html>)

Messung im Hallraum (Blaschke, K.K.; Schwickert, S.; Kob, M.)



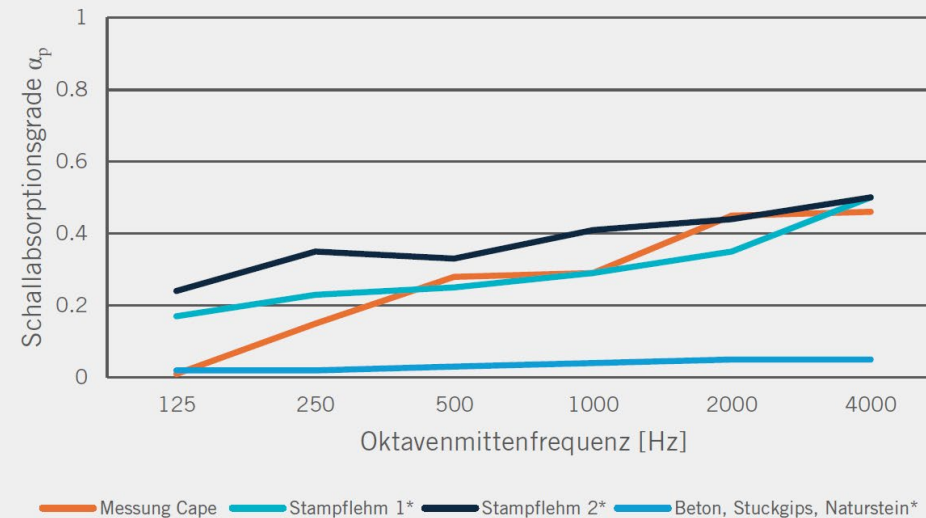
Tab. 1 Baustoffkenndaten von Stampflehm und Lehmputz
Building material data of rammed earth and clay plaster

	Stampflehm grob 0–22 mm	Stampflehm grob 0–16 mm
Trockenrohdichte	2200 kg/m ³	ca. 2300 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	1,4 W/mK	1,5 W/mK
Dampfdiffusions- widerstandszahl μ	5/10	5/10
Baustoffklasse	A1	A1
Druckfestigkeit	≥ 3 N/mm ²	2,0 N/mm ²
Trockenschwindmaß	< 0,5 %	ca. 0,7 %

Messung Casa Mellifera (CAPE)



Schallabsorptionsgrade Vergleich Stampflehm - Beton/Stuckgips/Naturstein



	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Beton, Stuckgips, ...*	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Stampflehm 1*	0.17	0.23	0.25	0.29	0.35	0.50
Stampflehm 2*	0.24	0.35	0.33	0.41	0.44	0.50
Messung CAPE	0.01	0.15	0.28	0.29	0.45	0.46

Vergleich der Ergebnisse

Mit Forschungs-Prüfwerten

Die Differenz bei Frequenzen unter 500 Hz ist auf die ungenaue Datengrundlage der Schallabsorption der großen Glasfläche zurückzuführen.

*Blaschke, K. K.; Schwickert, S.; Kob, M. (2023) Schallabsorptionseigenschaften von Lehmoberflächen. Bauphysik 45, H. 6, S. 289–296.

05

EINZELASPEKTE DER ÖKOBILANZ EINES GEBÄUDES

LIFE-CYCLE-ANALYSES-INDIKATOREN

■ Indikatoren der Sachbilanz / Inputs

- Summe Primärenergieverbrauch [MJ]
- davon Summe Primärenergie aus nicht reg. Ress. [MJ]
- davon Summe Primärenergie aus regenerierbaren Quellen [MJ]
- Abiotischer-Ressourcen-Verbrauch (ADP) [kg Sb-Äq.]

