

# Eigenschaften von Lehmputzen für den Brandschutz von Holzkonstruktionen

Das Bauen mit Lehm und Holz hat eine lange Tradition. Früher wurde Lehmputz als Dekorationsschicht verwendet, die ebenso als Dämmung und als primärer Brandschutz für die Holzwände und Decken diente [1] [2]. Gegenwärtig werden diese Baustoffe wiederentdeckt, da sie eine gesunde und umweltfreundliche Alternative zum konventionellen Bauen darstellen [3] [4]. Holz und Lehm haben ein hohes Marktpotenzial, aber der Mangel an dokumentierten Brandschutzeigenschaften und Konstruktionsrichtlinien begrenzt ihre praktische Anwendung [5].

Das Brandverhalten einer Konstruktion oder eines Bauelementes kann durch seine Reaktion auf Feuerwirkung (bezogen auf eine frühe Brandphase) und den Feuerwiderstand (nach dem Feuerüberschlag) beschrieben werden. Dieser Beitrag bezieht sich allein auf den Feuerwiderstand von Holzkonstruktionen, die von Lehmputzsystemen geschützt werden, gemäß der in EN 1995-1-2 [6] definierten Sicherheitsannahmen. Derzeit betrachtet diese Norm Putz nicht als Brandschutzmaterial.

Weltweit gibt es sehr wenig Daten über den Brandschutzeffekt von Lehmputz aus Versuchen unter Normbedingungen (gemäß EN 1363-1 [7]). Bisher erfolgte Studien wurden vor allem mit Strohballenkonstruktionen und Lehm- oder Kalkputzverkleidung erstellt [8] [9]. Eine der wenigen Untersuchungen zu historischen Brandschutzmaterialien für Holzkonstruktionen wurde durch Chorlton et al [10] durchgeführt, wobei auch dort Lehm nicht untersucht wurde.

In den letzten Jahren haben wir einige experimentelle Studien in unterschiedlichem Umfang durchgeführt. Eine Forschung durch Wachtling et al. [11] untersuchte Lehmputz und Lehmplatten die auf Strohballenkonstruktionen aufgebracht wurden, um die Feuerwiderstandsklasse F 60 gemäß der Krite-

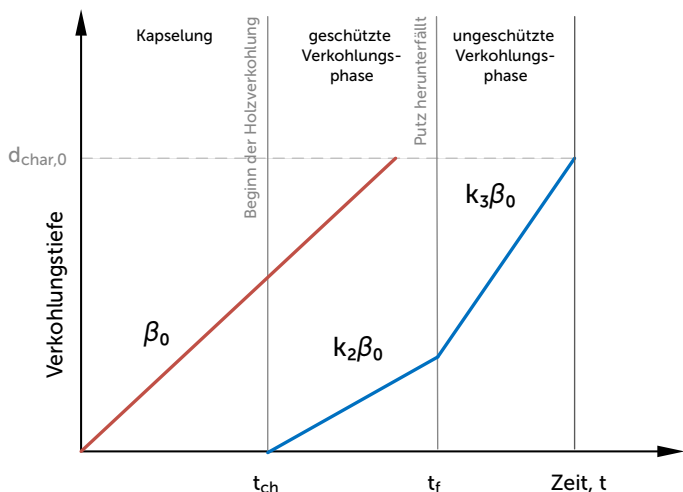
rien der EN 13501-2 [12] zu erreichen. Studien durch Liblik et al. [13] [14] [15] betrachteten das Verhalten von Lehmputzsystemen und massiven Holzelementen. Zusätzlich wurden temperaturabhängige Materialeigenschaften durch numerische Analysen ermittelt [16] [17] [18].

Putz benötigt eine mechanische Verbindung, wenn er auf Holzoberflächen aufgebracht wird. In Küstenregionen wurde das vorhandene Schilf („Phragmites australis“) häufig als Untergrund für den Putzauftrag verwendet, z.B. als Schilfmatte und Schilfplatte. Heute werden Schilfplatten wegen ihrer guten Schall- und Wärmedämmeigenschaften wiederentdeckt, da sie eine ökologische Alternative zu konventionellen Dämmstoffen darstellen [19].

Ziel dieses Beitrages ist es, einen Überblick über die unternommenen Brandversuche und neueste Verbesserungen dabei zu geben, mit dem Fokus auf Lehmputzsystemen, die auf Holzelemente aufgebracht wurden. Konstruktive Werte entstammen der *Component Additive Method (CAM)* nach Schleifer [20] und der *Effective Cross-Section Method* (EN 1995-1-2). Die Wärmeübertragungsanalyse erfolgte gemäß dem Verfahren von Mäger et al. [21] zur Implementierung von Lehmputz in die CAM. Diese Forschung zeigt das Potenzial von Lehmputzsystemen als Brandschutzmaterial sowohl in historischen als auch in modernen Holzhäusern.

## Brandschutz von Holzkonstruktionen

Der Feuerwiderstand von Holzkonstruktionen wird durch die Verkohlungs beeinflusst, welche die Lasttragkapazität reduziert. Die EN 1995-1-2 definiert das Verkohlungsverhalten von ungeschützten und zunächst geschützten Holzkonstruktionen, siehe Abb. 1. Der Startzeitpunkt der Verkohlung des Holzelementes kann durch Aufbringen von Schutzma-



01 Verkohlung von ungeschützter (rote Linie) und geschützter (blaue Linie) Seite des Holzbauteils

terialen verzögert und die Verkohlungsrate reduziert werden. Heute gibt es Entwurfparameter für einige Schutzmaterialien wie Gipskartonplatten: Den Beginn der Verkohlung ( $t_{ch}$ ) und den Schutzfaktor ( $k_2$ ). Letzterer wird für die Berechnung der Verkohlungsrate hinter dem Schutzmaterial vor dem Versagen ( $t_f$ ) verwendet. Grundlegende Verkohlungsraten ( $\beta_0$ ) sind in EN 1995-1-2 angegeben.

