



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

Analyse der raumabschließenden Funktion von Holztafelelementen mit biogenen Dämmstoffen mittels additiven Verfahrens unter Herleitung temperaturabhängiger Materialkennwerte

Dipl.-Ing. (BA) Veronika Hofmann, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design

der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

2. Prof. Dr.-Ing. Andrea Frangi, ETH Zürich, Schweiz

Die Dissertation wurde am 06.12.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 03.05.2022 angenommen.





## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion und in Anschluss als externe Wissenschaftlerin an der Technischen Universität München in den Jahren 2015-2021.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter für die fachlich motivierende Betreuung dieser Dissertation und die kreativen Impulse zu dieser Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung, die es mir erlaubte, Familie und Wissenschaft während dieser Zeit zu vereinbaren.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andrea Frangi von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie für die Abwicklung des Promotionsverfahrens.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion danke ich für das stets freundschaftliche Arbeitsklima und die gemeinsamen Erfolge. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Norman Werther für die fachlich kompetenten Diskussionen und wertvollen Ratschläge während meiner gesamten Tätigkeit am Lehrstuhl und darüber hinaus.

Herzlicher Dank gilt der Arbeitsgruppe Brandschutz für alle fachlichen Diskussionen und die schöne Zusammenarbeit im Rahmen aller Projekte.

Herrn Prof. Alar Just und Frau Katrin Mäger danke ich für die konstruktiven Anregungen innerhalb der COST Action FP1404.

Besonderer Dank gilt der Forschungsinitiative Zukunft Bau sowie dem Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V. und der Firma ISOCELL GmbH, die das Projekt finanziell unterstützt haben. Zusätzlich bedanke ich mich herzlich bei den Unternehmen, die Prüfberichte für die Datenbank zur Verfügung gestellt haben:

- STEICO SE, Feldkirchen
- ISOCELL GmbH, Neumarkt am Wallersee
- INTHERMO GmbH, Ober-Ramstadt
- isofloc Wärmedämmtechnik GmbH, Lohfelden
- GUTEX Holzfaserplattenwerk, H. Henselmann GmbH & Co.KG, Waldshut-Tiengen
- best wood Schneider GmbH, Eberhardzell
- Holzbau-Deutschland – Institut e.V.
- Pavatex, SOPREMA GmbH, Mannheim



Herzlicher Dank gilt meiner gesamten Familie für ihre wertvolle und einzigartige Unterstützung. Vor allem möchte ich mich bei meinem Mann und meinen beiden Töchtern bedanken, die stets an mich geglaubt haben und mir unter großen Entbehrungen Freiräume zur Gestaltung dieser Arbeit ermöglicht haben.

München, im September 2021

Veronika Hofmann

## Kurzfassung

Neben der Anforderung an die Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Brandfall müssen Holzbauteile wie Decken- und Wandelemente oftmals auch eine raumabschließende Funktion erfüllen, um die Ausbreitung von Feuer und Rauch auf andere Brandabschnitte zu verhindern. Bei der Konstruktion dieser Decken- und Wandelemente in Holzbauweise gilt es zusätzlich, die Aspekte des Wärme-, Schall- und Feuchteschutzes zu berücksichtigen. Die jeweiligen Ansprüche beachtend, werden eine Vielzahl an Konstruktionsmöglichkeiten im Hinblick auf die Kombination von Dämm- und Bekleidungswerkstoffen angeboten. Durch den Einsatz eines additiven Berechnungsmodells zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzkonstruktionen wird es möglich, diese Konstruktionsvielfalt durch den Beitrag einzelner Materialschichten zu berücksichtigen. Biogene Dämm- und Bekleidungsstoffe aus Zellulose und Holzfasern blieben bisher trotz der ansteigenden Nachfrage, ihrer hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften und ihrer sehr guten Ökobilanz beim Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzkonstruktionen unberücksichtigt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermöglichung des brandschutztechnischen Nachweises zum Raumabschluss von Holzkonstruktionen mit Dämm- und Bekleidungsstoffen aus Zellulose- und Holzfasern mittels eines Berechnungsmodells. Zu diesem Zweck wird das auf Brandversuchen und numerischen Simulationen gründende, bestehende additive Berechnungsmodell nach Schleifer [120] erweitert. Hierzu werden Gleichungen zur Ermittlung einer definierten Schutz- oder Isolationszeit von Zellulose- oder Holzfaserdämmstoffen entwickelt. Die Grundlagen zur Ermittlung dieser Gleichungen bilden die Temperaturfeldberechnung durch die Anwendung der Finiten-Elemente-Methode und die hierfür benötigte Bestimmung der temperaturabhängigen Materialkennwerte, wie der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmespeicherkapazität und der Rohdichte. Eine Analyse verschiedener Messmöglichkeiten zur Bereitstellung der gesuchten Materialparameter unter erhöhten Temperaturen zeigt deutliche Einschränkungen für brennbare Dämmstoffe. Entsprechend liefert die experimentelle Untersuchung ausschließlich Werte bis zur Entzündungstemperatur der untersuchten Materialien. Eine Ausnahme bildet die Bestimmung der Rohdichte als Ergebnis des Masseverlustes durch eine Thermogravimetrische Analyse bis 1200°C. Durch eine systematische Änderung ausgewählter Materialkennwerte werden numerische Simulationskurven an Temperatur-Zeitkurven aus durchgeführten Brandversuchen angepasst und dadurch fehlende Materialparameter über die Entzündungstemperatur hinweg ergänzt. Über dies hinaus werden durch die gezielte Änderung der Materialkennwerte Reaktionen im Material, wie die Entweichung von Wasser oder der Pyrolysevorgang berücksichtigt. Die auf den effektiven Materialkennwerten basierenden numerischen Simulationen ermöglichen die Analyse einer Vielzahl an Konstruktionsvarianten und führen zu den gesuchten Schutz- und Isolationszeiten sowie Beiwerten des Berechnungsmodells für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe. Durch die Berücksichtigung eines vorzeitigen Herausfallens der Dämmung, welches durch eine thermisch induzierte Schrumpfung des biogenen Dämmstoffes ausgelöst wird, sowie dem Anrechnen der Versagenszeiten aller schützender Schichten im Konstruktionsaufbau, wird das Berechnungsverfahren entscheidend für

die Aufnahme biogener Dämmstoffe erweitert. Ein Vergleich der Rechenergebnisse unter Berücksichtigung der ermittelten Gleichungen mit ausgewerteten Daten gesammelter Großbrandversuche validiert das erweiterte Berechnungsmodell.

## Abstract

In addition to the requirements for the structural fire safety of timber structures, ceiling and wall elements must have a separating function in accordance with fire protection requirements to avoid the spread of fire and smoke from one fire compartment to another. In addition, the aspects of thermal and building physics must be taken into account in the design of ceiling or wall assemblies in timber construction. Considering the respective requirements, a variety of design options could be provided using several insulation and lining materials. The component additive method supplies a calculation model to verify the separating function of these design variety of timber assemblies. Despite a growing demand and the advantages like excellent physical properties and sustainable properties (eco-balance), bio-based insulation and lining materials of cellulose and wood fibres have not been taken into account by this method.

The aim of this work is to allow the use of insulation and lining materials of cellulose and wood fibres in timber assemblies by a calculation model taking into account the requirements of the separating function. For this purpose, the consisting component additive method according to Schleifer [120] is expanded, based on fire tests and numerical simulations. Therefore, equations are developed to determine the protection or insulation times of cellulose or wood fibre insulation materials. The basis for determining these equations is formed by temperature field calculations using the finite element method and the determination of the temperature-dependent material properties required for this, such as the thermal conductivity, specific heat capacity and density. The analysis of measuring options for the required material properties at elevated temperatures shows significant restrictions for combustible materials. In correspondence with these restrictions, the experimental analysis provides material properties up to the ignition temperature of cellulose or wood fibre insulation materials. The only exception is the density as a result of mass loss with results up to 1200°C by using thermo-gravimetric tests. By systematic modification of selected material properties, numerical simulation curves are fitted to the temperature-time curves based on fire tests. Beyond the ignition temperature missing material properties could be complemented. Furthermore, the reactions within the investigated materials like water vapour emission and pyrolysis are considered by the targeted modification of material properties. The numerical simulations based on the effective material parameters enable the analysis of a large number of construction variants and lead to the protection and insulation times as well as coefficients of the component additive model for cellulose and wood fibre insulation materials. The calculation model could significantly be extended considering an early fall-off of the insulation material initiated by its thermally induced shrinking and furthermore taking into account the examined failure time of the protective layers. A comparison of the time after reaching critical temperature of the determined equations with evaluated data of collected large-scale fire tests validates the extended calculation model.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	- 1 -
1.1	Ausgangslage .....	- 1 -
1.2	Problemstellung .....	- 1 -
1.3	Zielsetzung.....	- 3 -
1.4	Abgrenzung.....	- 3 -
2	Nachweisverfahren zum Raumabschluss.....	- 5 -
2.1	Allgemeine Anforderungen an den Raumabschluss .....	- 5 -
2.2	Additives Verfahren nach Schleifer .....	- 6 -
2.3	Additives Verfahren gemäß des Entwurfes EN 1995-1-2:2021 .....	- 11 -
2.4	Schlussfolgerung .....	- 15 -
3	Grundlagen des Wärme- und Stofftransportes infolge von Brandbeanspruchung.....	- 16 -
3.1	Arten der Wärmeübertragung .....	- 16 -
3.1.1	Wärmeleitung .....	- 16 -
3.1.2	Konvektion .....	- 19 -
3.1.3	Wärmestrahlung .....	- 22 -
3.2	Phasenumwandlung .....	- 29 -
3.3	Feuchtetransport.....	- 30 -
4	Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe .....	- 31 -
4.1	Allgemeines .....	- 31 -
4.2	Eigenschaften unter erhöhten Temperaturen.....	- 34 -
4.3	Konstruktionsvarianten.....	- 36 -
5	Temperaturabhängige Materialkennwerte für eine thermisch transiente Analyse .....	- 38 -
5.1	Grundlagen .....	- 38 -
5.2	Messverfahren zur Bestimmung temperaturabhängiger Materialkennwerte biogener, faseriger Dämmstoffe .....	- 40 -

5.2.1	Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit	- 40 -
5.2.2	Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen, spezifischen Wärmekapazität	- 44 -
5.2.3	Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen Rohdichte	- 46 -
5.3	Experimentell bestimmte Materialeigenschaften für Zellulose und Holzfasern.....	- 48 -
5.3.1	Wahl und Beschreibung der Messverfahren	- 48 -
5.3.2	Messergebnisse flexible Holzfaserdämmung	- 50 -
5.3.3	Messergebnisse Zellulosedämmung	- 55 -
5.3.4	Schlussfolgerung und Gegenüberstellung der Messergebnisse mit dem Werkstoff Holz	- 58 -
5.4	Analyse effektiver Materialkennwerte .....	- 60 -
5.4.1	Verwendete Ausgangswerte	- 60 -
5.4.2	Methode zur Anpassung der Materialkennwerte	- 64 -
5.4.3	Effektive Kennwerte für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe	- 73 -
5.4.4	Gegenüberstellung mit dem Werkstoff Holz	- 76 -
6	Numerische Simulation .....	- 80 -
6.1	Grundlagen.....	- 80 -
6.2	Modellauswahl.....	- 80 -
6.3	Ermittlung der Grundzeiten und Beiwerte.....	- 81 -
7	Bemessungsgleichungen für den Raumabschluss .....	- 86 -
7.1	Ergebnisse .....	- 86 -
7.1.1	Gleichungen	- 86 -
7.1.2	Versagenszeiten	- 89 -
7.2	Validierung und Berücksichtigung des Schrumpfens.....	- 92 -
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	- 105 -
8.1	Zusammenfassung.....	- 105 -



Inhaltsverzeichnis

8.2	Ausblick.....	- 106 -
9	Literatur .....	- 107 -
10	Abbildungsverzeichnis.....	- 118 -
11	Tabellenverzeichnis.....	- 123 -
Anhang A	Tabellen .....	- 125 -
Anhang B	Abbildungen .....	- 127 -

## Symbole und Abkürzungen

Große lateinische Buchstaben:

$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Strahlungsaustauschzahl	[-]
$\dot{E}$	Wärmestrom eines Körpers	[W]
$\dot{E}_S$	Wärmestrom schwarzer Körper	[W]
$E$	Energie	[J]
$H$	Enthalpie	[J]
$H_{\text{lat}}$	Latente Wärme pro Volumeneinheit	[kJ/m <sup>3</sup> ]
$I$	Spektrale Strahlungsintensität	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_S$	Spektrale Strahlungsintensität des schwarzen Körpers	[W/m <sup>2</sup> ]
$K_S$	Effektiver Absorptionskoeffizient von Ruß und Asche	[m <sup>-1</sup> ]
$L$	Länge	[m]
$P$	Leistung	[W]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$S$	Gleichmäßige Ausdehnung der Gasschicht	[m]
$T$	Absolute Temperatur (Kelvintemperatur)	[K]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]

Kleine lateinische Buchstaben:

$a$	Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]
$e$	Einheitsvektor	[-]
$h$	Dicke	[mm]
$h_p$	Gesamtdicke	[mm]
$h$	Spezifische Enthalpie	[J/kg]
$\Delta h$	Verdampfungsenergie von Wasser	[kJ/kg]
$h_{\text{um}}$	Umwandlungsenthalpie	[J/kg]
$k$	Beiwert	[-]
$k_h$	Dickenfaktor	[-]
$k_2$	Faktor zur Berücksichtigung des fire protection system	[-]
$m$	Masse	[kg]
$m_0$	Ausgangsmasse	[kg]
$\dot{m}_{\text{Strom}}$	Transportstromdichte	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$\dot{q}_{\text{konv}}$	Wärmestromdichte durch Konvektion	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{\text{str}}$	Wärmestromdichte durch Strahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{\text{Strom}}$	Wärmestromdichte	[W/m <sup>2</sup> ]
$s$	Abstand zwischen zwei Flächen	[m]
$s(\vartheta)$	Temperaturabhängige Wärmespeicherzahl	[J/(m <sup>3</sup> K)]
$t$	Zeit	[min]