■ Indikatoren der Sachbilanz / Outputs

- Abraum und Erzaufbereitungsrückstände [kg]
- Hausmüll und Gewerbeabfälle [kg]
- Sonderabfälle [kg]

■ Indikatoren der Wirkbilanz

- Treibhauspotenzial (GWP) [kg CO₂-Äq.]
- Ozonabbaupotenzial (ODP) [kg R11-Äq.]
- Versauerungspotenzial (AP) [kg SO₂-Äq.]
- Eutrophierungspotenzial (EP) [kg PO₄-Äq.]
- Bodennahe Ozonbildung (POCP) [kg C₂H₄-Äq.]



Diamantenmine

Quelle: www.Miningtechnology.com



Marmorabbau Carrara

Quelle:
<https://mwknatursteinhandel.de/natursteinlexikon/weichgesteine/marmor-lexikon/>



Müll im Meer

Quelle: unsplash | Naja Bertolt Jensen

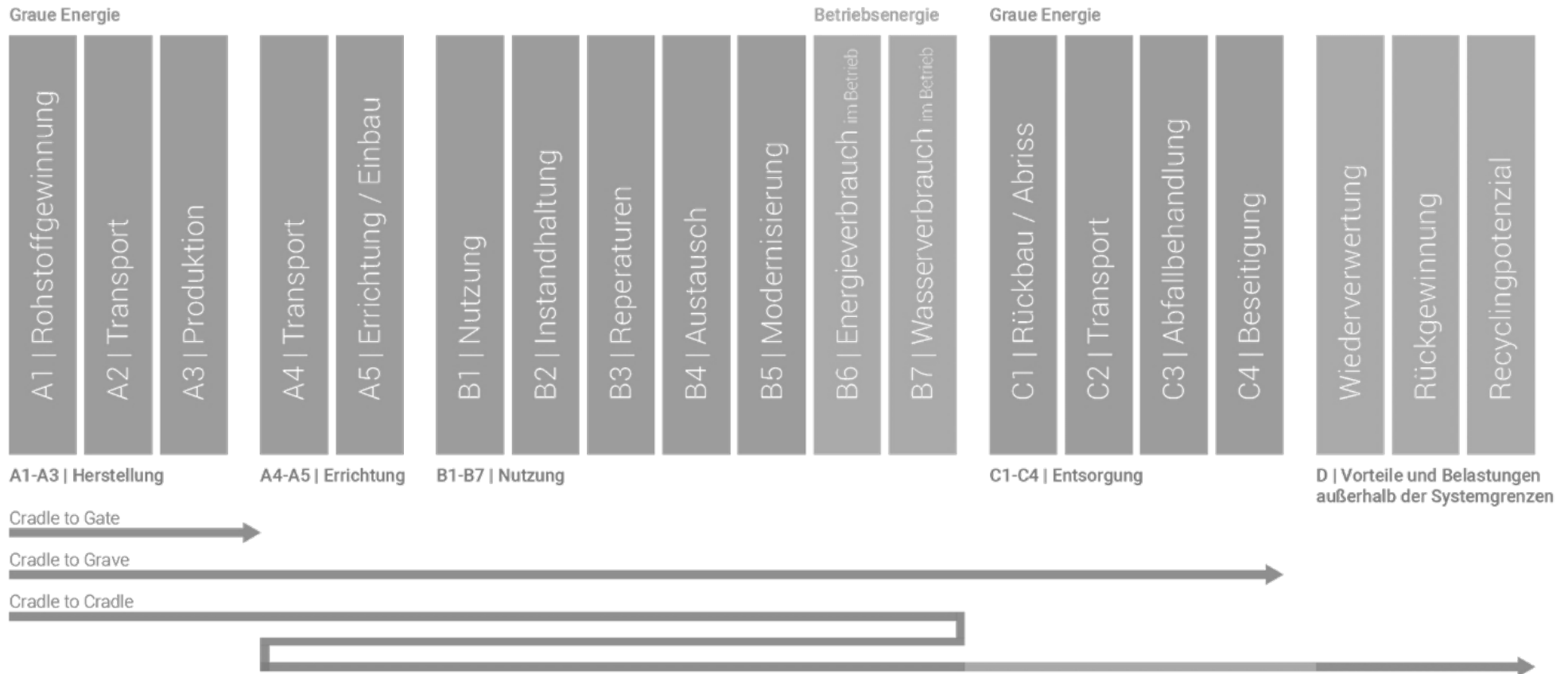


Braunkohletagebau Jüchen

Quelle: Klaus Erdmann, Wikipedia

Bauwende – Es geht mehr als um die Nutzungsphase

MODULE EINER ÖKOBILANZ



Quelle: Eigene Darstellung

ÖKOBILANZ ECOSIGHTS – NEUBAU LWL-FREILICHTMUSEUM

Holz

ca. 1.012 m³

Konstruktionsholz
(Tragwerk + Wand/Fassade).