Für die Bestimmung der Trennfunktion eines Bauteils unter Feuereinwirkung wird die Trennfunktionsmethode (*Separating Function Method – SFM*) (oder auch Komponentenadditivmethode) verwendet [21] [22]. Sie betrachtet den gesamten Schichtaufbau einer Konstruktion durch die Beachtung des Beitrages einer jeden Schicht zum Feuerwiderstand. Die Grundlage dieser Methode ist in EN 1995-1-2 vorgestellt. Jede Schicht ist definiert durch eine Schutzdauer ( $t_{prot,i}$ ), welche die Zeit darstellt, bis sie ihre Brandschutzfunktion verliert. Dies ist der Zeitpunkt, wenn die Temperatur um 250 K im Mittel oder 270 K an jedem Punkt der unbeanspruchten Seite der betrachteten Schicht steigt. Hinsichtlich der Überarbeitung der EN 1995-1-2 wird dieser Wert auch als Startpunkt der Verkohlung ( $t_{ch}$ ) im überarbeiteten Eurocode 5 [23] betrachtet. Dabei werden Positionskoeffizienten ( $k_{pos,exp,i}$ ,  $k_{pos,unexp,i}$ ) verwendet, um den Einfluss be-

nachbarter Schichten zu berücksichtigen. Die letzte Schicht (auf der vom Feuer unbeanspruchten Seite der Konstruktion) hat eine Dämmfunktion, die durch die Dämmdauer ( $t_{ins,n}$ ) beschrieben wird, bis die Temperatur auf der unbeanspruchten Seite 140 K im Mittel oder 180 K an jedem Punkt erreicht hat. Diese Temperaturkriterien stimmen mit den Dämmanforderungen der EN 13501-2 überein. Gemäß der SFM, ist das Integritätskriterium (E) erfüllt, wenn das Dämmkriterium (I) erfüllt ist.

**Baustoffe**

Diese Studie ist begrenzt auf Lehmputze der Rohdichte von 1610–1800 kg/m<sup>3</sup> die der Rohdichteklasse 1,8 gemäß DIN 18947 [24] entsprechen. Die Zusammensetzung der Lehmputze folgt den Anforderungen die in DIN 18947 gestellt werden und ist eine Mischung aus Ton, Schluff, Sand und einigen Naturfasern wie Gerstenstroh, Hanf oder Schilfrohr. Tabelle 1 zeigt die geprüften Putze. Eine Jutefaser wurde bei einigen Probekörpern als Bewehrungsgewebe für den Putz verwendet.

Die Probekörper enthielten einen Putzaufbau, der direkt auf die Holzplatten aufgetragen wurde. Zwei Arten von Putzträgern wurden verwendet: Eine Schilfrohrmatte (Abb. 2) und eine 50 mm dicke Schilfrohr-

Tabelle 1 Eigenschaften der ausgewählten Lehmputze

Putz-Kennung	Art der Faser im Putz	Korngröße [mm]	Wärmeleitfähigkeit gemäß DIN 18947 [W/mK]	Festigkeitsklasse gemäß DIN 18947	Erfüllt die Anforderungen der DIN 19847	Land bzw. Herkunft
SU	Hanf	0-4 / 0-2 / 0-1	0,91	S II	Ja	Estland
SF	Schilf	0-4	n/z	n/z	n/z	Estland
CT	Gerstenstroh	0-4 / 0-2 / 0-1	0,91	S II	Ja	Deutschland



02 Auftrag der ersten Putzschicht (CT Probe) auf eine Holzplatte mit Schilfrohr als Putzträger



03 Auftrag der ersten Putzschicht (SU Probe) auf eine Schilfrohrplatte (mit Thermoelementen ausgestattet)

platte (Abb. 3). Die Schilfrohrmatte besteht aus 70 ca. 6-10 mm dicken Stengeln pro laufendem Meter. Die Schilfrohrplatte ist eine stabile Platte gepressten Schilfrohrs. Die Schilfrohrmatte wurde mit Klammern und die Schilfrohrplatte mit Schrauben auf den Holzelementen befestigt. Der Putzauftrag erfolgte durch professionelle Handwerker gemäß der Verarbeitungsrichtlinien des Produktherstellers. Die Probekörper wurden in einer Brandtestkammer (unter Normalbedingungen) konditioniert, so wie es auch in der Praxis wäre. Die Details sind im Testbericht durch Liblik [25] [26] [27] beschrieben.

### Experimentelle Studien

In den letzten Jahren wurde ein Versuchsprogramm mit verschiedenen experimentelle Studien durchgeführt [13] [14] [17]. Die einfachen Materialtests beinhalteten eine thermogravimetrische Analyse (TGA), um die Masseveränderung der Trockenputzproben zu bestimmen und eine transiente ebene Wärmequellen Methode (*transient plane heat source-TPS*) um die

Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität zu bewerten. Die durchgeführten Prüfungen und deren Ergebnisse finden sich in [17]. Die Ergebnisse wurden als Eingangsdaten für die numerische Untersuchungen verwendet, siehe dem Abschnitt „Numerische Analyse“. Es bleibt anzumerken, dass der Feuchtetransport und die Entfeuchtung des Putzes in diesem Stadium nicht explizit untersucht wurde.

Die TGA wurde mit einem NETZSCH STA 449 F3 Jupiter TG-DSC Prüfgerät durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in eine handliche Testkörnungsgröße zerkleinert. Unterschiedliche Erhitzungsraten (K/min) wurden gewählt. Abb. 4 stellt die wichtigsten Ergebnisse dar. Der totale Masseverlust einer SF Putzprobe war deutlich höher als der einer SU Putzprobe und der einer CT Probe.

Die TPS Prüfungen wurden gemäß EN ISO 22007-2 [28] durchgeführt. Die Beschreibung der Prüfungen finden sich in [17]. Die Messpunkte waren auf Grund

04 Vergleich der Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse TGA

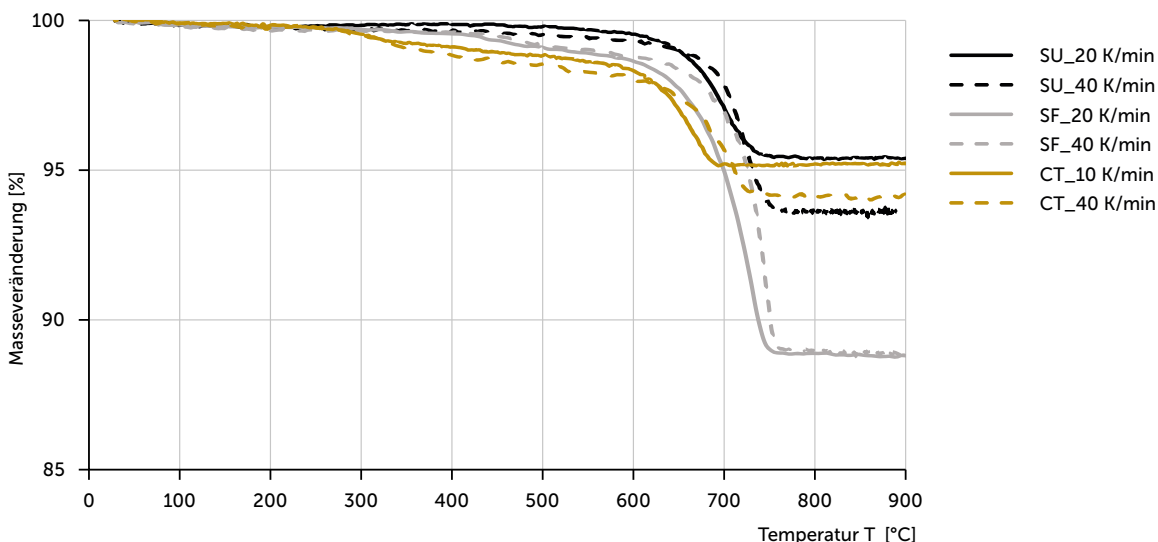


Tabelle 2 Überblick über die durchgeführten Brandversuche mit Lehmputzen und Schilfrohrmatten auf Holz