### Symbole und Abkürzungen

$U$	Feuchtegehalt des untersuchten Stoffes	[M-%]
$v_{\text{rec}}$	Rückzugsgeschwindigkeit	[mm/min]
$w$	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
$w_q$	Wärmequellichte	[W/m <sup>3</sup> ]

### Griechische Buchstaben:

$\alpha$	Absorptionsgrad	[-]
$\alpha_{\text{konv}}$	Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$\alpha_{\text{Str}}$	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$\beta$	Winkel	[-]
$\beta$	Heizrate	[K/s]
$\beta_0$	Eindimensionale Abbrandrate	[mm/min]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[-]
$\varepsilon_{\text{Fl}}$	Emissionsgrad Flamme	[-]
$\varepsilon_{\text{G}}$	Emissionsgrad Gas	[-]
$\vartheta$	Celsius Temperatur	[°C]
$\vartheta_{\text{ASTM}}$	Adiabate Heißgastemperatur	[°C]
$\vartheta_{\text{B}}$	Brandraumtemperatur	[°C]
$\vartheta_{\text{H}}$	Heißgastemperatur	[°C]
$\vartheta_{\text{O}}$	Temperatur der Oberfläche	[°C]
$\vartheta_{\text{Str}}$	Strahlungstemperatur	[°C]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]
$\rho$	Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Reflexion	[-]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
$\tau$	Transmissionsgrad	[-]
$\varphi$	Einstrahlzahl	[-]
$\Delta$	Änderung	[-]

### Indizes:

exp	Beanspruchte Seite
eff	Effektiv
F	Fluid
f	Versagen
$i$	Nummer der Schicht
ins	Isolationsschicht
j	Fuge
krit	kritisch
max	Maximal
O	Oberfläche
pos	Position

## Symbole und Abkürzungen

pr	Fire protection system
prot	Schutzschicht
unexp	Unbeanspruchte Seite
w	Wand
x,y,z	In x Richtung, in y Richtung, in z Richtung

## Abkürzungen:

EPS	Expandiertes Polystyrol (Dämmung)
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
FE(M)	Finite-Elemente-(Methode)
DTG(A)	Differenzierte Thermogravimetrische (Analyse)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
MHP	Massivholzplatte
OSB	Oriented Strand Board
PIR	Polyisocyanurat (Dämmung)
PL	Protection Level
PUR	Polyurethan (Dämmung)
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
SW	Steinwolle (Dämmung)
TG(A)	Thermogravimetrische (Analyse)
THD	Transient Hot Disk
XPS	Extrudiertes Polystyrol (Dämmung)

## 1 Einführung

### 1.1 Ausgangslage

Durch die Auswirkungen der Energiekrise in den siebziger Jahren wurde der Einsatz von Dämmstoffen im Wohnungsbau unter Berücksichtigung der ersten Wärmeschutzverordnung gefördert. Vorausgehend wurden infolge der Bombenangriffe während des zweiten Weltkrieges Verordnungen erlassen, die durch den Einsatz überwiegend nichtbrennbarer Bauteile zur Verminderung der Brandgefahr beitragen sollten. Darauf aufbauend wurden der Bauindustrie weitestgehend industriell hergestellte, nicht brennbare oder schwer entflammbare Dämmstoffe aus Mineralfasern oder Kunststoffen zur Verfügung gestellt.

Unter Berücksichtigung des Aspekts der Nachhaltigkeit gewinnen derzeit jedoch immer häufiger biogene Baustoffe an Bedeutung. Dem Wunsch nach ressourceneffizienten und energetisch optimierten Holzbaukonstruktionen nachgehend, werden biogene Dämmstoffe und Bekleidungsstoffe aus Holzfasern und Zellulose zunehmend in Wand- und Deckenelementen integriert. Sie weisen eine sehr gute Ökobilanz auf und besitzen optimale bauphysikalische Eigenschaften, wie eine hohe Wärmespeicherkapazität und Rohdichte, die zu einem hervorragenden sommerlichen Wärmeschutz führen. Innerhalb dieser Holzkonstruktionen, die vorwiegend in Holztafelbauweise ausgeführt sind, dienen die linearen Holzbauteile zur Lastabtragung. In die Hohlräume zwischen den Rahmenelementen werden meist Dämmstoffe eingebracht, um die bauphysikalischen Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz zu erfüllen. Zusätzlich wird die Konstruktion beidseitig mit mineralischen Platten, Holzwerkstoffplatten oder Holzfaserplatten bekleidet (vgl. Abbildung 1.1).

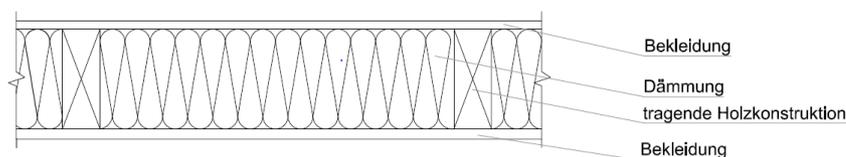


Abbildung 1.1: beispielhafter Aufbau eines Wandelementes im Holztafelbau

### 1.2 Problemstellung

Im Holztafelbau werden durch die großen Kombinationsmöglichkeiten von Bekleidungswerkstoffen und Dämmstoffen optimale Konstruktionen im Hinblick auf die verschiedenen bauphysikalischen Randbedingungen (Wärme, Schall, Feuchte) zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden jedoch in Abhängigkeit der jeweils geltenden Bauordnung brandschutztechnische Anforderungen an die tragende und raumabschließende Funktion dieser Bauteile gestellt.

Zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von raumabschließenden Holztafelementen mit Zellulose- oder Holzfaserdämmstoffen liegen nach DIN 4102-4 [34] mit Ausnahme der konser-

vativen Annahme eines ungedämmten Hohlraums und weniger Konstruktionen mit Holzfaserplatten keine weiteren normativen Nachweismöglichkeiten vor. Nur die Tragfähigkeit kann nach dem Modell von Tiso [140] bestimmt werden.

Das additive Berechnungsmodell nach Schleifer [120] liefert die Möglichkeit, die raumabschließende Funktion von Holzrahmenelementen verschiedener Ausfertigungen nachzuweisen. Diesem Modell liegen zahlreiche Brandversuche und numerische Untersuchungen zugrunde, aus welchen die Grundschutz- und Grundisulationszeiten und Beiwerte vieler im Holztafelbau verwendeter Materialien mit Ausnahme biogener Dämmstoffe generiert wurden. Im Entwurf der EN 1995-1-2 [69] ersetzt ein neues additives Bemessungsmodell basierend auf Schleifers Modell das derzeitige additive Bemessungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010 [55], das nur begrenzte Kombinationsmöglichkeiten von Bekleidungswerkstoffen und mineralischen Dämmstoffen zulässt.

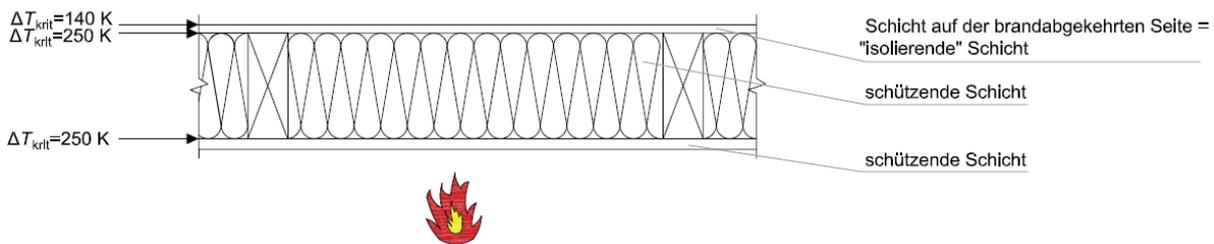


Abbildung 1.2: Kritische Temperaturerhöhung  $\Delta T_{krit}$  auf der brandabgekehrten Seite einer Schicht eines Wand- oder Deckenelementes gemäß dem Berechnungsmodell nach Schleifer [120]

Das von Schleifer entwickelte Modell ist jedoch nicht direkt auf biogene Dämmstoffe übertragbar. Denn als Temperaturkriterium zur Definition des Verlusts der Schutzwirkung einer schützenden Schicht (vgl. Abbildung 1.2) wird das Erreichen einer kritischen Temperaturerhöhung von 250 K auf der brandabgekehrten Seite der betrachteten Schicht vorgegeben. Für die letzte Schicht auf der brandabgekehrten Seite des untersuchten Wand- oder Deckenelementes wird das Erreichen einer kritischen Temperaturerhöhung von 140 K als Kriterium zur Beschreibung des Verlusts einer definierten Dämmwirkung maßgebend. Dies dient zum Schutz von Personen auf der brandabgekehrten Seite des betrachteten Elementes und zur Verhinderung der Entzündung der vom Feuer abgewandten Oberfläche oder von Materialien in der Nähe dieser Oberfläche. Für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe werden die Kennwerte des Wärmedurchgangs bis zum Erreichen dieser kritischen Temperaturerhöhung  $\Delta T_{krit}$  von 250 K / 140 K auf der brandabgekehrten Seite der betrachteten Dämmschicht nicht durchgehend ausschlaggebend für das Kriterium des Versagens ihrer Schutz- bzw. Dämmwirkung. Darüber hinaus muss für die betrachteten Dämmstoffe ein vorzeitiges Abfallen der Dämmstoffe durch Schrumpfen als weiteres Versagenskriterium berücksichtigt werden.

### 1.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung der Möglichkeit, eine Vielzahl von Konstruktionsoptionen mit biogenen Dämmstoffen effizient beurteilen zu können. Dadurch soll die Planung von Holztafelkonstruktionen mit Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen erleichtert und der Einsatz dieser Dämmstoffe deutlich erweitert werden. Hierfür sollen Bemessungsgleichungen entwickelt werden.

Numerische Simulationen ersetzen eine Vielzahl an kostenintensiven Brandversuchen. Das validierte numerische Modell nach Schleifer soll demnach um biogene Dämmstoffe erweitert werden. Für die thermische transiente Simulation sind temperaturabhängige effektive Materialkennwerte, wie die Rohdichte, die spezifische Wärmespeicherkapazität und die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen erforderlich. Zur Ermittlung dieser gesuchten effektiven Materialkennwerte sind experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der tatsächlichen Rohdichte, spezifischen Wärmespeicherkapazität und spezifischen Wärmeleitfähigkeit unter erhöhten Temperaturen bis zu 1000°C notwendig. Hierfür werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Messverfahren gesammelt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für brennbare Dämmstoffe analysiert. Unter Berücksichtigung verschiedener Reaktionen im Material, wie der Pyrolyse und der Entweichung von Wasser, werden durch den Vergleich von durchgeführten Brandversuchen mit numerischen Simulationen effektive Materialkennwerte erarbeitet. Mittels eines Angleichungsmodells wird die Simulationskurve durch eine gezielte Anpassung bestimmter Materialkennwerte den Temperatur-Zeit-Kurven von Brandversuchen angenähert. Auf Grundlage dieser ermittelten effektiven Materialkennwerte werden verschiedene Konstruktionen mithilfe der numerischen Simulation untersucht. Eine Auswertung aller Versuchsergebnisse liefert die gesuchten Schutz- und Isolationszeiten sowie Positionsbeiwerte für Dämm- und Bekleidungsstoffe aus Holzfaser oder Zellulose entsprechend des Berechnungsmodells nach Schleifer. Darüber hinaus ergänzt das Einbeziehen eines vorzeitigen Versagens der Dämmstoffe auf Basis von ausgewerteten Großbrandversuchen das bisherige Berechnungsmodell.

### 1.4 Abgrenzung

Die entwickelten Gleichungen und die Erweiterung der Versagenszeiten ermöglichen den Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen mit Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen auf Basis des weiterentwickelten Berechnungsmodells von Schleifer. Eine Bemessung in Anlehnung an den Entwurf der EN 1995-1-2 [69] erlaubt einen Nachweis für eine Feuerwiderstandsdauer von bis zu 120 Minuten. Der Tragsicherheitsnachweis im Brandfall muss außerdem separat geführt werden. Darüber hinaus liegt dem Berechnungsmodell die Anwendung der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1991-1-2 [54] zugrunde.

Um eine mögliche Brandbeteiligung von Zellulose- oder Holzfaserdämmstoffen in Holzkonstruktionen ausschließen zu können, ist bei mehrgeschossigen Holzgebäuden (ab der Gebäudeklasse 4) eine zusätzliche Anforderung an die brandschutztechnische Bekleidung zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist auf weitere konstruktive Maßnahmen zu achten, dazu gehören die Anordnung der Plattenstöße, die Ausbildung der Fugen im Bereich von Bauteilanschlüssen sowie die Anordnung der Verbindungsmittel. Durch diese konstruktiven Maßnahmen wird ein Glimmen der biogenen Baustoffe und eine Brandweiterleitung innerhalb der Holzkonstruktion sowie eine Erhöhung des Rauchpotentials nach der Entzündung des biogenen Dämmstoffes verhindert.

## 2 Nachweisverfahren zum Raumabschluss

### 2.1 Allgemeine Anforderungen an den Raumabschluss

Ziel des Brandschutzes ist die Begrenzung von Risiken für Menschen, die Gesellschaft, benachbarte Bauwerke und die Umgebung. Dafür sollen Bauwerke so entworfen und ausgeführt sein, dass der Entstehung eines Brandes sowie der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind (vgl. Musterbauordnung 2002 [14]).