Beton

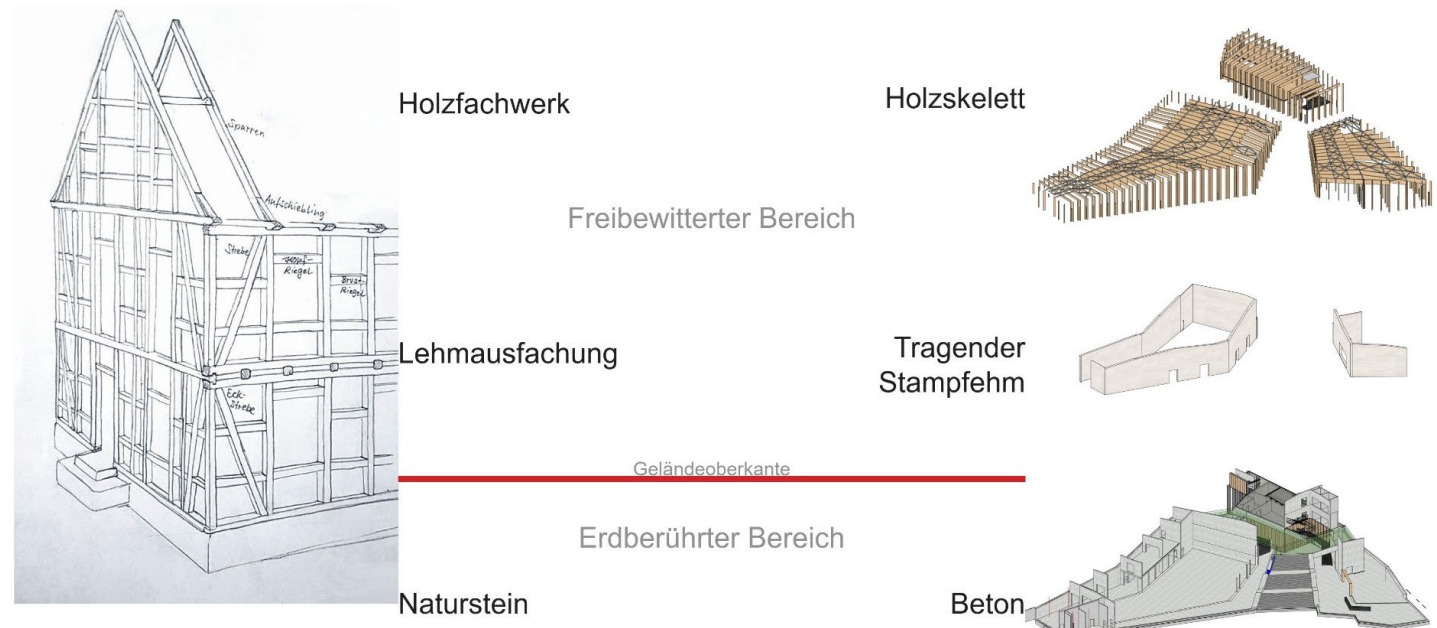
2004,5 m³ Ökobeton,
1.290,75 m³ Recyclingbeton.

Bewehrungsstahl

ca. 440 t.

Stampflehm

762 m³ (1.524 t).



Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des LWL-Freilichtmuseums Detmold

Quelle: Abschlussbericht ECOsights, acms-Architekten, Wuppertal

ÖKOBILANZ ECOSIGHTS – VERGLEICH A1-3, A4, D

Holz

ca. 1.012 m³

Konstruktionsholz
(Tragwerk + Wand/Fassade).