Test Nr.	Position i. d. Brandkamm.	Nutz-Kennung	Putzstärke [mm]	Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0,i}$ [min]	Schutz factor $k_2$	Versagenszeit des Putzsystems $t_f$ [min]	Referenz
1	Ver	SF*	10	8,1	0,82	n/z	[29]
2	Ver	SF*	30	32,7	0,57	n/z	[29]
3	Hor	SU	17	12,7	0,86	75	[25]
4	Hor	SU*	17	12,1	0,77	62	[25]
5	Ver	SU	20	18,0	0,88	>90	[25]
5	Ver	CT	20	15,6	0,85	>90	[25]
6	Hor	CT*	20	13,8	–	17	[26]
7	Ver	SU	44	44,4	0,24	63**	[25]

\*keine Jutefaser verwendet \*\*teilweises Ablösen von äußeren Putzschichten

Tabelle 3 Überblick über die durchgeführten Brandversuche mit Lehmputzen und 50 mm Schilfrohrplatten auf Holz

Test Nr.	Position i. d. Brandkamm.	Nutz-Kennung	Putzstärke [mm]	270°C auf Schilfrohrplatte [min]	270°C auf Holz [min]	Versagenszeit des Putzes (nicht der Platte) $t_f$ [min]	Referenz
8	Hor	SU	16	8,8	34,7	18,3	[25]
9	Hor	SU*	17	8,2	40,9	17,0	[25]
10	Ver	SU	23	13,4	64,7	n/z	[25]
10	Ver	CT	23	12,2	62,2	29	[25]
11	Ver	SU	44	62,6	114,3	43**	[25]

\*keine Jutefaser verwendet \*\*teilweises Ablösen von äußeren Putzschichten

der starken Dampfentwicklung in den Probekörpern auf max. 500°C begrenzt, da sonst weitere Prüfungen behindert worden wären. Die Ergebnisse finden sich in Abb. 9 und Abb. 10 als TPS markiert. Die Beziehung zwischen den ermittelten Werten wird als linear angenommen, wie in den Grafiken dargestellt.

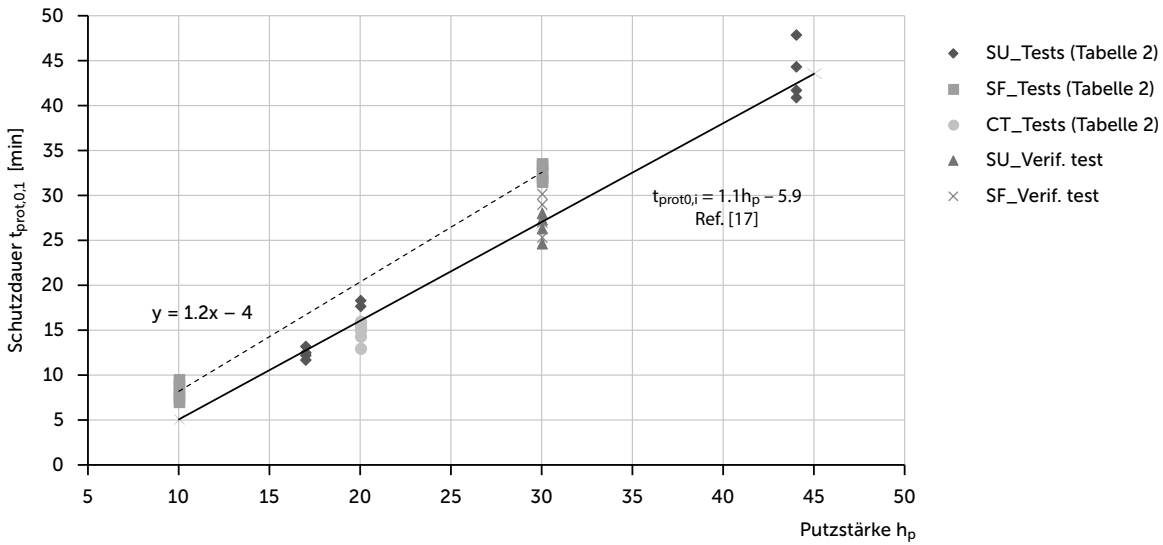
Der Brandschutzeffekt der Putze wurde durch Brandversuche in kleinen Dimensionen und Modellgrößen ermittelt. Ein kurzer Überblick über die Brandversuche wird in [25] [26] [27] gezeigt. Zwei Testreihen unter genormten Befeuerungsbedingungen (EN 1363-1) wurden mit massiven Holztafeln durchgeführt. Diese wurden wie folgt verkleidet: 1) Lehmputz und Schilfrohrmatte; 2) Lehmputz und 50 mm Schilfrohrplatte. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Die Schutzdauer ( $t_{\text{prot},0,i}$ ) wurde durch die Temperaturlaufzeichnungen ermittelt, während der Schutzfaktor ( $k_2$ ) sich durch die Messung der Verkohlungstiefe und der Verkohlungszeit ergab.

Die visuelle Beobachtung erfolgte während der Prüfungen durch ein Fenster. Unabhängig von der Putzstärke entstanden die ersten Risse bei etwa 750°C – 830°C im Ofen, was etwa nach 17-18 Minuten nach dem Startpunkt der normierten Befeuerung (gemäß EN 1363-1) erreicht ist. Diese Zeitspanne entspricht auch der Versuchsdauer, bei welcher der Putz von

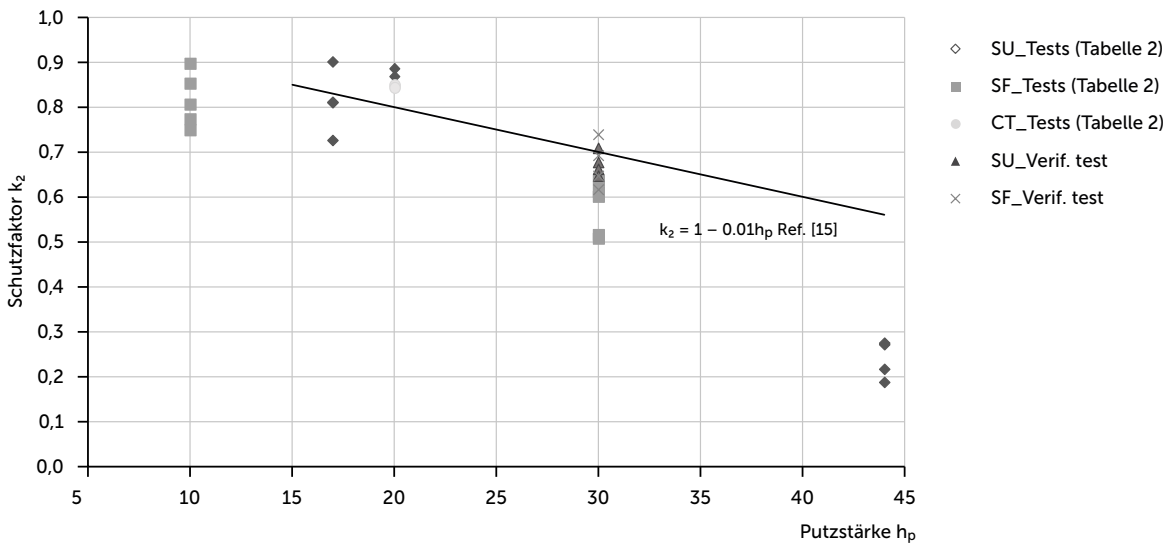
05 Brandversuch eines 44 mm Lehmputzsystems nach 80 Minuten