Um dies zu gewährleisten, muss die Standsicherheit bei tragenden und aussteifenden Bauteilen über einen definierten Zeitraum erhalten bleiben. Außerdem soll die Ausbreitung von Feuer und Rauch durch Brandabschnitte und Bauwerksgrenzen so eingeschränkt werden, dass die Nutzung von Rettungswegen, der Schutz von Personen und Tieren und wirksame Brandbekämpfungsmaßnahmen über eine bestimmte Zeit (Feuerwiderstandsdauer) gewährleistet bleiben. Diese Abgrenzungen werden durch raumabschließende Bauteile, wie Wand-, Decken- und Dachelemente, und deren Bauteilanschlüsse sichergestellt, die einen Widerstand gegen die Brandausbreitung aufweisen. Dies gilt versuchstechnisch als gewährleistet, wenn ein raumabschließendes Bauteil die Fähigkeit zeigt, unter Feuerbeanspruchung von einer Seite, den Durchgang von Flammen und heißen Gasen oder die Erscheinung von Flammen sowie eine definierte Temperaturerhöhung auf der brandabgekehrten Seite während eines definierten Zeitraums und unter normierten Brandversuchsbedingungen gemäß DIN EN 1363-1 [46] zu verhindern. Die geforderte Leistung an das raumabschließende Bauteil wird durch die Feuerwiderstandsklasse unter der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (nominelle Brandbeanspruchung) nach DIN 1991-1-2 [54] festgelegt.

Gemäß DIN EN 1995-1-2:2010 [55] werden die geforderten Eigenschaften an das raumabschließende Bauteil sichergestellt, wenn das Bauteil folgende Kriterien einhalten kann:

- den Erhalt der Unversehrtheit (Dichtigkeit);
- den Erhalt der thermischen Wärmedämmeigenschaft;
- die Begrenzung der Wärmestrahlung auf der feuerabgewandten Seite.

DIN EN 1995-1-2 [55] gibt außerdem vor, dass Bauteile für eine raumabschließende Funktion unter Normbrandbeanspruchung die Kriterien der Unversehrtheit (Kriterium E) und, wenn gefordert, das Kriterium der Wärmedämmung (Kriterium I) erfüllen müssen. Das Kriterium I wird eingehalten, wenn der mittlere Temperaturanstieg auf der gesamten feuerabgewandten Oberfläche maximal 140 K beträgt und der maximale Temperaturanstieg an jedem Punkt 180 K nicht überschreitet. Sofern der Austritt von Heißgasen und das Öffnen von Fugen und Spalten auf der brandabgewandten Seite ausgeschlossen werden können, kann das Kriterium E als erfüllt angenommen werden, sofern die Anforderungen des Kriteriums I eingehalten werden.

## 2.2 Additives Verfahren nach Schleifer

Vanessa Schleifer entwickelte ein Berechnungsmodell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von massiven und mehrschichtigen Holzbauteilen [120]. Das Tragwerk der mehrschichtigen Holzkonstruktion besteht aus Wandstielen oder Deckenbalken oder alternativ aus Massivholzplatten oder Furnierschichtholzplatten. In die entstehenden Gefache zwischen den Stielen oder Balken wird oftmals Dämmung eingebracht. Dabei werden in der Regel Steinwolle, Glaswolle nach DIN EN 13162 [41] oder biogene Dämmstoffe beispielsweise aus Holz- oder Zellulosefasern nach DIN EN 13171 [42] oder DIN EN 15101-1 [51] eingesetzt. Als Bekleidung oder Bepunktung werden beidseitig Oriented Strand Boards (OSB) nach DIN EN 300 [56] und DIN EN 13986 [49], Gipsplatten nach DIN EN 520 [58], Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 [52], Spanplatten nach DIN EN 312 [57] und DIN EN 13986 [49], Sperrholzplatten nach DIN EN 636 [60] und DIN EN 13986 [49], Massivholzplatten nach DIN EN 13353 [43] und DIN EN 13986 [49] aber auch Holzfaserverplatten nach DIN EN 13171 [42] oder DIN EN 622-4 [59] und DIN EN 13986 [49] sowie Lehmplatten nach DIN 18948 [32] und Lehmputz nach DIN EN 13914-2 [47] [48] und DIN 18947 [31] verwendet. Der Einsatz anderer Bauprodukte entsprechend einer Technischen Baubestimmung oder den allgemein anerkannten Regeln der Technik, einer Europäische Technische Bewertung (ETA) mit einhergehender CE-Kennzeichnung, einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung (abZ), einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder eines allgemein bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses für das Bauprodukt (abP) ist ebenfalls möglich. Die Bekleidung der Holztafelelemente in Form von Platten werden einzeln oder in verschiedenen Kombinationen an den Holzbauteilen mit Holzverbindungsmitel wie Schrauben, Nägeln oder Klammern gemäß EN 1995-1-2 [69] oder bei Holzfaserverplatten auch mit Schraubbefestigern (z.B. GUTEX Thermowall Holzschraube oder Schraubdübel ejotharm STR H) oder Breitrückklammern nach DIN EN 14592 [50] befestigt. Bei Gebrauch von Installationssebenen innerhalb der Bekleidungsschichten entstehen Hohlräume, die als solche beibehalten werden oder mit Dämmung versehen werden können. Wärmedämmverbundsysteme mit verschiedenen Putzarten finden ebenfalls Anwendung als Bekleidungsschicht. Um hierfür eine flexible Berechnungsmethode bereitzustellen, wurde ein additives Berechnungsverfahren gewählt. Bereits in der DIN EN 1995-1-2:2010 [55] wird ein additives Verfahren auf Grundlage der Forschungen von König *et al.* [103, 104] verwendet, das in seiner Kombinationsmöglichkeit jedoch deutlich eingeschränkt ist. In einem additiven Berechnungsmodell werden die Beiträge aller einzelnen Schichten zum Raumabschluss addiert und eine Isolationszeit für das gesamte Bauteil bestimmt. Im Nachweis wird die berechnete Isolationszeit mit der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer verglichen. Innerhalb dieses additiven Verfahrens wird der Beitrag jeder Schicht in Abhängigkeit ihrer Dicke, ihres Materials und ihrer Position innerhalb des Bauteils sowie unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Fugen ermittelt. Schleifer verbesserte und erweiterte das Prinzip der Positionsbeiwerte im Vergleich zum Rechenverfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010 [55]. Zusätzlich gestaltete sie eine deutlich erweiterte Kombinationsmöglichkeit der einzelnen Schichten. Diese wird bei Schleifer durch die numerische Untersuchung des Bauteils und einzelner Schichten unter Verwendung eines Finite-Elemente-Ansatzes möglich. Das Rechenmodell des derzeit gültigen Eurocodes DIN EN 1995-1-2:2010 [55] hingegen

basiert weitgehend auf empirischen Berechnungen auf der Grundlage von Brandversuchen (vgl. Norén [115]).

Ihr Modell ist derzeit auf eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten begrenzt und berücksichtigt kein Versagen der Ständer und Balken der Konstruktion. Ein solches Versagen muss separat durch einen Tragsicherheitsnachweis geführt werden.

In den numerischen Untersuchungen von Schleifer wird der Wärmedurchgang auf Basis von effektiven temperaturabhängigen Materialeigenschaften ermittelt, die an Versuche angepasst wurden. Beispielsweise wird dem Schmelzvorgang der Glaswolle durch den sprunghaften Anstieg der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ab etwa 660°C Rechnung getragen. Bei Holzwerkstoffen werden das Verdampfen von Wasser (bei 100°-120°C) sowie die Pyrolyse (bei 200°-350°) und die Rissbildungen in der Holzkohle (bei ca. 500°C) und der Zerfall der Holzkohle (ab ca. 800°C) durch den Einsatz temperaturabhängiger effektiver Materialkennwerte, wie der spezifischen Wärmekapazität und/oder der spezifischen Wärmeleitfähigkeit, abgebildet. Bei Gipsplatten wurden der Massentransport des verdampften Wassers (bei 100°-170°C) sowie chemische Umwandlungsvorgänge (bei 600°-750°C) durch eine erhöhte spezifische Wärmespeicherkapazität wiedergegeben und die Rissbildung in den Platten durch eine steigende Wärmeleitfähigkeit ab etwa 600°C abgebildet.

In Schleifers Untersuchungen sowie bereits in der DIN EN 1995-1-2 [55] werden verschiedene Wege durch eine Holzkonstruktion betrachtet (vgl. Abbildung 2.1). Weg 1 in Abbildung 2.1 findet in ihrer Berechnung keine Berücksichtigung, da beim Wärmedurchgang durch einen massiven Ständer oder Balken deutlich mehr Zeit bis zum Erreichen der kritischen Grenztemperatur auf der brandabgewandten Seite vergeht als beim Wärmedurchgang durch die einzelnen Schichten. Weg 3 beschreibt den Wärmedurchgang durch die einzelnen Schichten und bildet die Grundlage ihres numerischen Modells. Ein beschleunigter Wärmedurchgang tritt jedoch bei den Wegen 2 und 6 unter Berücksichtigung von Fugen und bei den Wegen 4 und 5 unter Beachtung von Aussparungen auf. Dabei kommt dem Einfluss von Fugen und Aussparungen auf der brandabgewandten Seite durch die im Brandfall entstehende Sogwirkung besondere Bedeutung zu. Die Sogwirkung entsteht durch geringere Temperaturen auf der brandabgewandten Seite sowie dem Überdruck auf der brandzugewandten Bauteilseite infolge hoher Temperaturen (vgl. Schleifer [120]). Fugen und Aussparungen, die zur Reduzierung des Beitrags einzelner Schichten zum Raumabschluss beitragen, werden bei Schleifer durch die Auswertung von Versuchen auf den Grundlagen der DIN EN 1995-1-2:2010 [55] bewertet.

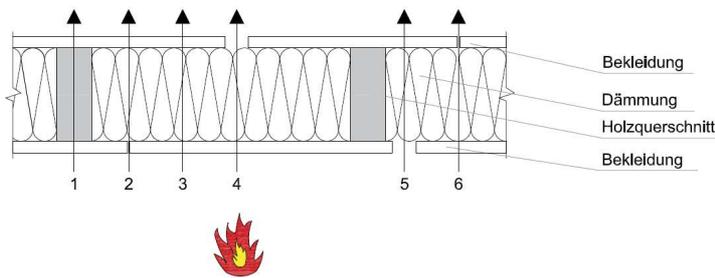


Abbildung 2.1: Wege des Wärmedurchgangs durch eine Holzkonstruktion [55] [120]

Als Kriterium für den Beitrag einer Schicht zum Raumabschluss wird das Erreichen einer Temperaturerhöhung auf der brandabgewandten Seite der untersuchten Schicht festgelegt. Sofern diese Schicht eine isolierende Schicht ist und demnach die letzte Schicht an der brandabgewandten Seite darstellt (vgl. Abbildung 2.2), darf eine mittlere Temperaturerhöhung von 140 K und demzufolge eine Grenztemperatur von 160°C bei einer Raumtemperatur von ca. 20°C nicht überschritten werden. Alle davorliegenden Schichten, die als schützende Schichten bezeichnet werden, behalten ihre schützende Funktion bis zum Erreichen einer mittleren Temperaturerhöhung von 250 K und folglich einer Grenztemperatur von 270°C (gemäß DIN EN 13501-1 [44]).

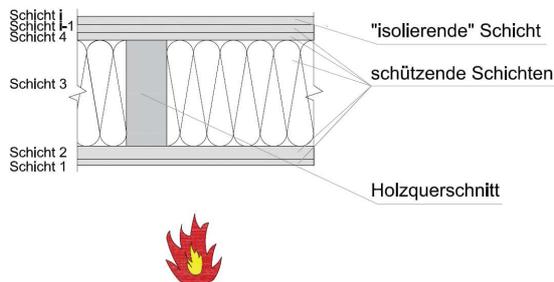


Abbildung 2.2: Schützende und isolierende Schichten innerhalb des Bauteils gemäß Schleifer [120]

Der Anteil aller Schichten an der Isolationszeit errechnet sich durch die Addition aller Schutzzeiten zusammen mit der Isolationszeit der brandabgewandten Schicht entsprechend Gleichung (1).

$$t_{\text{ins}} = \sum t_{\text{prot}} + t_{\text{ins},i} \quad (1)$$

mit:

- $t_{\text{ins}}$  Isolationszeit bis zum Versagen der raumabschließenden Funktion des gesamten Bauteils [min]
- $\sum t_{\text{prot}}$  Summe der Schutzzeiten der Schicht 1 bis Schicht  $i-1$  [min]
- $t_{\text{ins},i}$  Isolationszeit der Schicht  $i$  [min]

Die Grenztemperaturen der schützenden Schichten entstanden aus dem Brandschutzkriterium K gemäß DIN EN 13501-2 [45]. Um die isolierende Schicht  $i$  vor Entzündung, Verkohlungs

und anderen Brandschäden zu schützen, dürfen die schützenden Schichten 1 bis  $i-1$  eine mittlere Temperaturerhöhung von 250 K sowie eine maximale Temperaturerhöhung von 270 K nicht überschreiten. Die Zeitdauer bis zum Erreichen der maßgebenden Grenztemperatur von 270°C auf der Rückseite der betrachteten brandbeanspruchten Schicht ausgehend von einer anfänglichen Raumtemperatur von 20°C, wird als Schutzzeit  $t_{\text{prot}}$  bezeichnet. Die entstehende Grenztemperatur infolge der maximalen Temperaturerhöhung ist nicht maßgebend, da in der numerischen Untersuchung die Fugen unberücksichtigt bleiben. Schleifer lässt nach Erreichen der Grenztemperatur von 270°C die betrachtete Schicht im Modell abfallen. Unter diesem Temperaturkriterium wird sowohl das Abfallen nahezu aller untersuchten brennbaren und nichtbrennbaren Bekleidungsschichten als auch das Versagen von Glaswolle und Steinwolle vereinfacht wiedergegeben. Nach Abfallen der betrachteten Schicht wird die nächste Lage direkt beansprucht.