Beton

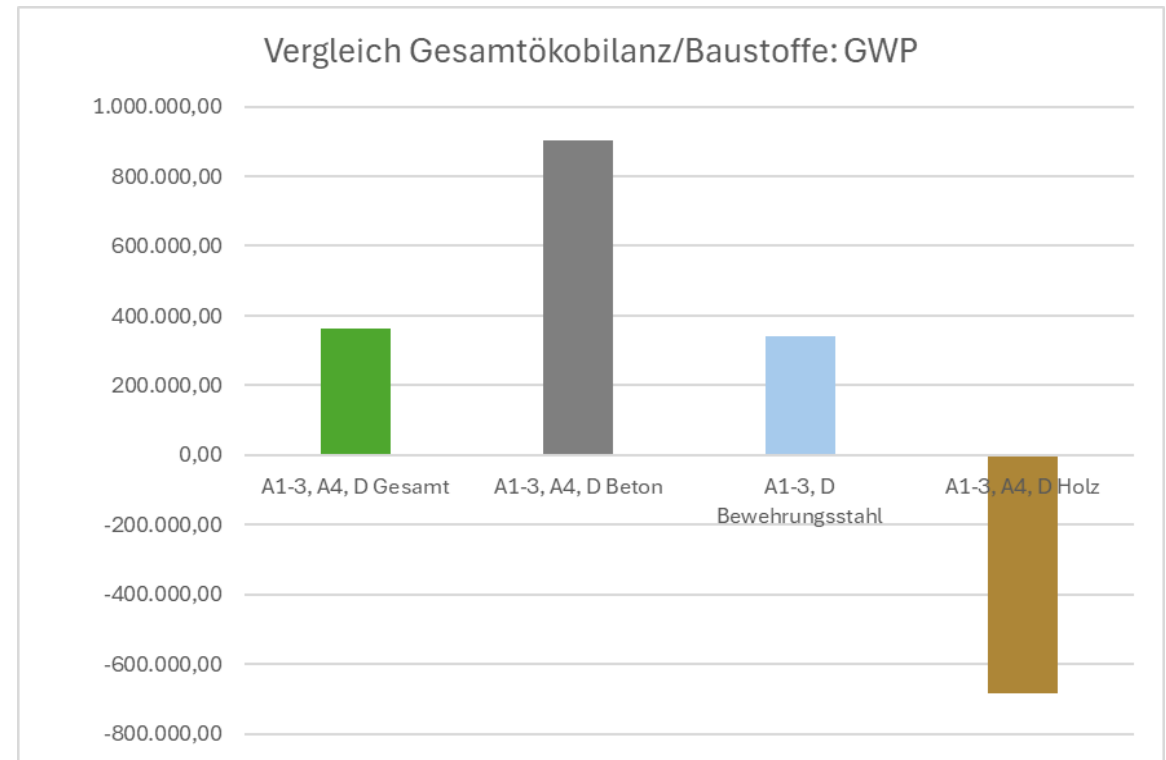
2004,5 m³ Ökobeton,
1.290,75 m³ Recyclingbeton.

Bewehrungsstahl

ca. 440 t.

Stampflehm

762 m³ (1.524 t).



Größenordnung der verbauten Primärbaustoffe für das Gebäude (A1-A3, A4, D)

Quelle: Abschlussbericht ECOsights, acms-Architekten, Wuppertal

ÖKOBILANZ ECOSIGHTS – VERGLEICH A4 TRANSPORT

Holz

ca. 1.012 m³
Konstruktionsholz
(Tragwerk + Wand/Fassade).