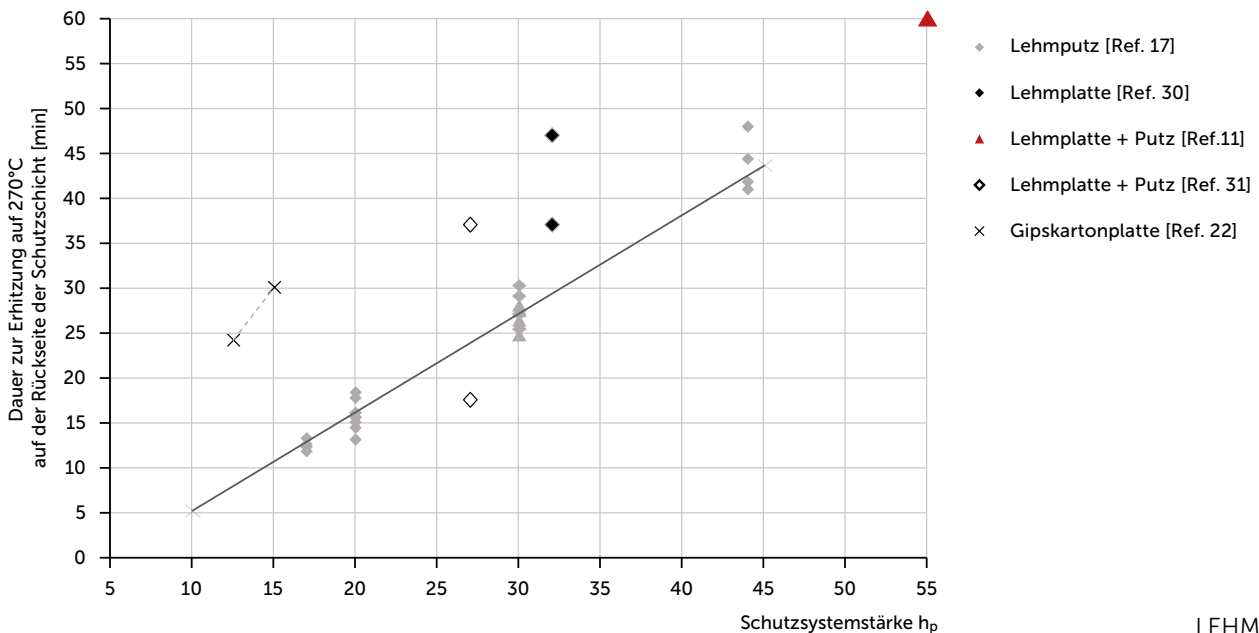
06 Ergebnisse der Brandversuche: Schutzdauer in Abhängigkeit von der Putzstärke