Eine Ausnahme für das Abfallen einer Schicht unter dem genannten Temperaturkriterium bilden Gipsplatten des Typ F und Gipsfaserplatten. Ihr Versagen erfolgt in Abhängigkeit ihrer Einbaulage (horizontal oder vertikal) bei Erreichen einer kritischen Temperatur von 400°C bzw. 600°C auf der brandabgewandten Seite. Dieses abweichende Versagenskriterium hat zur Folge, dass die verspätete Abfallzeit bei der nachfolgenden Schicht mithilfe des Beiwertes  $\Delta t$  berücksichtigt wird. Das Vorgehen zur Bestimmung der Korrekturzeit  $\Delta t$  wird in Abschnitt 6.3 detailliert erläutert.

Das beschleunigte Abfallen nach Erreichen von bereits 400°C bei Deckenkonstruktionen ist auf das Eigengewicht der Gipsplatte bzw. Gipsfaserplatte zurückzuführen. Die Annahme des Abfallens von Gipsplatten in Wandkonstruktionen bei etwa 600°C werden auch von Kodur et al. [100, 101], Sultan et al. [134] und Collier et al. [26] bestätigt. Sultan et al. [133, 135] untersuchten das Abfallen von Gipsplatten in Deckenkonstruktionen. Hierbei waren deutliche Unterschiede zwischen ein- oder zweilagigen Bekleidungen feststellbar. Eine eindeutige Abfalltemperatur für Deckenkonstruktionen wurde nicht identifiziert. Just et al. [96, 97] stellten nach Auswertung einer umfangreichen Datenbank entgegen Schleifers Annahme keine eindeutige Übereinstimmung bestimmter Temperaturen mit den Abfallzeiten von Gipsplatten fest.

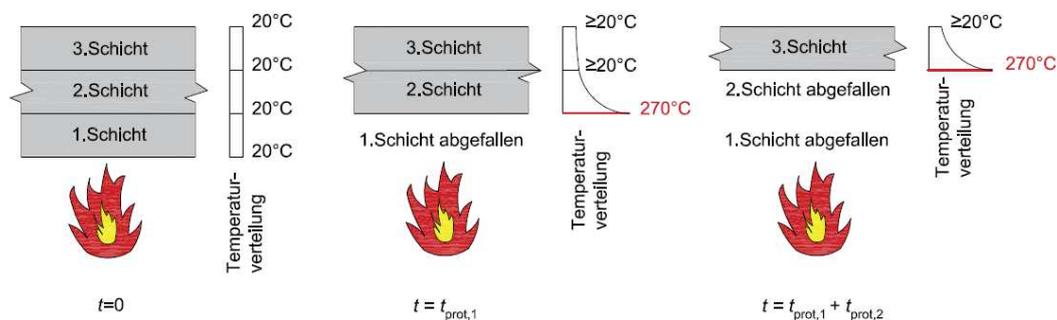


Abbildung 2.3: Abfallen von Schichten bei der Ermittlung der Schutzzeiten gemäß Schleifer [120]

In Abbildung 2.3 wird die Temperaturverteilung eines dreischichtigen Bauteils unter Brandbeanspruchung dargestellt und das Abfallen einer Schicht und dessen Folgen für die verbleibenden Schichten veranschaulicht. Im linken Bild herrscht zu Brandbeginn eine Raumtemperatur

von 20°C. Die Temperaturen innerhalb des Bauteils liegen ebenfalls gleichmäßig über alle Schichten bei 20°C. Im mittleren Bild ist die erste brandzugewandte Schicht nach Erreichen der kritischen Grenztemperatur von 270°C nach der Zeit  $t_{\text{prot},1}$  abgefallen. Die dahinterliegende zweite Schicht ist bereits vorgewärmt und verfügt über einen nicht linearen, materialspezifischen Temperaturverlauf von 270°C bis  $\geq 20^\circ\text{C}$  über ihre Dicke. Durch die weiterführende Brandbeanspruchung fällt auch diese zweite Schicht nach der Zeit  $t_{\text{prot},2}$  bei Erreichen von 270°C auf der brandabgewandten Seite ab. Dieser Vorgang wird solange fortgeführt, bis die letzte, isolierende Schicht erreicht wird. Demnach kann der Beitrag aller schützenden Schichten mit Ausnahme der isolierenden Schicht gemäß Gleichung (2) zusammengefasst werden.

$$\sum t_{\text{prot}} = t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2} + \dots + t_{\text{prot},i-1} \quad (2)$$

Die Schutzzeit einer Schicht errechnet sich jeweils aus der materialspezifischen und dickenabhängigen Grundschutzzeit und den zugehörigen Positionsbeiwerten gemäß Gleichung (3). Dabei wird die Vorerwärmung durch davorliegende Schichten oder ein Wärmestau durch dahinterliegende Schichten berücksichtigt. Im Weiteren wird bei davorliegenden Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten eine Zeitdifferenz hinzugefügt, die das verspätete Versagen dieser Platten widerspiegeln soll. Letztendlich reduziert die errechnete Summe ein Fugenbeiwert, der den durch Fugen beschleunigten Wärmedurchgang einbezieht.

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad (3)$$

mit:

$t_{\text{prot},i}$	Schutzzeit der schützenden Schicht $i$ [min]
$t_{\text{prot},0,i}$	Grundschutzzeit der schützenden Schicht $i$ [min]
$k_{\text{pos,exp},i}$	Positionsbeiwert der Schicht $i$ aus dem Einfluss davorliegender Schichten $i$ [-]
$k_{\text{pos,unexp},i}$	Positionsbeiwert der Schicht $i$ aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten [-]
$\Delta t_i$	Zeitdifferenz für die Schicht $i$ , falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min [min]
$k_{j,i}$	Fugenbeiwert für die Schicht $i$ ; falls keine Fuge: $k_{j,i} = 1$ [-]

Für die „isolierende“ Schicht muss das Kriterium der Wärmedämmung und eine Grenztemperatur von 160°C eingehalten werden. Ihr Beitrag zum Raumabschluss wird durch die Grundisoliationszeit und entsprechender Beiwerte gemäß Gleichung (4) bestimmt. Für die letzte Schicht hat der Einfluss einer davorliegenden Schicht Auswirkungen auf die Temperaturverteilung innerhalb der Schichtdicke. Sofern die davorliegende Schicht eine Gipsplatte des Typ F oder Gipsfaserplatte ist, wird die Zeitdifferenz aus dem späteren Versagen dieser Platten angerechnet. Von großer Bedeutung ist die Berücksichtigung des Fugenbeiwertes, der die Isolationszeit deutlich verringern kann.

$$t_{\text{ins},i} = (t_{\text{ins},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad (4)$$

mit:

$t_{\text{ins},i}$	Isolationszeit der isolierenden Schicht $i$ [min]
$t_{\text{ins},0,i}$	Grundisolationszeit der isolierenden Schicht $i$ [min]
$k_{\text{pos,exp},i}$	Positionsbeiwert der Schicht $i$ aus dem Einfluss davorliegender Schichten $i$ [-]
$\Delta t_i$	Zeitdifferenz für die Schicht $i$ , falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min [min]
$k_{j,i}$	Fugenbeiwert für die Schicht $i$ ; falls keine Fuge: $k_{j,i} = 1,0$ [-]

Schleifer stellt mithilfe ihres verifizierten FE-Modells die Grundschutz- und Grundisolationszeiten sowie die entsprechenden Positionsbeiwerte, Zeitdifferenzen und Fugenbeiwerte für OSB, Gipsplatten, Gipsfaserplatten, Spanplatten, Sperrholzplatten, Massivholzplatten, Steinwolle sowie Glaswolle zur Verfügung und schafft mit ihrem Berechnungsmodell eine deutlich verbesserte Möglichkeit zum Nachweis des Raumabschlusses von mehrschichtigen Holzbauteilen [120]. Biogene Dämmstoffe blieben in ihrem Modell unberücksichtigt.

### 2.3 Additives Verfahren gemäß des Entwurfes EN 1995-1-2:2021

Das additive Verfahren zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von mehrschichtigen oder massiven Holzbauteilen beruht im Entwurf der neuen EN 1995-1-2 [69] auf den Grundlagen des Bemessungsverfahrens nach Schleifer [120] und ist auf eine Feuerwiderstandsdauer von bis zu 120 Minuten erweitert. Die Bestimmung der Schutzzeiten verschiedener Bekleidungsschichten oder Dämmungen erfolgt entsprechend Gleichung (3) gemäß Schleifer. Die Gleichungen zur Ermittlung der Grundschutzzeiten für Massivholzplatten, OSB, Spanplatten und Sperrholzplatten weichen hingegen geringfügig von Schleifers Ergebnissen ab. Die neuen Gleichungen entsprechen der Bestimmung der Abbrandzeit  $t_{\text{ch}}$  in Abhängigkeit der Dicke der Platte sowie des Bemessungswertes der Abbrandraten  $\beta_0$ , eines Dickenfaktors  $k_h$  und gegebenenfalls auch eines Rohdichtefaktors  $k_p$ . Schleifer hingegen vereinfachte ihre Gleichungen auf Grundlage einer für jedes Material definierten Referenzdicke und Referenzrohddichte. Anders als bei Schleifer erfolgt die Bestimmung der Grundschutzzeit mehrlagiger Gipsplatten auf Basis einer reduzierten Gesamtdicke  $h_p$  (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Bestimmung der reduzierten Gesamtdicke bei Verwendung mehrlagiger Gipsplatten

Zwei Lagen	$h_p = h_1 + 0,8 \cdot h_2$
Drei Lagen	$h_p = h_1 + 0,8 \cdot h_2 + 0,5 \cdot h_3$

Im Entwurf der EN 1995-1-2 [69] werden Dämmstoffe auf Basis der Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen nach Tiso [141] zusätzlich in *Protection Level (PL)* unterteilt, um die unterschiedlichen Schutzwirkungen der Dämmstoffe auf die massiven Holzbauteile unterscheiden zu können. Dabei werden die Dämmstoffe wie folgt eingeteilt, sofern keine abweichende Einordnung durch entsprechende Prüfungen gemäß dem Entwurf der EN 1995-1-2 vorliegt:

Tabelle 2-2: Einteilung typischer Dämmmaterialien in Protection Level

Protection Level PL	Dämmmaterial	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PL 1	Steinwolle	≥ 26
PL 2	Glaswolle	≥ 14
	Holzfaser	≥ 50
	Zellulose	≥ 50
PL3	XPS	-
	EPS	-
	PUR	-
	PIR	-
	nicht beurteilte Dämmstoffe	

Eine Abweichung zum Berechnungsmodell nach Schleifer besteht darin, dass die Summe der Schutzzeiten aller vor einer Dämmung liegenden Schichten inklusive der Dämmschicht in Abhängigkeit des *Protection Levels* der Dämmung folgende Grenzen nicht überschreiten darf:

$$PL1 \quad \sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} \leq \begin{cases} t_{f,\text{pr}} + \frac{h_i}{0,11 \cdot t_{f,\text{pr}} + 1,3} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} \leq t_{f,\text{pr}} \\ \sum t_{\text{prot},i-1} + \frac{h_i}{0,11 \cdot \sum t_{\text{prot},i-1} + 1,3} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} > t_{f,\text{pr}} \end{cases} \quad (5)$$

$$PL2 \quad \sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} \leq \begin{cases} t_{f,\text{pr}} + \frac{h_i}{v_{\text{rec}}} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} \leq t_{f,\text{pr}} \\ \sum t_{\text{prot},i-1} + \frac{h_i}{v_{\text{rec}}} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} > t_{f,\text{pr}} \end{cases} \quad (6)$$

$$PL3 \quad \sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} = \sum t_{\text{prot},i-1} \quad (7)$$

mit:

$\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k}$	Summe der Schutzzeiten aller vor einer Dämmung liegenden Schichten inklusive der Dämmschicht [min]
$\sum t_{\text{prot},i-1}$	Summe der Schutzzeiten aller vor einer Dämmung liegenden Schichten [min]
$h_i$	Dicke der Dämmschicht [mm]
$v_{\text{rec}}$	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung [mm/min]
$t_{f,\text{pr}}$	Versagenszeit des <i>fire protection systems</i> [min]

Der Beitrag der Schutzzeit von Dämmungen des Protection Level 3 wird bei der Ermittlung der Gesamtisulationszeit nicht berücksichtigt.

Gemäß des Entwurfs der EN 1995-1-2 [69] darf die Rückzugsgeschwindigkeit für Hohlraumdämmungen aus Mineralwolle mit 30 mm/min und aus Zellulose- oder Holzfasern mit

14 mm/min angenommen werden. Als *fire protection system* werden einzelne Platten oder eine Kombination aus Materialien bezeichnet, die das massive Holzbauteil schützen soll und mit diesem mechanisch verbunden ist, um die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils zu erhöhen. Eine Berechnung der Versagenszeit  $t_f$  ist zum jetzigen Stand auf Gipsplatten nach DIN EN 520 [58], Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 [52], Lehmplatten nach DIN 18948 [32], und Lehmputze nach DIN 18947 [31] und DIN EN 13914-2 [47] sowie zugehöriger Berichtigung [48] beschränkt. Weitere Versagenszeiten für einige *fire protection systems*, wie beispielsweise von 18 mm dicken OSB-Platten, 18 mm dicken Spanplatten, 18 mm dicken Sperrholzplatten, 18 mm dicken Massivholzplatten, 27 mm dicken Furnierschichtholzplatten (LVL), etc., werden tabellarisch zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden für das Versagen von Dämmstoffen keinerlei Unterscheidungen in Abhängigkeit ihrer Einbaulage getroffen.