Beton

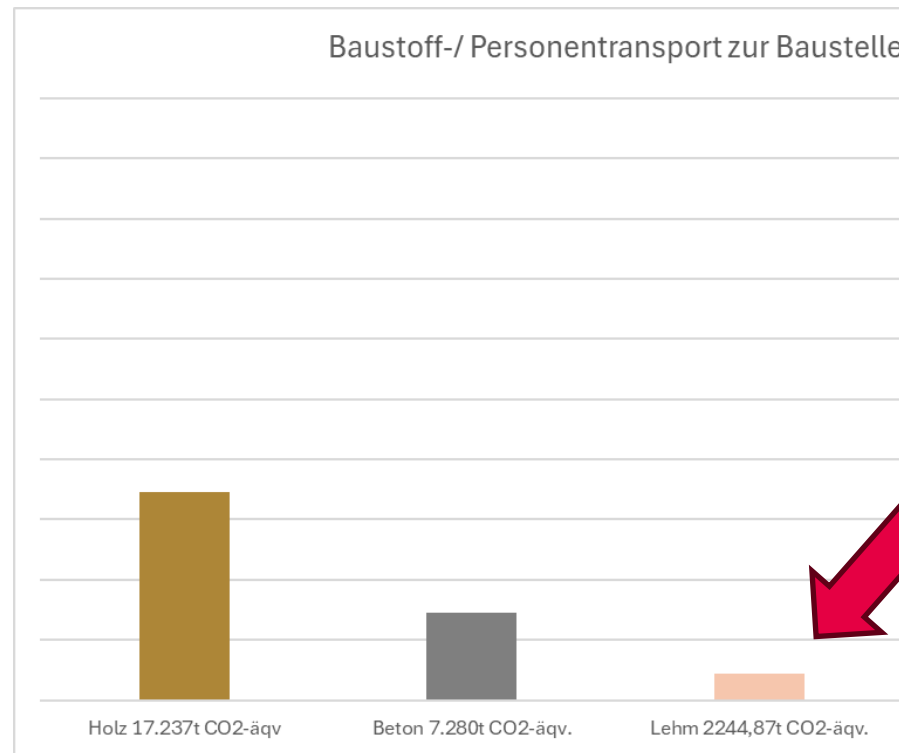
2004,5 m³ Ökobeton,
1.290,75 m³ Recyclingbeton.

Bewehrungsstahl

ca. 440 t.

Stampflehm

762 m³ (1.524 t).