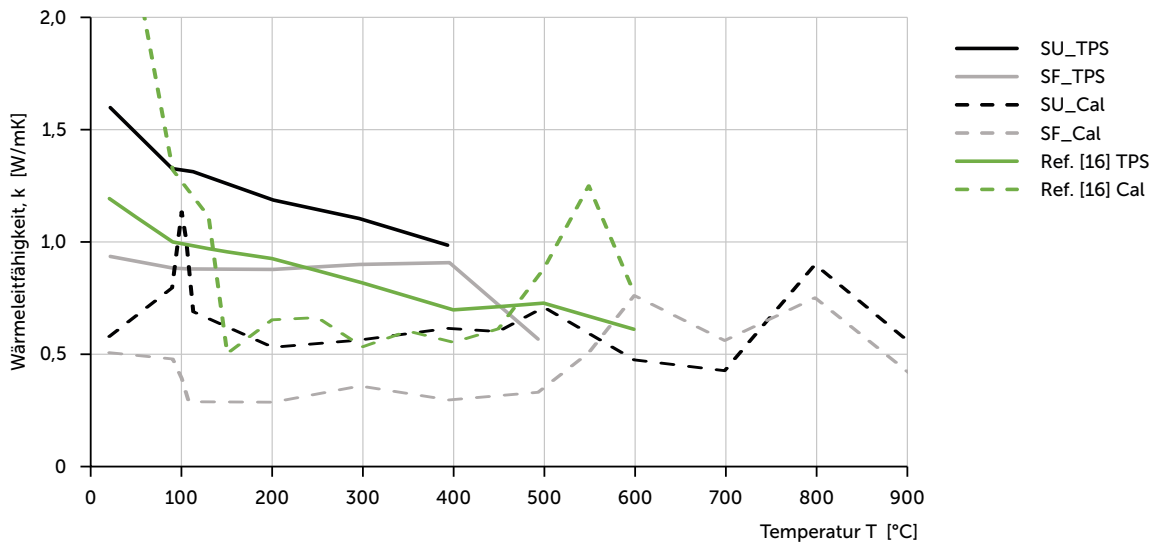


07 Ergebnisse der Brandversuche: Schutzfaktoren in Abhängigkeit zu den Putzstärken

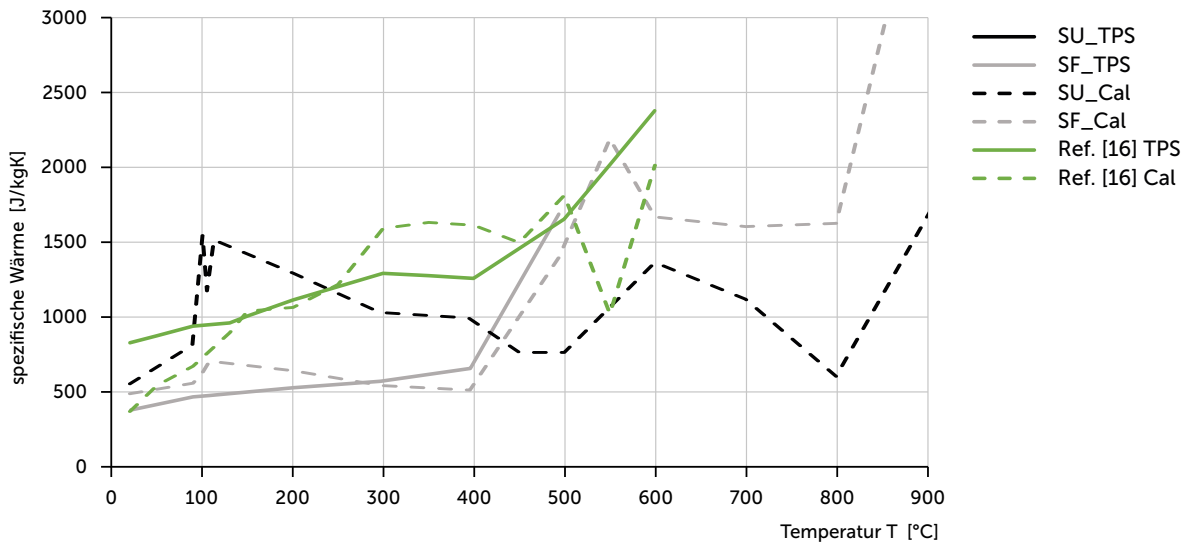


08 Vergleich der Testergebnisse mit anderen Materialkombinationen, die im Brandversuch getestet wurden





09 Vergleich der gemessenen und kalkulierten temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit



10 Vergleich der gemessenen und der kalkulierten temperaturabhängigen spezifische Wärme

der Schilfrohrplatte fällt (siehe Tabelle 3: Test 8, 9). Bei dünneren Putzlagen auf Schilfrohrmatten geschieht dies nach der gleichen Zeit, wenn etwa 400°C auf der Holzoberfläche erreicht sind und der Putzaufbau herunterfällt, da sich die befestigten Klammern lösen. Dies war in Test 6 (CT Putzprobe) der Fall, der einen deutlich früheren Versagenszeitpunkt hatte, verglichen zu den Tests 3 und 4. Hauptgrund hierfür war eine ungünstige Befestigungsdichte der Schilfrohrmatte. Im Falle einer größeren Putzstärke (Test 7 und 11) war eine Ablösung einer äußeren Putzschicht zu verzeichnen (Abb. 5), die durch einen höheren Temperaturgradienten und Wassertransport innerhalb des Putzes bedingt ist. Brandversuche an Lehmplatten mit Leichtzuschlägen und Lehmputzverkleidung zeigten hingegen kaum Rissentwicklung [11].

Zwei zusätzliche Brandversuche in einer kleineren Brennkammer wurden zur Überprüfung durchgeführt [27]. Dies erfolgte als Brandversuch mit der SF Putzprobe, welche einen größeren Schutzeffekt zeigte [29]. Der Überprüfungstest wurde an einer Holztafel (38 × 500 × 500 mm) durchgeführt, auf die eine Schilfrohrmatte und ein 30 mm starker Putz aufgetragen wurden. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Ergebnisse der Schutzdauer  $t_{prot,0,i}$  und den Schutzfaktor  $k_2$  im Vergleich zu den vorherigen Studien. Die Überprüfungstests korrelieren mit den Ergebnissen der SU Putzprobe, was bestätigt, dass der Schutzeffekt der SF Putzprobe in der vorherigen Studie [29] leicht überbewertet wurde (markiert in der gepunkteten Linie in Abb. 6)



Als Referenz lagen den Autoren einige Prüfberichte vor. Das Brandschutzsystem der Probekörper bestand dabei entweder nur aus Lehmplatten (Ref. [30]) oder Lehmputz und Lehmplatten (Ref. [31] [11]). Abbildung 8 zeigt die Dauer (in Abhängigkeit von der Putzstärke der Verkleidung) bis 270°C hinter der Schutzschicht erreicht sind. Für Referenz [30] und Referenz [31] wurden zwei Messpunkte festgelegt: Der niedrigere Wert bezieht sich auf die Dauer, die auf der Dämmung gemessen wurde, und der höhere Wert auf die Dauer, die auf dem Holzelement gemessen wurde. Die totale Testdauer der Prüfung in Referenz [11] war 60 Minuten, nach denen die Temperatur auf der Holzoberfläche etwa 230°C war, womit der Punkt in der Messkurve nicht ganz akkurat ist aber eine grobe Abschätzung liefert. Ein Vergleich zu 12,5 mm – 15 mm Gipskartonplatten ist möglich [6].

### Numerische Analyse

Erweiterte Berechnungsmethoden sind sehr hilfreich, da die Bewertung des Feuerwiderstandes von Bauteilen durch experimentelle Prüfungen sehr teuer, zeitaufwändig und nur bauteilbezogen angewendet werden kann. Um gültige numerische Vorhersagen treffen zu können, sind zuverlässige Daten zu den temperaturabhängigen Materialeigenschaften erforderlich.

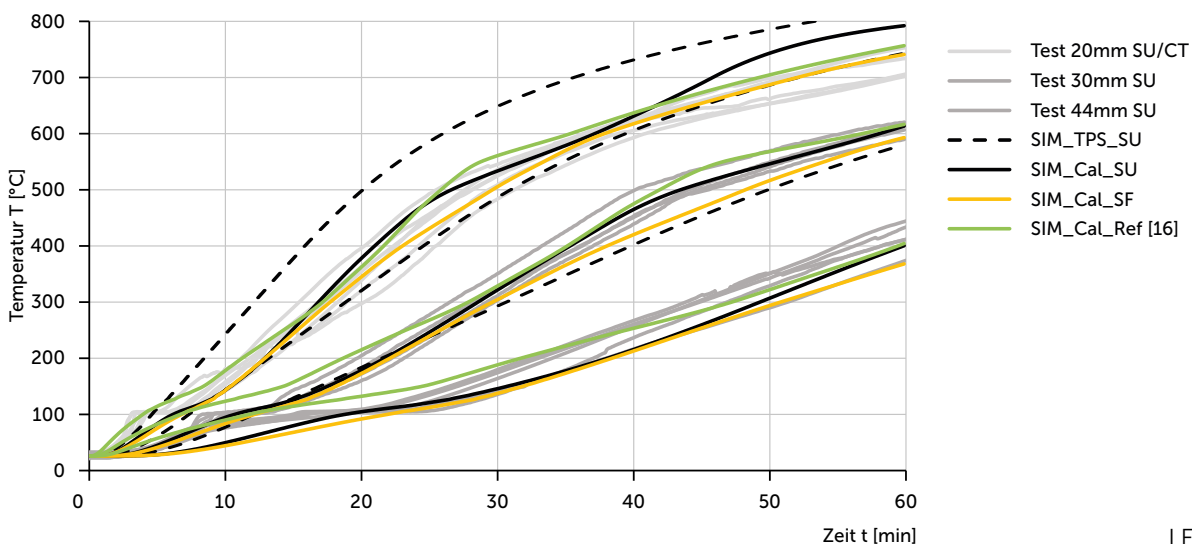
In dieser Studie werden die effektiven thermischen Eigenschaften des Lehmputzes vorgestellt, welche aus der thermischen Analyse gewonnen wurden. Die effektiven thermischen Eigenschaften (SU\_Cal und SF\_Cal) wurden unter Verwendung eines MATLAB Codes ermittelt, der von Mäger et al [32] entwickelt wurde. Die Eigenschaften wurden in Übereinstim-