Die Kalkulation der Isolationszeit erfolgt für Bekleidungen gemäß Schleifer nach Gleichung (4). Auch die Positionsbeiwerte zur Berücksichtigung davorliegender oder dahinterliegender Schichten stimmen mit Schleifers Vorschlägen überein. Lediglich die Angaben zu den Fugenbeiwerten wurden geringfügig erweitert. Hierbei wurde ein Fugenbeiwert von 0,2 für stumpf gestoßene Holzwerkstoffplatten mit einer Fugenbreite kleiner gleich 2 mm, sowie ein Fugenbeiwert von 1,0 für verspachtelte Fugen von Gipsplatten mit einer Fugenbreite von kleiner gleich 2 mm und ein Fugenbeiwert von 0,8 für stumpf gestoßene Dämmstoffe mit einer Fugenbreite von 0 mm hinzugefügt.

Die zweite signifikante Abweichung zum Modell von Schleifer ist die Bestimmung der Korrekturzeit bei Verwendung einer Schutzbekleidung oder eines *fire protection systems*. Diese Änderungen beruhen auf den Forschungen von Mäger *et al.* [109] [108]. Hierbei wird die Korrekturzeit für alle schützenden Schichten wie folgt berechnet:

$$\Delta t_i = \frac{(t_f - \sum_{k=1}^{i-1} t_{\text{prot},k}) \cdot \Delta t_{\text{max},i}}{t_{\text{prot},\text{max},i}} \leq \Delta t_{\text{max},i} \quad (8)$$

mit:

$\Delta t_i$	Korrekturzeit [min]
$\Delta t_{\text{max},i}$	Maximale Korrekturzeit [min]
$t_f$	Versagenszeit der einzelnen Platte bzw. des <i>fire protection systems</i> [min]
$\sum_{k=1}^{i-1} t_{\text{prot},k}$	Summe der Schutzzeiten aller vorangestellter Schichten [min]
$t_{\text{prot},\text{max},i}$	Maximale Schutzzeit der betrachteten Schicht $i$ [min]

Die Korrekturzeit für eine isolierende Schicht wird unter Berücksichtigung der maximalen Isolationszeit  $t_{\text{ins},\text{max},i}$  der betrachteten Schicht  $i$  berechnet:

$$\Delta t_i = \frac{(t_f - \sum_{k=1}^{i-1} t_{\text{prot},k}) \cdot \Delta t_{\text{max},i}}{t_{\text{ins},\text{max},i}} \leq \Delta t_{\text{max},i} \quad (9)$$

Dabei werden die maximale Schutzzeit  $t_{\text{prot},\text{max},i}$  sowie die maximale Isolationszeit  $t_{\text{ins},\text{max},i}$  der betrachteten Schicht  $i$  folgendermaßen ermittelt:

$$t_{\text{prot,max},i} = \frac{t_{\text{prot},0,i}}{k_2} \quad (10)$$

$$t_{\text{ins,max},i} = \frac{t_{\text{ins},0,i}}{k_2} \quad (11)$$

mit:

- $t_{\text{prot},0,i}$  Grundschutzzeit der betrachteten Schicht  $i$  [min]
- $t_{\text{ins},0,i}$  Grundisolationszeit der betrachteten Schicht  $i$  [min]
- $k_2$  Faktor zur Berücksichtigung der Wirkung der einzelnen Platte oder des *fire protection systems* vgl. Tabelle 2-3

Tabelle 2-3: Faktor  $k_2$  zur Berücksichtigung der Wirkung der einzelnen Platte bzw. des *fire protection systems*

Platte	Faktor $k_2$		
Gipsplatte, Gipsfaserplatte	$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}$	für $h_p \leq 50 \text{ mm}$	(12)
Lehmputz, Lehmplatte	$k_2 = 1 - \frac{h_p}{100}$	für $h_p \leq 40 \text{ mm}$	(13)
Mineralwolle PL1	$k_2 = \begin{cases} 1 \\ 0,6 \end{cases}$	für $h_p \leq 20 \text{ mm}$ für $h_p \geq 45 \text{ mm}$	(14)
mit:			
$h_p$ Dicke der einzelnen Platte oder des <i>fire protection system</i> [mm]			

Die Ermittlung der maximalen Korrekturzeit der betrachteten Schicht  $i$  als Schutzschicht kann wie folgt erfolgen:

$$\Delta t_{\text{max},i} = t_{\text{prot,max},i} - t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} \cdot k_{j,i} \quad (15)$$

Sofern die betrachtete Schicht eine Isolationsschicht darstellt, wird die maximale Korrekturzeit wie folgt berechnet:

$$\Delta t_{\text{max},i} = t_{\text{ins,max},i} - t_{\text{ins},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{j,i} \quad (16)$$

mit:

- $\Delta t_{\text{max},i}$  maximale Korrekturzeit der Schicht  $i$  [min]
- $t_{\text{prot},0,i}$  Grundschutzzeit der schützenden Schicht  $i$  [min]
- $t_{\text{ins},0,i}$  Grundisolationszeit der isolierenden Schicht  $i$  [min]
- $k_{\text{pos,exp},i}$  Positionsbeiwert der Schicht  $i$  aus dem Einfluss davorliegender Schichten [-]
- $k_{\text{pos,unexp},i}$  Positionsbeiwert der Schicht  $i$  aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten [-]
- $k_{j,i}$  Fugenbeiwert für die Schicht  $i$ ; falls keine Fuge:  $k_{j,i} = 1,0$  [-]

Die veränderte Berechnungsmöglichkeit der Korrekturzeit erweitert sich demnach von Gipsfaserplatten und Gipsplatten des Typ F auf weitere Materialien, wie Lehmplatten oder Mineralwolleplatten, die als Schutzbekleidung oder *fire protection system* verstanden werden.

#### 2.4 Schlussfolgerung

Die betrachteten Bemessungsmodelle nach Schleifer [120] und des Entwurfes der EN 1995-1-2 [69] für den Nachweis des Raumabschlusses sind im Wesentlichen identisch. Im Entwurf der EN 1995-1-2 wurde eine zusätzliche Möglichkeit geschaffen, der Wirkweise verschiedener Dämmstoffe, eingeteilt in *Protection Level*, auf den Feuerwiderstand Rechnung zu tragen. Demnach kann durch die Überprüfung von Grenzwerten bei der Bestimmung der Schutzzeiten aller vor einer Dämmung liegenden Schichten inklusive der Dämmschicht die Versagenszeit aller Schichten berücksichtigt werden. Derzeit ist diese Möglichkeit durch die fehlenden Angaben der Versagenszeiten jedoch nahezu auf eine Kombination von Dämmstoffen mit Gipsplatten, Gipsfaserplatten, Lehmplatten und Lehmputze begrenzt. Zusätzlich ist bei der Ermittlung der Versagenszeit der Dämmstoffe, die durch den zweiten Summanden in Gleichungen (5) bzw. (6) bestimmt werden kann, die Auswirkung der Einbaulage (Wand, Decke) des Dämmstoffes nicht berücksichtigt.

Des Weiteren schafft die neue Berechnungsgleichung zur Bestimmung der Korrekturzeit (9) nicht nur die Möglichkeit den Beitrag von Gipsfaserplatten, Gipsplatten des Typ F, Lehmplatten und Lehmputze verbessert zu erfassen, sondern liefert auch den Weg weitere Materialien mit einzubeziehen, die eine Funktion als *fire protection system* besitzen.

### 3 Grundlagen des Wärme- und Stofftransportes infolge von Brandbeanspruchung

#### 3.1 Arten der Wärmeübertragung

Um die Brandbeanspruchung eines Decken- oder Wandelements in Holztafelkonstruktionen beurteilen zu können, müssen die Wege der Wärmeübertragung bekannt sein.

Entsprechend des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik erfolgt ein Wärmetransport dann, wenn zwischen dem System und seiner Umgebung eine Temperaturdifferenz vorhanden ist. Dabei fließt die Wärme stets in Richtung fallender thermodynamischer Temperatur über die Systemgrenze. Übertragen auf ein Wand- oder Deckenelement bedeutet dies, dass die Wärme durch das Bauteil hindurch von der brandbeanspruchten zur brandabgewandten Seite fließt.

Der Wärmetransport erfolgt dabei durch die Vorgänge der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmestrahlung. Diese Transportprozesse treten im Brandfall in der Regel gleichzeitig auf (vgl. Baehr *et al.* [7]).

##### 3.1.1 Wärmeleitung

Als Wärmeleitung wird der Energietransport zwischen benachbarten Molekülen bezeichnet, der durch einen im Material vorhandenen Temperaturgradienten hervorgerufen wird. Der Übertragungsmechanismus der Wärmeleitung tritt nur dann alleine auf, wenn der Körper strahlungsundurchlässig ist. In Gasen und Flüssigkeiten überlagern sich Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung.

Bei der Wärmeleitung wird der Energietransport in einem Material durch das Vektorfeld der Wärmestromdichte beschrieben. Dabei gibt der Vektor Richtung und Stärke des Wärmestroms  $\dot{Q}$  an. Die Wärmestromdichte ergibt sich aus dem Wärmestrom bezogen auf ein Flächenelement  $dA$ .

Innerhalb des betrachteten Volumens gibt es Flächen, die zum selben Zeitpunkt dieselben Temperaturen aufweisen. Diese werden als Isothermen bezeichnet. Senkrecht zu den Isothermen befinden sich die größten Temperaturunterschiede, die durch den Temperaturgradienten beschrieben werden:

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} e_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} e_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} e_z \quad (17)$$

mit:

grad $\vartheta$	Temperaturgradient [K/m]
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$x, y, z$	Koordinatenrichtung [m]
$e_x, e_y, e_z$	Einheitsvektoren der drei Koordinatenrichtungen

Nach dem Grundgesetz der Wärmeleitung nach Fourier (J.B.J Fourier - französischer Mathematiker und Physiker (1768 – 1830)) ist die Wärmestromdichte als vektorielle Größe dem Temperaturgradienten proportional und entgegengerichtet. Als Proportionalitätskonstante wird die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eingeführt, die eine Eigenschaft des wärmeleitfähigen Materials darstellt. Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit des Materials von der Temperatur, dem Druck und bei anisotropen Stoffen, wie Holzfaserdämmstoffen, auch von der Richtung abhängig.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (18)$$

mit:

$\vec{q}$	Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
grad $\vartheta$	Temperaturgradient [K/m]

Bei isotropen Materialien steht der Vektor der Wärmestromdichte immer senkrecht zu den Isothermen. Im Gegensatz dazu bilden bei anisotropen Materialien, wie Holz oder Holzfaserdämmstoffen, der Vektor der Wärmestromdichte und der Temperaturgradient einen spezifischen Winkel (vgl. Baehr *et al.* und Langeheinecke *et al.* [7, 107]).

Zur besseren Vorstellung wird der Verlauf eines eindimensionalen Wärmestroms mithilfe eines Volumenelementes unter Verwendung des kartesischen Koordinatensystems verdeutlicht:

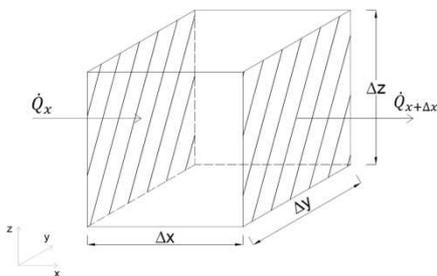


Abbildung 3.1: Volumenelement mit Wärmestrom in x-Richtung basierend auf Langeheinecke *et al.* [107]

Für das Volumen werden ein konstanter Druck sowie eine konstante Wärmeleitfähigkeit, eine konstante spezifische Wärmekapazität und eine konstante Rohdichte für das homogene, isotrope Material angenommen. Außerdem sind keine Wärmequellen vorhanden. Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ändert sich die Enthalpie des Volumens infolge der Differenz zwischen den einströmenden und den ausströmenden Wärmeströmen.

Für den eindimensionalen Wärmestrom gilt:

$$\frac{\partial(mh)}{\partial t} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} \quad (19)$$

mit:

$m$	Masse [kg]
-----	------------

$h$	Spezifische Enthalpie [J/kg]
$t$	Zeit [s]
$\dot{Q}_x$	Einströmender Wärmestrom in x-Richtung [W]
$\dot{Q}_{x+\Delta x}$	Ausströmender Wärmestrom in x-Richtung [W]

Unter Berücksichtigung der kalorischen Zustandsgleichung, der Beziehung zwischen Wärmestrom und Wärmestromdichte über die senkrecht zum Vektor orientierte Fläche und dem Einsetzen der Fourier'schen Beziehung sowie der Rohdichte ergibt sich:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (20)$$

mit:

$c_p$	spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

Berücksichtigt man auch die Wärmestromdichten in  $y$ - und  $z$ -Richtung entsteht folgende Gleichung:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad (21)$$

Bei der stationären, sonach von der Zeit unabhängigen, Wärmeleitung tritt eine Temperaturänderung innerhalb eines Systems nur von Ort zu Ort ein und daher gilt:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

Bei der instationären Wärmeleitung, tritt die Temperaturänderung innerhalb eines Systems sowohl über den Ort als auch die Zeit ein. Für das betrachtete Volumen sind demnach eine temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit, eine temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität und eine temperaturabhängige Rohdichte zu berücksichtigen.