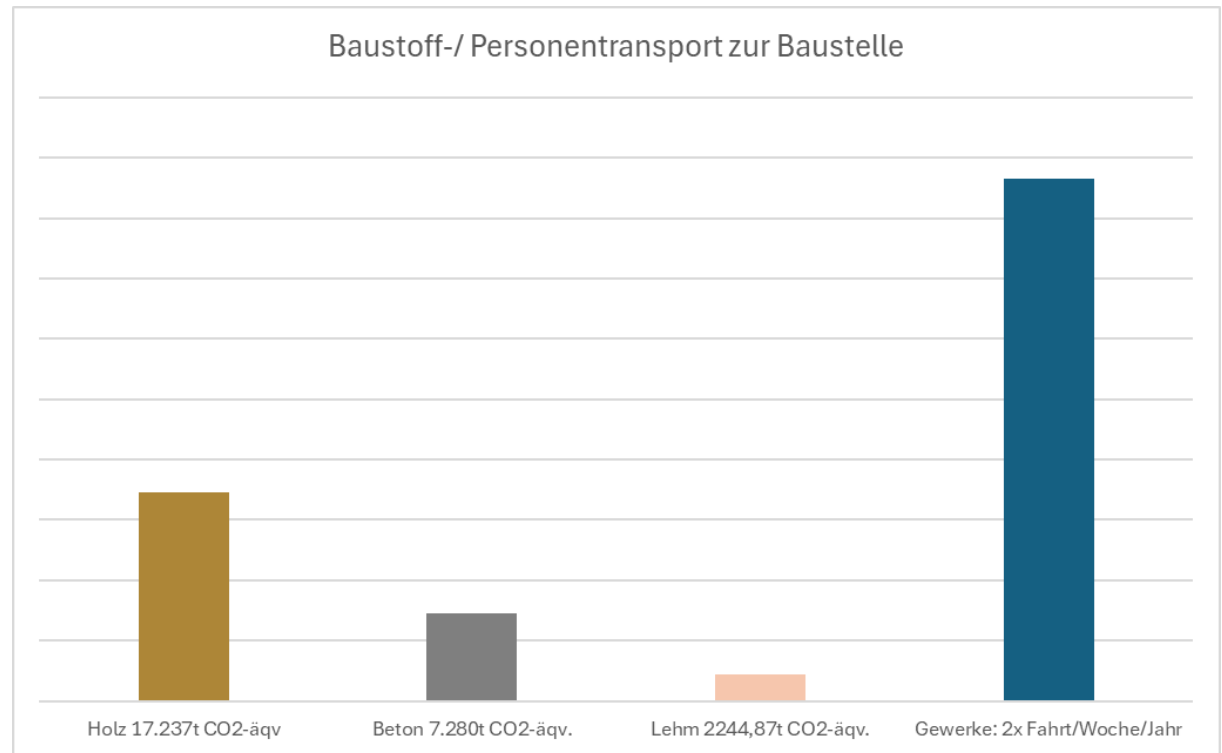
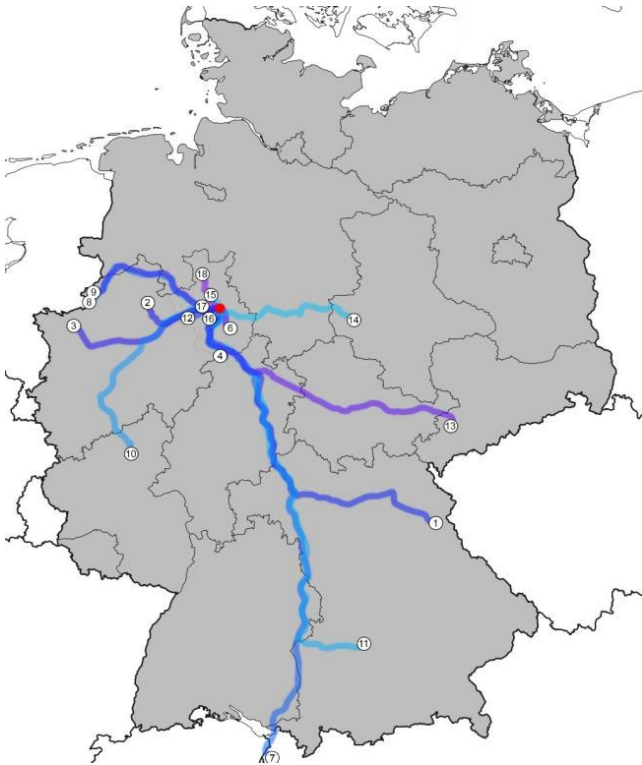


Vergleich der Baustoffe für das Modul A4 (GWP)

Quelle: Abschlussbericht ECOsights, acms-Architekten, Wuppertal

ÖKOBILANZ ECOSIGHTS – VERGLEICH A4 TRANSPORT

Vergleich der Baustofftransporte mit der Anreise der Bauschaffenden insgesamt



Vergleich der Baustoffe für das Modul A4 (GWP)

Quelle: Abschlussbericht ECOSights, acms-Architekten, Wuppertal

Quelle: Abschlussbericht ECOSights, acms-Architekten, Wuppertal

06

ERKENNTNISSE AUS DER BEGLEITFORSCHUNG

Leuchtturmprojekte sind teuer, aber ...

- zeigen, was geht,
- verhelfen neue Produkte und Technologien zu Sichtbarkeit,
- fördern den Erkenntnisgewinn durch Untersuchungen, Studien, Zulassungsverfahren,
- ebnen den Markteinstieg!

Lehm ist auch teuer 😊, aber ...

- sieht gut aus,
- sorgt für hohe thermische und hygrische Raumklimastabilität,
- schafft auf ästhetische Weise unsichtbar eine raumakustische Bedämpfung
- ist ökobilanziell unschlagbar, insbesondere wenn regional beschafft!

Dank an
Jörg Meyer, Conluto - Materialspende
Claytec - Materialspende
Malte Kob, HfM – Hallraum und nette Zusammenarbeit
DBU - Projektförderung