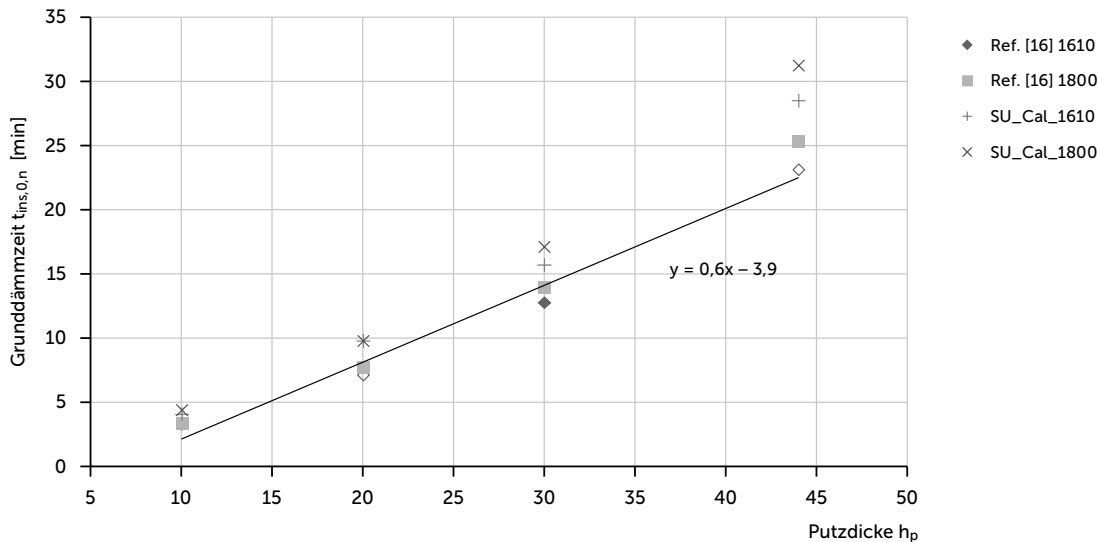
mung mit den Messungen aus den Brandversuchen kalibriert, was indirekt die Beachtung von Rissbildung, Schilfrohmatten etc. beinhaltet. Jedoch repräsentieren diese Eigenschaften genau genommen nicht zwingend reale physische Materialeigenschaften bei steigenden Temperaturen (z.B. Feuchtigkeitsgehalt und Materialbewegungen) [33]). Die Eingangsmessungen (markiert als TPS) sind in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt, neben den kalibrierten (effektiven) Eigenschaften (markiert als Cal).

Die numerischen Simulationen wurden mit einem SAFIR v2014a1 Computerprogramm [34] durchgeführt, wobei der Wärmeaustausch durch Weiterleitung in festen Materialien mittels der Fourier-Gleichung beschrieben wird. Die Materialeigenschaften sind durch Küppers et al [16] ermittelt worden und in Abb. 9 und Abb. 10 als Ref. markiert [16]. In diesem Fall wurde ein analoges Wärmemodell zur Durchführung der Simulationen genutzt. Die Dichte des Putzes wurde konstant gesetzt, da die Masseveränderung des Putzes unbedeutend ist und kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse hat [21].

Die Abb. 11 zeigt die Temperaturmessungen, die durch die Brandversuche ermittelt wurden (Tabelle 2) und die Ergebnisse der Simulationen. Die Simulationen mittels der TPS Ergebnisse als Eingangsdaten (SIM\_TPS\_SU) zeigen eine schwache Übereinstimmung mit den Brandversuchen, da sie extrem konservative (schnellere) Temperaturanstiege (gepunktete Linie) zeigen. Simulationen mit den effektiven thermischen Eigenschaften zeigen hingegen eine gute Übereinstimmung, insbesondere SIM\_Cal\_Ref. [16].

11 Gemessener und kalkulierter Temperaturanstieg am Übergang von SU Putzprobe und Holz. Kurvenverläufe für die Messungen an 3 unterschiedlichen Stellen der Prüfkörper.





12 Ergebnisse der Simulation für die Grunddämmzeiten

Die Grunddämmzeiten ( $t_{ins,0,i}$ ) wurden entwickelt für den Feuerwiderstand einer einzelnen Schicht ohne den Einfluss einer benachbarten Schicht. Ein Simulationsprogramm der Konfiguration 1, definiert in [21], wurde verfolgt. Unterschiedliche Stärken und Dichten (1610 und 1800 kg/m<sup>3</sup>) von Lehmputz wurden für das Temperaturkriterium von 160°C an der unbelasteten Seite durchlaufen. Die Ergebnisse zeigt Abb. 12 unter Verwendung von früheren Arbeiten von Küppers et al. [16] und SU\_Cal (Abb. 9 und Abb. 10). Weitere Untersuchungen zu tiefergehenden Analysen sollten dem folgen.

Entwurfsparameter

Entwurfsparameter unter Beachtung des überarbeiteten Eurocodes 5 sind vorhanden. Die aufgeführten Werte sind auf traditionelle Lehmputze begrenzt, welche gemäß DIN 18947 mit einer Rohdichteklasse 1,8 und Festigkeitsklasse S II klassifiziert sind. Die Entwurfsparameter für Wandkonstruktionen sind anwendbar für Putzstärken von 17 mm bis 44 mm. Deckenkonstruktionen sind auf 20 mm Putzstärke aufgebracht auf Schilfrohrmatten begrenzt. Die Putzarbeiten müssen strikt den Verarbeitungsrichtlinien und den Entwurfsregeln der EN 13914-2 [35] folgen.

Trennfunktionsmethode

Für Lehmputz und Schilfrohrmatten auf Holzkonstruktionen ist die Grundschutzzeit ( $t_{prot,0,i}$ ) (in Minuten) wie folgt zu kalkulieren [17]:

$$t_{prot,0,i} = 1.1 h_p - 5.9 \tag{1}$$

wobei  $h_p$  die Putzstärke in (mm) ist, gemessen von der Holzoberfläche.

Für Lehmputz ist die Grundschutzzeit ( $t_{ins,0,n}$ ) (in Minuten) wie folgt zu kalkulieren:

$$t_{ins,0,n} = 0.6 h_p - 3.9 \tag{2}$$

wobei  $h_p$  die Putzstärke in (mm) ist.