Beachtet man außerdem, dass sich durch die Temperaturänderung eine mögliche Phasenänderung oder auch chemische und biologische Reaktionen ergeben, muss die Enthalpie berücksichtigt werden. Diese kann aus der inneren Energie und einer Umwandlungsenthalpie zusammengesetzt werden (vgl. Uni Magdeburg [147]).

Die zeitliche Änderung der Enthalpie des Elementes ergibt sich daher unter Berücksichtigung der kalorischen Zustandsgleichung zu:

$$\frac{d}{dt} dH = m(\vartheta) \cdot \left( c_p(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \frac{\partial h_{um}}{\partial t} \right) = \rho(\vartheta) \cdot dV \cdot \left( c_p(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \frac{\partial h_{um}}{\partial t} \right) \quad (23)$$

mit:

$H$	Enthalpie [J]
-----	---------------

$t$	Zeit [s]
$m(\vartheta)$	Temperaturabhängige Masse [kg]
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$c_p(\vartheta)$	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)]
$\rho(\vartheta)$	Temperaturabhängige Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$V$	Volumen [m <sup>3</sup> ]
$h_{um}$	Umwandlungsenthalpie [J/kg]

Vorgänge unter Brandbeanspruchung wie beispielsweise die Pyrolyse oder das Entweichen von Materialfeuchte werden mithilfe der Umwandlungsenergie reproduziert. Alternativ werden diese Vorgänge durch effektive thermische Materialkennwerte berücksichtigt.

Die zeitliche Änderung der Umwandlungsenthalpie multipliziert mit der Dichte ergibt die auf das Volumen bezogene Wärmequellichte  $\dot{w}_q$ :

$$\dot{w}_q = -\rho \cdot \frac{\partial h_{um}}{\partial t} \quad (24)$$

mit:

$\dot{w}_q$  Wärmequellichte [W/m<sup>3</sup>]

So ergibt sich die Fourier'sche Differentialgleichung:

$$c_p(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda(\vartheta) \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \dot{w}_q \quad (25)$$

Für anisotrope Materialien wie Holz, Holzfaserdämmstoffe oder Zellulose muss zusätzlich die richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden:

$$c_p(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_x(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_y(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda_z(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \dot{w}_q \quad (26)$$

### 3.1.2 Konvektion

Der Wärmeübergang in einem strömenden Fluid wird nicht nur durch Wärmeleitung, sondern auch durch die makroskopische Bewegung des Fluids selbst übertragen. Dabei wird zusätzliche Energie in Form von Enthalpie und kinetischer Energie des Fluids transportiert. Unter Konvektion ist daher eine Überlagerung von Wärmeleitung und Wärmetransport durch das bewegte Fluid zu verstehen. Wird die Bewegung der Fluide durch temperaturbedingte Dichteunterschiede hervorgerufen, spricht man von freier Konvektion. Eine erzwungene Konvektion liegt vor, wenn die Bewegungen durch äußere Kräfte, wie beispielsweise Pumpen oder Gebläse, erreicht werden.

Beim technisch interessanten Wärmeübergang von einem strömenden Fluid zu einer festen Wand bildet sich an der Wand eine Grenzschicht (nach L. Prandtl - deutscher Ingenieur (1875-

1953)) aus, in der Wärme sowohl über Konvektion als auch Leitung transportiert wird (vgl. Abbildung 3.2). Direkt an der Wand wird die Wärme nur in Form von Leitung transportiert, da dort keine Bewegung des Fluids stattfindet. Hierbei wird die Wärmeleitfähigkeit des Fluids ausgenutzt. In der Grenzschicht steigt die Komponente der parallel zur Wand verlaufenden Strömungsgeschwindigkeit  $w$  durch die Haftreibung direkt an der Wand von null nach kurzer Distanz  $\delta_w$  bis nahezu zum Maximalwert in der Kernströmung an. Ebenso ändert sich die Temperatur innerhalb der Temperatur-Grenzschicht  $\delta_\vartheta$  von der Oberflächentemperatur  $\vartheta_0$  der Wand zur Freistromtemperatur im Fluid  $\vartheta_F$  (hier:  $= \vartheta_\infty$ ).

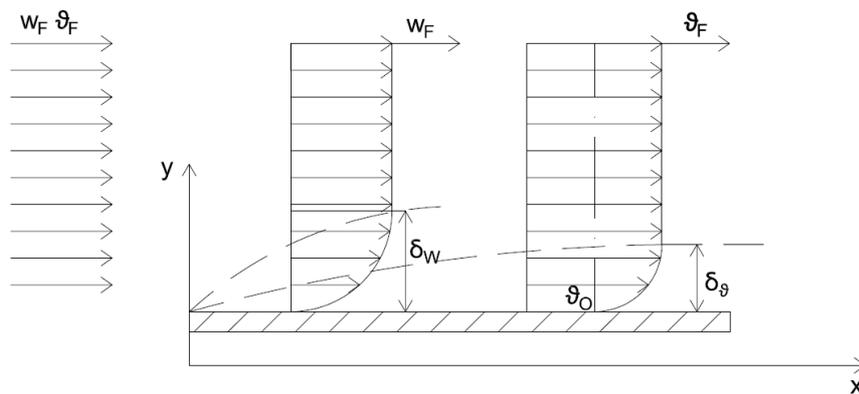


Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsprofil und Temperaturprofil längs einer überströmten Wand basierend auf Langeheinecke et al. und Uni Magdeburg [107, 147]

Die Größe des Wärmestromes wird durch die Temperaturdifferenz von Wandtemperatur und Temperatur im Kern des fluiden Mediums und der Fläche der Grenzschicht sowie von weiteren Parametern beeinflusst, die im konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{konv}$  zusammengefasst sind.

$$\dot{q}_{konv} = \alpha_{konv} \cdot (\vartheta_F - \vartheta_0) \quad (27)$$

mit:

$\dot{q}_{konv}$	Konvektive Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha_{konv}$	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\vartheta_F$	Freistromtemperatur im Fluid [°C]
$\vartheta_0$	Temperatur der Oberfläche [°C]

Diese weiteren Parameter sind zum Beispiel die Lage der Grenzfläche (horizontal oder vertikal), die Art der Konvektionsströmung (freie oder erzwungene Konvektion), die charakteristische Strömungslänge, die Strömungsgeschwindigkeit, die Art (kinetische Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Speicherfähigkeit) und die Geschwindigkeit des Fluids sowie die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Grenzfläche (vgl. TU Ilmenau [142]). Der Wärmeübergangskoeffizient ist demnach keine Stoffgröße. Er gibt den zwischen dem strömenden Fluid und der festen Wand ausgetauschten Wärmestrom pro Temperaturdifferenz und Fläche an. Der Wärmeübergangskoeffizient wird in der Regel experimentell bestimmt, kann

aber auch zahlenmäßig über die Lösung der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie berechnet werden.

Die Herleitung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt durch die Nußelt-Zahl. (W.Nußelt - deutscher Physiker (1882-1957)):

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{konv}} \cdot L_0}{\lambda_F} \quad (28)$$

mit:

$Nu$	Nußelt Zahl [-]
$L_0$	Charakteristische Länge [m]
$\lambda_F$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids [W/(mK)]

Bei von außen aufgezwungener Strömung, wie sie an der dem Feuer zugewandten Seite eines Bauteils vorliegt, werden die Nußelt-Zahl durch die Reynolds-Zahl (O. Reynold - britischer Physiker (1842-1912)) und die Prandtl-Zahl definiert. Hierbei gibt die Reynolds-Zahl den Einfluss der Reibungs- und Trägheitskräfte auf das Strömungsfeld wieder während die Prandtl-Zahl das Temperatur- mit dem Geschwindigkeitsfeld verknüpft.

Bei freier Konvektion entfällt die aufgezwungene Geschwindigkeit als Einflussgröße. Dieser Vorgang tritt unter Brandbeanspruchung vorrangig auf der brandabgewandten Seite sowie in der Abkühlphase auf. Hierbei wird die Reynolds-Zahl  $Re$  durch die Grashof-Zahl  $Gr$  (F. Grashof - deutscher Maschinenbauingenieur (1826-1893)) ersetzt. Diese beinhaltet das Verhältnis von Auftriebs- und Viskositätskräften in der Grenzschicht (vgl. Baehr *et al.* [7]).

Sowohl bei freier als auch bei erzwungener Konvektionsströmung können turbulente oder laminare Strömungen durch Störungen in der Grenzschicht entstehen, die durch Oberflächenrauigkeiten oder aufgeprägte Strömungen herbeigeführt werden. Ob diese Störungen gedämpft oder verstärkt werden, hängt bei erzwungener Strömung vom Verhältnis der Trägheitskräfte zu den viskosen Kräften ab (Reynolds-Zahl) und bei freier Strömung vom Verhältnis der Auftriebskräfte zu den viskosen Kräften (Grashof-Zahl). Sofern relativ große viskose Kräfte vorherrschen, das heißt kleine Reynolds und Grashof-Zahlen vorliegen, werden natürlich auftretende Störungen in der Grenzschicht abgeschwächt und die Strömung bleibt laminar. Treten jedoch große Reynolds- und Grashof-Zahlen auf ( $Re > 5 \cdot 10^5$  und  $Gr > 4 \cdot 10^8$ , bei Strömungen über eine Platte), werden die Störungen verstärkt und es tritt ein Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung ein (vgl. DiNenno *et al.* [65]).

Wie man Abbildung 3.3 entnehmen kann, gibt es starke Unterschiede zwischen laminarer und turbulenter Strömung. In der laminaren Grenzschicht läuft die Bewegung des Fluids stark geordnet ab, wo hingegen die Bewegung der Fluidteilchen in der turbulenten Grenzschicht sehr ungeordnet abläuft und starke Verwirbelungen auftreten. Diese Verwirbelungen bewirken eine stärkere Vermischung mit dem umgebenden Fluid, wodurch die Dicke der Grenzschicht anwächst. Das Profil der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur im Vergleich zum Bereich der laminaren Strömung wird flacher und es liegt eine geringere Verdichtung vor.

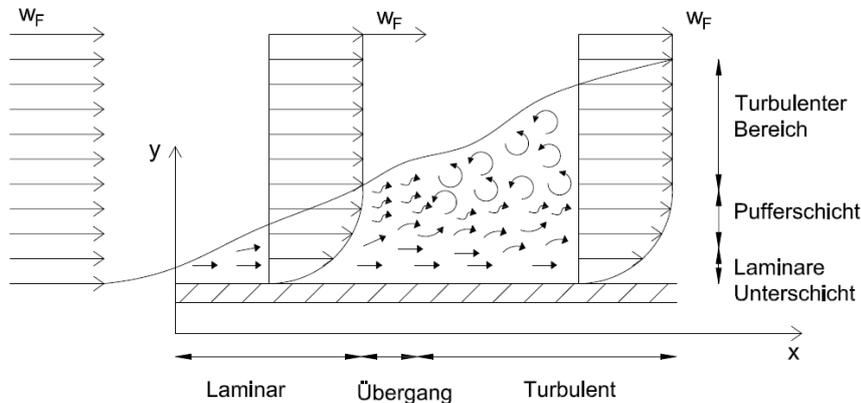


Abbildung 3.3: Grenzschichtmodell an überströmter Platte bei erzwungener Konvektion basierend auf Uni Magdeburg [147]

Für brandbeanspruchte Bauteile wird der Wärmeübergangskoeffizient für den konvektiven Wärmeübergang maßgebend. Dabei wird nach DIN EN 1991-1-2 für alle Bauteiloberflächen auf der brandabgekehrten Seite, deren Wärmeübergang über freie Konvektion beschrieben werden kann, ein Wärmeübergangskoeffizient von  $\alpha_{konv} = 4 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  angenommen. Bei Bauteilen, die direkt dem Brand ausgesetzt sind, liegt eine erzwungene Konvektion vor. Nach DIN EN 1991-1-2 wird hierfür ein Wärmeübergangskoeffizient von  $25 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  angenommen.

### 3.1.3 Wärmestrahlung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung findet mittels elektromagnetischer Wellen statt. Die Temperaturstrahlung erfolgt durch feste, flüssige oder gasförmige Materie. Sie tritt aber auch im Vakuum auf, da im Gegensatz zu Wärmeleitung und Konvektion kein materieller Träger notwendig ist. Mittels elektromagnetischer Wellen wird die Wärme von einem wärmeren Körper zu einem kälteren Körper transportiert. Dabei wird die innere Energie des ausstrahlenden (emittierenden) Körpers in Strahlungsenergie umgewandelt, die mittels elektromagnetischer Wellen abtransportiert wird. Die Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen liegt hierfür etwa zwischen  $0,4 \mu\text{m}$  bis  $1 \text{ mm}$ . Dieser Bereich deckt das sichtbare Licht und die Infrarotstrahlung ab. Die transportierte Energie, die auf feste, flüssige oder gasförmige Materie auftrifft, wird in Abhängigkeit der Eigenschaften der Materie von dieser teilweise reflektiert (Reflexion), durchgelassen (Transmission) oder absorbiert (Absorption). Der Gesamtstrahlungsanteil lässt sich wie folgt darstellen:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{29}$$

mit:

- $\alpha$             Absorption [-]
- $\rho$             Reflexion [-]

$\tau$  Transmission [-]

Es lässt sich feststellen, dass jeder Körper, dessen Temperatur über den absoluten Nullpunkt liegt, Strahlung aussendet. Mit welcher Intensität der Körper die Strahlung aussenden kann, hängt von dessen Eigenschaft ab.

Der *schwarze Körper* sendet bei einer bestimmten Temperatur Strahlen mit maximaler Intensität aus. Als idealer Strahler kann seine Ausstrahlung von keinem anderen Körper gleicher Temperatur überboten werden. Daher steht für den schwarzen Körper der maximale Emissionsgrad ( $\varepsilon = 1$ ). Dieser Höchstwert gilt auch für die Absorption von Wärmestrahlung ( $\alpha = 1$ ).

Die Fähigkeit anderer Körper bei gleicher Temperatur Strahlung auszusenden wird mithilfe des spektralen Emissionsgrades bestimmt. Dabei wird das Verhältnis der spektralen Strahlungsintensität eines Körpers mit der spektralen Strahlungsintensität des schwarzen Körpers unter gleicher Temperatur verglichen (vgl. Böckh [21]).

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{I(\lambda, T)}{I_S(\lambda, T)} \quad (30)$$

mit:

$\varepsilon_{\lambda}$  Spektraler Emissionsgrad [-]  
 $I$  Spektrale Strahlungsintensität des realen Körpers [W/m<sup>2</sup>]  
 $I_S$  Spektrale Strahlungsintensität des schwarzen Körpers [W/m<sup>2</sup>]

Ein Körper wird als selektiver Strahler bezeichnet, wenn dessen spektraler Emissionsgrad von der Temperatur oder der Wellenlänge abhängt. Dies trifft beispielsweise auf elektrisch leitenden Materialien zu. Sofern der spektrale Emissionsgrad für alle Wellenlängen konstant bleibt und nur noch von der Temperatur abhängt, spricht man von einem grauen Strahler.

Mithilfe des gesamten Emissionsgrades  $\varepsilon$  wird das Verhältnis des in den Halbraum emittierten Wärmestroms eines Körpers zum emittierten Wärmestrom des schwarzen Körpers ausgedrückt.

$$\varepsilon(T) = \frac{\dot{E}(T)}{\dot{E}_S(T)} \quad (31)$$

mit:

$\varepsilon$  Gesamter Emissionsgrad [-]  
 $\dot{E}$  Wärmestrom eines Körpers [W]  
 $\dot{E}_S$  Wärmestrom des schwarzen Körpers [W]

Dabei wird der Wärmestrom aus der Integration über die Strahlungsintensität aller Wellenlängen berechnet. Für den schwarzen Körper der Temperatur  $T$  ergibt sich pro Oberflächenelement ein in den Halbraum emittierter Wärmestrom durch das Gesetz nach Stefan (J. Stefan - österreichischer Physiker (1835-1893)) und Boltzmann (L. Boltzmann - österreichischer Physiker (1844-1906)):

$$\dot{E}_s(T) = \int_0^{\infty} I_s(\lambda, T) = \sigma \cdot T^4 \quad (32)$$

mit:

$\dot{E}_s$	Wärmestrom des schwarzen Körpers [W]
$I_s$	Spektrale Strahlungsintensität des schwarzen Körpers [W/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
$T$	Absolute Temperatur des Körpers [K]

Für graue Körper gilt: (33)

$$\varepsilon(T) = \varepsilon_\lambda(T)$$

Das Kirchhoff'sche Gesetz (G.R. Kirchhoff - deutscher Physiker (1824-1887)) folgt aus dem Strahlungsgleichgewicht zwischen dem schwarzen Körper und einem realen Körper bei gleicher Temperatur. Es besagt, dass ein Körper dieselbe Wärmestrahlung emittiert, die er absorbiert.

$$\varepsilon = \alpha \quad (34)$$

mit:

$\varepsilon$	Emission
$\alpha$	Absorption

Beim grauen Strahler werden alle auftreffenden Strahlen im gesamten Wellenlängenbereich zum gleichen Anteil absorbiert ( $\varepsilon < 1$ ). Dies gilt näherungsweise für alle Nichtleiter, wie zum Beispiel Holz. Elektrisch leitende Körper, wie Metalle und Flüssigkeiten werden als farbige Körper bezeichnet. Bei diesen werden bestimmte Wellenlängen, entsprechend der Farbe, von den auftreffenden Strahlen bevorzugt reflektiert.

Die Wärmestromdichte  $\dot{q}_s$  für reale Körper lässt sich dann wie folgt bestimmen:

$$\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (35)$$

Die Abstrahlung erfolgt, je nach Oberflächenbeschaffenheit, nicht einheitlich in alle Richtungen des Halbraumes. Nach dem Richtungsgesetz von Lambert (J.H. Lambert - schweizerisch elsässischer Mathematiker und Physiker (1728-1777)), ist die Intensität einer von einem Flächenelement  $dA$  ausgesandten diffusen Strahlung in jede Richtung des Raumes gleich groß. Die Strahlungsdichte nimmt jedoch proportional zum Cosinus des Winkels  $\beta$  zur Normalen ab (vgl. Böckh [21]).

$$\dot{q}_\beta = \dot{q}_n \cdot \cos\beta \quad (36)$$

mit:

$\dot{q}_\beta$	Wärmestromdichte unter dem Winkel $\beta$ zur Normalen [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_n$	Wärmestromdichte in Richtung der Normalen [W/m <sup>2</sup> ]
$\cos\beta$	Winkel $\beta$ zur Normalen [-]

Da viele Stoffe graue Strahler sind, ist das Richtungsgesetz hierfür annähernd gültig.

**Emissionsverhältnisse Technischer Oberflächen** – Die Emissionsverhältnisse von Körpern sind von deren Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur, der Richtungsbeziehung und der Wellenlänge der Strahlung abhängig. Die Oberflächenbeschaffenheit ist jedoch durch Verschmutzung, Oxidation, Korrosion und Alterung zeitlich veränderlich. Im Brandfall darf entsprechend der DIN EN 1991-1-2 [54] für beanspruchte Oberflächen ein Emissionsgrad von 0,8 verwendet werden. Sofern in den materialspezifischen weiterführenden Eurocodes spezifische Angaben zum Emissionsgrad gemacht werden, sind jedoch diese heranzuziehen. Für Baustoffe wie Holzfaserverleimplatten, Zellulosedämmung, Gipsplatten, Holzwerkstoffplatten, etc., die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, wird ein Emissionsgrad von 0,8 verwendet.

**Gasstrahlung** - Auch Gase emittieren und absorbieren Strahlung. Die elementaren Gase wie  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , zweiatomige Gase und Edelgase sind diatherm, d.h. für Wärmestrahlen durchlässig. Andere Gase und Dämpfe wie z.B.  $CO_2$  und  $H_2O$  emittieren und absorbieren Strahlen, wobei bei Kohlenwasserstoffen die Strahlungsintensität mit der Zahl der Atome pro Molekül zunimmt. Trockene Luft darf, da sie nur geringe Anteile an  $CO_2$  enthält, als für Wärmestrahlen durchlässig betrachtet werden.

Brenngase bestehen je nach Zusammensetzung des Brennstoffes aus Teilen an Stickstoff, unverbranntem Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid. Strahlungsfähig sind im Brandraum neben den Gasen  $CO_2$  und  $H_2O$  auch Ruß- und Aschepartikel (vgl. Böckh [21]).

Um die Emissivität  $\varepsilon$  der Gas-Ruß-Gemische im Raum bestimmen zu können, müssen der Volumenanteil und die Absorptionskoeffizienten der Kohlenstoffpartikel sowie der Ruß- und Aschepartikel, die Ausdehnung der Flamme, die Teildrücke der jeweils nicht durchlässigen Brenngasanteile und die Gastemperatur bekannt sein (vgl. Di Nenno *et al.* [65]).

Eine gute Annäherung ohne die experimentelle Bestimmung der vorher genannten Information liefert folgende Gleichung:

$$\varepsilon_{Fl} = (1 - e^{-K_S S}) + \varepsilon_G \cdot e^{-K_S S} \quad (37)$$

mit:

$\varepsilon_{Fl}$	Emissionszahl der Flamme [-]
$\varepsilon_G$	Emissionszahl des Gases [-]
$S$	Gleichmäßige Ausdehnung der Gasschicht [m]
$K_S$	Effektiver Absorptionskoeffizient von Ruß und Asche [ $m^{-1}$ ]

**Wärmeübertragung zwischen festen Oberflächen** - Findet ein Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen statt, werden von der Fläche 1 ( $dA_1$ ) entsprechend der Temperatur  $T_1$  und den Eigenschaften der Fläche Strahlen emittiert. Ein Teil dieser Strahlen trifft auf die Fläche 2, wobei sie dort teilweise absorbiert, reflektiert oder durchgelassen werden. Außerdem emittiert die Fläche 2 ( $dA_2$ ) entsprechend ihrer Temperatur  $T_2$  und ihrer Eigenschaften wiederum

Strahlen, die neben den reflektierten Strahlen teilweise die Fläche 1 erreichen. So ergibt sich eine Wechselwirkung zwischen beiden Flächen. In Abbildung 3.4 wird der Strahlungsaustausch zwischen den beiden Flächen dargestellt.

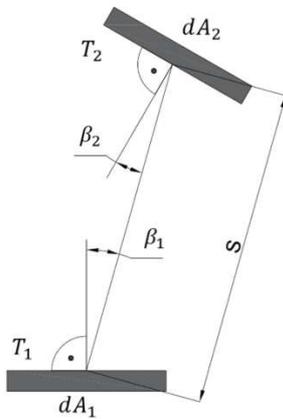


Abbildung 3.4: Zur Berechnung der Einstrahlzahl

Die geometrische Beziehung wird mithilfe der Einstrahlungszahl (Sichtfaktor)  $\varphi_{12}$  beschrieben:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi \cdot s^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad (38)$$

mit:

$\varphi_{12}$	Einstrahlzahl [-]
$dA_1; dA_2$	Flächenelement 1/ Flächenelement 2 [m <sup>2</sup> ]
$s$	Abstand der Flächen [m]
$\beta_1; \beta_2$	Winkel zwischen der Verbindungslinie und der Flächennormale [-]

Ohne Berücksichtigung der Reflexion, wird der Wärmestrom für einfache Formen, bei welchen die lineare Ausdehnung der Flächen wesentlich größer als ihr Abstand ist, wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (39)$$

mit:

$\dot{Q}_{12}$	Wärmestrom [W]
$C_{12}$	Strahlungsaustauschzahl [-]
$A$	Fläche [m <sup>2</sup> ]
$T_1$	Absolute Temperatur der Fläche des Strahlers [K]
$T_2$	Absolute Temperatur der Fläche des Empfängers [K]

und

$$C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot \varphi_{12}}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \varphi_{12}} \quad (40)$$

mit:

$\varphi_{12}$  Einstrahlzahl [-]  
 $\varepsilon_1; \varepsilon_2$  Emissionsgrad Fläche 1 bzw. 2 [-]

Weitere Strahlungsaustauschzahlen oder analytische Beziehungen für einfache Geometrien sind im VDI-Wärmeatlas [131] zusammengestellt.

Im Brandfall wird nach DIN EN 1991-1-2 von einer Einstrahlzahl von 1 ausgegangen, da die gesamte Oberfläche in Strahlungs- und Wärmeaustausch mit Ihrer Umgebung, dem Fluid, steht und somit von jeder Position Wärmestrahlung an die Oberfläche abgegeben wird.

Darüber hinaus wird unter Brandbeanspruchung die Wärmeenergie sowohl über Strahlung als auch über Konvektion an die Bauteiloberfläche übertragen. Die gesamte Wärmestromdichte  $\dot{q}_{ges}$  setzt sich demnach aus dem Anteil an Konvektion und Strahlung zusammen:

$$\dot{q}_{ges} = \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{Str} \quad (41)$$

mit:

$\dot{q}_{konv}$  Wärmestromdichte durch Konvektion [W/m<sup>2</sup>]  
 $\dot{q}_{Str}$  Wärmestromdichte durch Strahlung [W/m<sup>2</sup>]

Setzt man voraus, dass die Bedingungen eines grauen Strahlers in einer schwarzen Umgebung gelten, darf der Wärmestrom mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\dot{q}_{ges} = \alpha_{konv} \cdot (T_H - T_O) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{Str}^4 - T_O^4) \quad (42)$$

mit:

$\dot{q}_{ges}$  Gesamte Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha_{konv}$  Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $T_H$  Heißgastemperatur [K]  
 $T_O$  Temperatur der Oberfläche [K]  
 $T_{Str}$  Strahlungstemperatur aller ausstrahlenden Flächen und Gase [K]  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]  
 $\varepsilon$  Emissionsgrad der Oberfläche [-]

Dabei bildet sich der Wärmestrom aus konvektiven Anteilen aus der Temperaturdifferenz zwischen Heißgastemperatur und Oberflächentemperatur multipliziert mit einem Proportionalitätsfaktor, der als Wärmeübergangskoeffizient bezeichnet wird. Der Anteil aus der Strahlung ist als Differenz zwischen absorbiertes Einfallstrahlung und emittierter Strahlung, die von der Oberfläche aufgenommen wird, zu verstehen.

Zur Zusammenführung der unterschiedlichen Wärmeübertragungsmechanismen führt Wickström [151] die adiabaten Oberflächentemperaturen ein:

$$0 = \alpha_{\text{konv}} \cdot (T_{\text{H}} - T_{\text{ASTM}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{Str}}^4 - T_{\text{ASTM}}^4) \quad (43)$$

mit:

$T_{\text{ASTM}}$  adiabate Oberflächentemperatur [K]

Zieht man nun Gleichung (43) von (42) ab, wird der Wärmestrom wie folgt ermittelt:

$$\dot{q}_{\text{ges}} = \alpha_{\text{konv}} \cdot (T_{\text{ASTM}} - T_{\text{O}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{ASTM}}^4 - T_{\text{O}}^4) \quad (44)$$

Da sich die Heißgastemperatur  $\vartheta_{\text{H}}$  und die Strahlungstemperatur aller ausstrahlenden Flächen und Gase  $\vartheta_{\text{Str}}$  kaum voneinander unterscheiden, darf bei Emissionswerten der Oberflächen von etwa 0,8 angenommen werden, dass die adiabate Oberflächentemperatur  $\vartheta_{\text{ASTM}}$  der Brandraumtemperatur  $\vartheta_{\text{B}}$  entspricht.