Für die Positionskoeffizienten  $k_{pos,exp,i}$  und  $k_{pos,unexp,i}$  sind die allgemeinen Werte für Verkleidungen gemäß Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 in [22] zu nutzen. Die Werte für Tabelle 5.3 gelten, wenn der Putz durch Holz verkleidet ist.

Der Entwurfsparameter (1) sollte ebenso für den Fall angewendet werden, dass Schilfrohrplatten als Putzträger auf Holz verwendet werden.

Methode der effektiven Querschnittseigenschaften

Für Lehmputz und Schilfrohrmatten auf Holzkonstruktionen ist der Startzeitpunkt der Verkohlung des Holzes ( $t_{ch}$ ) (in Minuten) wie folgt zu kalkulieren:

$$t_{ch} = t_{prot,0,i} = 1.1 h_p - 5.9 \tag{3}$$

wobei  $h_p$  die Putzstärke in (mm) ist, gemessen von der Holzoberfläche.

Der Entwurfsparameter (3) sollte für den Fall angewendet werden, dass Schilfrohrplatten als Putzträger auf dem Holz verwendet werden.

Für die Kapselungsphase (Abb. 1), also wenn  $t_{ch} \leq t \leq t_f$  ist, sind die allgemeinen Verkohlungsraten von Holz [6] mit dem Faktor  $k_2$  zu multiplizieren. Nach der Versagenszeit des Putzsystems sind die



Verkohlungsraten mit dem Faktor  $k_3$  zu multiplizieren. Die theoretischen Verkohlungsraten sollten wie folgt kalkuliert werden:

$$\beta_2 = k_2 \beta_0 \quad (4)$$

$$\beta_3 = k_3 \beta_0 \quad (5)$$

wobei hier  $\beta_0$  die allgemeine Entwurfsverkohlungsrate des Holzes ist [6].

Für Lehmputz und Schilfrohrmatten auf Holzkonstruktionen ist der Schutzfaktor ( $k_2$ ) wie folgt zu kalkulieren [13]:

$$k_2 = 1 - 0.01 h_p \quad (6)$$

wobei  $h_p$  die Putzstärke in (mm) ist, gemessen von der Holzoberfläche.

Für Lehmputz und Schilfrohrmatten auf Holzkonstruktionen ist die Versagenszeit des Putzsystems (in Minuten) wie folgt zu kalkulieren [13]:

$$t_f = t_{ch} + \frac{l_f - 10}{k_2 \beta_0} \quad (7)$$

Dabei sind:

$t_{ch}$  die Startzeit der Verkohlung in (min) ist (3),

$l_f$  die Länge der Befestigungen (der Matten) in (mm),

$k_2$  der Schutzfaktor (6), und

$\beta_0$  die allgemeine Verkohlungsrate in (mm/min) [6].

Die Entwurfparameter (6) (7) sind anzuwenden, wenn die Befestigungen der Schilfrohrmatten mit Klammern (die nicht kürzer als 25 mm sind) mit der Klammerpistole erfolgt. Die Klammern sollten mit einem maximalen Abstand von 10 cm entlang der Verbindungsdrähte der Matten erfolgen.

Für Lehmputz auf Schilfrohrplatten auf Holzkonstruktionen ist die Versagenszeit des Putzsystems wie folgt zu kalkulieren:

$$t_f = t_{ch} = t_{prot,0,i} = 1.1 h_p - 5.9 \quad (8)$$

wobei hier  $h_p$  die Putzstärke in (mm) ist, gemessen von der Oberfläche der Schilfrohrplatte.

## Diskussion

Hinsichtlich der geprüften Putze ist der Schutzeffekt durch die Putzstärke bestimmt. Dennoch zeigten Studien von Küppers (und Wachtling) et al. [11] [18], dass bestimmte Zusätze den Brandschutz erhöhen könnten. Zur Optimierung des Entwurfes könnte die Verbesserung der Lehmputze in Bezug auf Feuerwirkung von zukünftigem Interesse sein. Weitere Forschungsarbeiten sollten thermophysikalische Untersuchungen beinhalten, um den Effekt von Feuchtetransport und seinen Einfluss zu verstehen, damit genauere effektive thermische Eigenschaften erreicht werden können.

Die Putzträger spielen eine Schlüsselrolle bei der Versagenszeit der Putzsysteme. Experimentelle Prüfungen zeigten einen starken Verbund zwischen dem Putz und den Drähten der Schilfrohrmatten, was bedeutet, dass der Lehmputz einen langanhaltenden Schutz liefern könnte, wenn er ordnungsgemäß gesichert ist. Der Feuchtetransport und das Ablösen von Putzschichten sollten Gegenstand weiterer Studien sein. Ein besseres Brandverhalten wurde für Materialkombinationen von Lehmputz und Schilfrohrplatten ermittelt [11] [30] [31]. Bei zukünftigen Forschungen sollte die Adhäsion zwischen dem Putz und den Befestigungssystemen der Lehmplatten auf den Holzkonstruktionen beachtet werden.

Die Prüfungen mit den Schilfrohrplatten zeigten ein hohes Potenzial, da die Verkohlung des Holzes deutlich verzögert wurde (Tabelle 3), im Gegensatz zu der frühen Versagenszeit des Putzes. Die Fugen zwischen den Platten sind sehr anfällig für direkte Feuerwirkung. Daher sollte die Befestigung des Putzes verbessert werden, um einen besseren Brandschutz zu erreichen. Ansonsten bleibt der Schutzeffekt allein abhängig von dem Verhalten des Putzes selbst. Das gleiche Verhalten wird für Putze auf historischen Putzträgern wie Holzlatten angenommen.

## Zusammenfassung

Es wurde ein Überblick über das Brandverhalten von Lehmputzsystemen auf Holzkonstruktionen präsentiert. Lehmputze können einen hinreichenden Brandschutz bieten, wenn ihr Trägermaterial ordnungsgemäß geschützt ist. Die Entwurfparameter des Eurocode 5 werden empfohlen, da sie eine Wissensgrundlage für die 1:1 Brandversuche gemäß EN 13381-7 [36] bieten. Die Autoren glauben, diese Forschung verbessert die Brandbewertung und die

Brandschutz-Anwendung von existierenden Lehmputzsystemen in historischen Gebäuden und kann so als Grundlage neuer Entwicklungen dienen.

### Danksagungen

Die Autoren danken vielmals Saviukumaja OÜ und Claytec e.K für Ihre Kooperation. Ein besonderer Dank geht an die iBMB/TU Braunschweig und RISE Sweden für ihre Unterstützung und Bereitstellung von Untersuchungseinrichtungen. Diese Forschung wurde unterstützt durch das Estonian Research Council grant (PUT794) und Estonian Centre of Excellence in Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts, ZEBE [grant no. 2014-2020.4.01.15-0016], gefördert durch den European Regional Development Fund.

### Referenzen

- [1] Volhard, F. (2016) *Light Earth Building – A Handbook for Building with Wood and Earth*. Birkhäuser <https://doi.org/10.1515/9783035606454>
- [2] Reinboth, L. (2014) *Holz und Feuer. Bauen mit Holz*, 10.2014. Bruderverlag Albert Bruder GmbH & Co.KG, Köln.
- [3] Klinge A., Roswag-Klinge E., Fontana P., Hoppe J., Richter M., Sjöström, C. (2016) *Reducing the need for mechanical ventilation through the use of climate-responsive natural building materials*. In: Lehm 7th International Conference on Building with Earth. Deutschland.
- [4] Jörchel, S. (2019) *Modern Earth Building – the Current State of Earth Building from a German Perspective*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 290 012018
- [5] COST Action FP1404 – *Fire safe use of bio-based building products*. <https://costfp1404.ethz.ch/About.html>
- [6] EN 1995-1-2:2004 *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design*. CEN.
- [7] EN 1363-1: 2014 *Fire resistance tests – Part 1: General Requirements*. CEN.
- [8] Džidić, S. (2017) *Fire resistance of the straw bale walls*. Zbornik Radova Građevinskog Fakulteta, 33(30), 423-432. doi: 10.14415/konferencijagfs2017.044
- [9] Wall, K., Walker, P., Gross, C., White, C., & Mander, T. (2012) *Development and testing of a prototype straw bale house*. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials, 165(6), 377–384. doi: 10.1680/coma.11.00003
- [10] Chorlton, B., & Gales, J. (2020) *Fire performance of heritage and contemporary timber encapsulation materials*. Journal of Building Engineering, 29 (March). doi: 10.1016/j.jobe.2020.101181
- [11] Wachtling, J., Hosser, D. & Zehfuß, J. (2013) *Fire protection of multi-storey straw bale buildings. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation – Zingoni (Ed.)*. Taylor and Francis Group, London.
- [12] EN 13501-2:2016: *Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*, CEN.
- [13] Liblik, J. & Just, A. (2017) *Design parameters for timber members protected by clay plaster at elevated temperatures*. In: Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research (INTER), Kyoto, Japan. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2017; 375-389.
- [14] Liblik, J. Küppers, J. Just, A., Zehfuß, J. & Ziegert, C. (2018) *Fire safety of historic timber buildings with traditional plasters in Europe*. Proceedings of World Conference on Timber Engineering: World Conference on Timber Engineering, Seoul, Südkorea.
- [15] Liblik, J., Küppers, J., Maaten, B., & Just, A. (2020) *Fire protection provided by clay and lime plasters*, Wood Material Science & Engineering, DOI: 10.1080/17480272.2020.1714726
- [16] Küppers, J.; Gößwein, L.; Liblik, J.; Mäger, K. N. (2018) *Numerical investigations on heat transfer through claddings of bio-based building materials*. Proceedings of 5th Symposium Structural Fire Engineering: 5th Symposium Structural Fire Engineering, Braunschweig, Deutschland, 18.09.2018. Ed. Zehfuß, J. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig.
- [17] Liblik, J., Küppers, J., Just, A., Maaten, B. and Pajusaar, S. (2019) *Material properties of clay and lime plaster for structural fire design*. Fire and Materials, 2019, 1–11. doi:10.1002/fam.2798
- [18] Küppers, J. *Grundlagenuntersuchungen zum Brandverhalten von WDVS mit nachwachsenden Rohstoffen*, (zum Druck freigegeben und zugelassene) Dissertation (PhD), TU Braunschweig.
- [19] Asdrubali, F., Bianchi, F., Cotana, F., D'Alessandro, F., Pertosa, M., Pisello, A. L., & Schiavoni, S. (2016) *Experimental thermo-acoustic characterization of innovative common reed bio-based panels for building envelope*. Building and Environment, 102, 217–229. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.03.022
- [20] Schleifer, V. (2009) *Zum Verhalten von raumabschließenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*, PhD Thesis. ETH Zürich.
- [21] Mäger, K.N., Just, A. Schmid, J., Werther, N., Klippel, M., Brandon, D. & Frangi, A. (2019) *Procedure for implementing new materials to the component additive method*. Fire Safety Journal, vol 107, 149-160.
- [22] Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., Frangi, A., König, J., Dhima, D., Hakkarainen, T., Bregulla, F. (2010) *Fire Safety in Timber Buildings*, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm.

- [23] CEN TC250 SC5.T4 EN1995-1-2:2020 *Eurocode 5-Design of Timber Structures. Part 1-2: General. Structural Fire Design*. 2nd Draft May 3 2020.
- [24] DIN 18947:2015 *Earth Plasters – Terms and definitions, requirements, test methods*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.).
- [25] Liblik, J. (2017) *Model-scale tests with clay plaster*. Test Report 4P06479-05. RISE Fire Research, Stockholm, Schweden.
- [26] Liblik, J. (2019) *Furnace tests with clay and lime plaster on timber*. Test Report BS201902. iBMB, TU Braunschweig.
- [27] Liblik, J. (2019) *Small-scale furnace tests with clay plaster and timber*. Test Report BS201905. iBMB, TU Braunschweig.
- [28] EN ISO 22007-2: 2015. *Plastics–determination of thermal conductivity and thermal diffusivity–part 2: transient plane heat source (hot disc) method*.
- [29] Liblik J, Just A. (2016) *Performance of constructions with clay plaster and timber at elevated temperatures*. In: SBE16 Tallinn and Helsinki Conference Build Green and Renovate Deep. Energy Procedia. 2016;96: 717-728.
- [30] Test Report (2018) *Prüfbericht Nr. PB 3.2/18-111-1. 31.05.2018*. MFPA Leipzig GmbH.
- [31] Test Report (2017) *Prüfbericht Nr. PB 3.2/16-288-3. 02.10.2017*. MFPA Leipzig GmbH.
- [32] Mäger, K.N., Brandon, D., Just, A. *Determination of the effective thermal properties for thermal simulations*. (2016) Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research, Meeting 49, 16-19.08.2016. Graz, Österreich.
- [33] Van der Heijden, G.H.A., Pel, L., Huinink, H.P., Kopinga, K. *Moisture transport and dehydration in heated gypsum, an NMR study* (2011) Chemical Engineering Science, 66, 4241-4250.
- [34] Franssen, J.M. & Gernay, T. (2017) *Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities*. Journal of Structural Fire Engineering, Vol 8, No. 3, pp 300-323.
- [35] EN 13914-2:2016 *Design, preparation and application of external rendering and internal plastering*. Internal plastering. CEN.
- [36] EN 13381-7:2019 *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied protection to timber members*. CEN.

### Kontaktangaben

E-Mail: johanna.liblik@taltech.ee