Vereinfachend wird darüber hinaus entsprechend dem konvektivem Wärmestrom ein strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{\text{Str}}$  eingeführt. Letztlich ergibt sich daher:

$$\dot{q}_{\text{ges}} = (\alpha_{\text{konv}} + \alpha_{\text{Str}}) \cdot (T_{\text{B}} - T_{\text{O}}) \quad (45)$$

mit:

$\dot{q}_{\text{ges}}$  Gesamte Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_{\text{konv}}$  Wärmeübergangskoeffizient aus Konvektion [W/(m<sup>2</sup>K)]

$\alpha_{\text{Str}}$  Wärmeübergangskoeffizient aus Strahlung [W/(m<sup>2</sup>K)]

$$\alpha_{\text{Str}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{(T_{\text{B}}^4 - T_{\text{O}}^4)}{(T_{\text{B}} - T_{\text{O}})} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{B}}^3 + T_{\text{B}}^2 T_{\text{O}} + T_{\text{B}} T_{\text{O}}^2 + T_{\text{O}}^3)$$

$T_{\text{B}}$  Brandraumtemperatur [K]

$T_{\text{O}}$  Temperatur der Oberfläche [K]

### 3.2 Phasenumwandlung

Durch Temperaturänderung können sich Phasenübergänge oder auch chemische und biologische Reaktionen ergeben. Entsprechend werden unter Brandbeanspruchung Vorgänge wie Pyrolyse, das Entweichen von Materialfeuchte und Änderungen der Atomstruktur bedeutsam. Diese werden in der Thermodynamik mithilfe der Umwandlungsenthalpie (siehe Kapitel 3.1.1) beschrieben.

Sofern ein Körper bei einer Phasenumwandlung Energie aufnimmt oder abgibt (endotherme oder exotherme Reaktion) ohne dabei seine Temperatur zu verändern, spricht man auch über die latente Wärme pro Volumeneinheit  $H_{\text{lat}}$ . Entweicht das hygroskopisch gebundene Wasser in Holzfaser- oder Zellulosedämmstoffen, kann die frei werdende latente Wärme pro Volumeneinheit mithilfe des Feuchtegehalts ermittelt werden.

$$H_{\text{lat}} = \rho \cdot \Delta h \cdot \frac{u}{100} \quad (46)$$

mit:

$H_{\text{lat}}$	latente Wärme pro Volumeneinheit [kJ/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta h$	Verdampfungsenergie von Wasser (2256) [kJ/kg]
$u$	Feuchtegehalt des untersuchten Stoffes [M-%]

Bei numerischen Simulationen werden solche Phasenübergänge entweder mithilfe der temperaturabhängigen spezifischen Wärmespeicherkapazität oder der Enthalpie berücksichtigt. Steigt die spezifische Wärmespeicherkapazität bei einem Phasenwechsel sehr stark an, müssen kleine Temperatur- und Zeitschritte gewählt werden, um Konvergenzprobleme auszuschließen. Diese Probleme können meist durch die Anwendung des Enthalpie-Ansatzes umgangen werden. Die Enthalpie kann dabei mithilfe der temperaturabhängigen Rohdichte und der spezifischen Wärmespeicherkapazität zwischen den Temperaturbereichen bestimmt werden.

$$H = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \rho(\vartheta) \cdot c_p(\vartheta) \cdot d\vartheta \quad (47)$$

mit:

$H$	Enthalpie [J]
$\vartheta_1$	Unterer Temperatur [°C]
$\vartheta_2$	Oberer Temperatur [°C]
$\rho(\vartheta)$	Temperaturabhängige Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p(\vartheta)$	Temperaturabhängige spezifische Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg K)]

In dieser Arbeit werden die Phasenübergänge durch effektive Materialkennwerte berücksichtigt.

### 3.3 Feuchtetransport

Bei der Wärmetransportberechnung müssen bei hygroskopischen und kapillaraktiven Stoffen wie Holzfaserdämmstoffen auch Enthalpieströme durch Feuchtebewegung berücksichtigt werden. Hygroskopische Stoffe binden solange Wassermoleküle, bis sich eine der Umgebungsfeuchte entsprechende Ausgleichsfeuchte eingestellt hat. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und Klimaparameter kann die Feuchte fest, flüssig oder gasförmig vorkommen. Ursachen dieser Feuchtetransporte sind Temperatur-, Druck- und Konzentrationsunterschiede (vgl. Künzel [105]).

Neben der Bestimmung der Enthalpie nach einem Phasenwechsel nach Absatz 3.2 werden die Enthalpieströme durch Feuchtetransport wie folgt berücksichtigt:

$$\dot{q}_{\text{Strom}} = \dot{m}_{\text{Strom}} \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (48)$$

mit:

$\dot{q}_{\text{Strom}}$	Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{m}_{\text{Strom}}$	Transportstromdichte [kg/(m <sup>2</sup> s)]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg K)]
$\vartheta_1$	Untere Temperatur [°C]
$\vartheta_2$	Oberer Temperatur [°C]

Bei der für die vorliegende Arbeit benötigten transienten nichtlinearen Temperaturfeldberechnung wird die Wärme durch Wärmeleitung (Konduktion), Wärmestrahlung und Wärmeübergang (Konvektion) übertragen. Wärmeströme durch Feuchtebewegungen bleiben dabei unberücksichtigt.

## 4 Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe

### 4.1 Allgemeines

Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe gehören zur Gruppe der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, welche zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit einen Anteil von ca. 9 % am Gesamtmarkt der Dämmstoffe in Deutschland erzielen. Der größte Absatz ist bei Dämmstoffen aus fossilen Rohstoffen mit einem Marktanteil von ca. 48 % und mineralischen Dämmstoffen mit einem Marktanteil von ca. 43 % zu verzeichnen (vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2021 [72]).

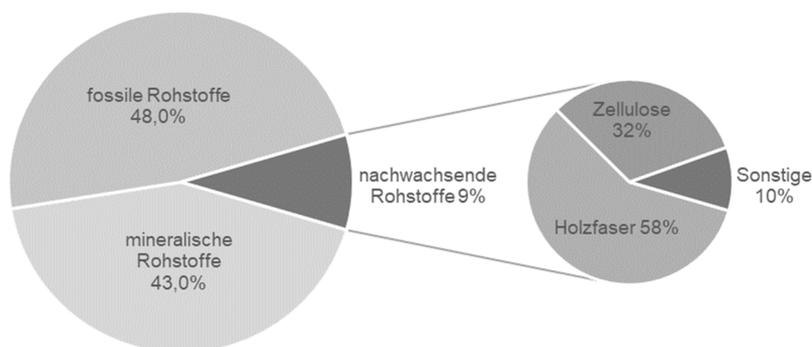


Abbildung 4.1: Absatzvolumen der Dämmstoffe in Deutschland im Jahr 2019 basierend auf Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) [72]

Als nachwachsender Rohstoff wird der Einsatz von Zellulose und Holzfaser gefördert (beispielsweise CO<sub>2</sub>-Bonus (Bauzentrum München [10])). Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit von Holzkonstruktionen wird angestrebt, Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wirtschaftlich attraktiver zu gestalten.

Die beiden Dämmstoffe finden ihren Einsatz in der Wärme- und Schalldämmung. Ihre Dämmwirkung beruht auf dem Einschluss ruhender Luft in den Faserzwischenräumen (vgl. Ökologisches Baustoffinformationszentrum WECOBIS [116]).

Holzfaserdämmstoffe gehören zur Gruppe der Naturfaserdämmstoffe und werden der Gruppe der nachwachsenden Rohstoffe zugeordnet. Sie bestehen zu mindestens 80% aus Holzfasern. Die Holzfasern stammen aus Hackschnitzeln, die vorwiegend aus Resthölzern in Form von Schwarten und Spreißeln gewonnen werden. Die Resthölzer bestehen größtenteils aus Nadelhölzern und liefern eine hohe Faserqualität. Die Herstellung der Platten oder flexiblen Matten erfolgt im Nass- oder Trockenverfahren. Im Nassverfahren werden die holzeigenen Bindekräfte aktiviert. Dabei werden die Holzfasern mit Wasser zu einem Brei vermischt, der über mechanische Pressen entwässert und geformt wird. Unter Zuführung von Hitze wird der Faserkuchen zum Abbinden gebracht. Nach der Trocknung werden die Platten zugeschnitten.

Je nach Einsatzgebiet der Platten können vor dem Pressen auch harz-, bitumen-, oder latexhaltige Zusatzmittel beigemischt werden, die die Festigkeit steigern oder wasserabweisende Eigenschaften verbessern. Im Trockenverfahren werden die Holzfasern bei der Herstellung von flexiblen Matten zuerst getrocknet und anschließend mit textilen Bindemitteln vermischt. Hinterher werden sie abgestreut und geformt. Mithilfe von warmer Luft werden die Bindefasern thermisch aktiviert. Zuletzt werden die flexiblen Matten auf die gewünschte Größe zugeschnitten. Bei der Herstellung von Platten im Trockenverfahren wird alternativ zu den textilen Bindefasern in der Regel ein Polyurethan-Harz beigemischt und anstelle der Lufttrocknung ein Dampf-Luftgemisch zum Aushärten genutzt. Oftmals werden Borate, Ammoniumphosphat, Aluminiumsulfat oder Alaun zum Schutz vor Schimmel und Ungeziefer sowie zur Verbesserung der brandschutztechnischen Eigenschaften eingesetzt. (vgl. FNR 2019 [71])

Holzfaserdämmstoffe sind in Form von Matten, Platten oder als Fasern erwerblich. Im Nassverfahren hergestellte Matten oder Platten weisen Dicken von ca. 3 mm bis 32 mm und Rohdichten von  $100 \text{ kg/m}^3$  bis  $300 \text{ kg/m}^3$  auf. Dickere Platten können durch die werkseitige Verklebung der Platten mit Wasserglas oder Holzleim hergestellt werden. Die im Trockenverfahren produzierten Platten verfügen über Dicken von 20 mm bis 300 mm und Rohdichten von  $40 \text{ kg/m}^3$  bis  $230 \text{ kg/m}^3$  (vgl. vdnr 2020 [148]). Die Fasern werden entweder frei aufliegend mit Rohdichten von  $25 \text{ kg/m}^3$  bis  $40 \text{ kg/m}^3$  verarbeitet oder in ein Bauteil mit Rohdichten von  $30 \text{ kg/m}^3$  bis  $50 \text{ kg/m}^3$  eingeblasen.

Ihren Einsatz finden die flexiblen Matten und Fasern vor allem als Gefachdämmung in Dach, Decke und Wand. Die festen Platten werden als Dämmabschluss, Unterdach, abgehängte Decke, Trittschall, Wärmedämmverbundsystem und vieles mehr verwendet und zeichnen sich durch eine deutlich höhere Rohdichte aus.

Vor allem der sehr gute sommerliche Wärmeschutz ist bei der Verwendung von Holzfaserdämmungen durch die hohe Rohdichte, die hohe Wärmespeicherkapazität und die geringe Wärmeleitfähigkeit hervorzuheben. Außerdem ist der Dämmstoff kapillaraktiv und diffusionsoffen.

Die Anforderungen an verschiedene Produkteigenschaften wie z.B. der Wärmeleitfähigkeit von flexiblen Holzfaserdämmstoffen und Holzfaserplatten sind DIN EN 13171 [42] zu entnehmen. Weitere Anforderungen an Leistungseigenschaften von Holzfaserplatten sind in der DIN EN 622-4 [59] sowie in der DIN EN 13986 [49] enthalten.

Zellulosedämmstoffe bestehen aus zerfasertem, recyceltem Zeitungspapier. Da Zeitungspapier hauptsächlich aus dem Rohstoff Holz hergestellt wird, sind die Zelluloseflocken sekundär mit dem natürlichen Stoffkreislauf verbunden und gehören daher auch zur Gruppe der nachwachsenden Rohstoffe (vgl. bba Bau-Beratung-Architektur [11]). Äußerst selten wird auch Frischzellulose verwendet. Der zugehörige Primärenergieeinsatz ist im Vergleich zum reinen Recyclingmaterial jedoch deutlich erhöht.

Zellulosedämmstoffe werden überwiegend in Form von losen Flocken angeboten. Dämmmaten aus Zellulose finden kaum Anwendung. Der Vorteil der Flocken liegt vor allem in der Anwendung als Hohlraumdämmung. Je nach Einsatzgebiet und Vorfertigungsgrad werden die Zelluloseflocken entweder durch loses Aufschütten, im offenen Aufblas-Verfahren, durch das Einblasen in geschlossene Bauteilhohlräume oder durch einen Auftrag im Feuchtsprühverfahren in das Bauteil eingebracht. Das Einblasen der Flocken darf nur von geschulten Fachbetrieben durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise soll sicherstellen, dass die deklarierten bauphysikalischen Eigenschaften tatsächlich vorzufinden sind. Im Gegensatz zu unsachgemäß eingebauten Matten können mithilfe des Einblasens loser Flocken bauphysikalisch kritische Hohlräume vermieden werden.

Lose aufgeschüttete Zellulose wird oft in Decken oder Böden zwischen Lagerhölzern verwendet. In Decken und mäßig geneigten Flächen wird die Zellulose teilweise offen verblasen. Die häufigste Einbauart der Zelluloseflocken in Decken und Dächern sowie Wänden findet jedoch mittels Einblasverfahren statt. Bei Außenwänden wird auch das Feuchtsprühverfahren angewandt.

Durch das Hinzufügen von Borsalzen und/oder anderer Additive in gesundheitlich unbedenklichen Mengen wird die Zellulosedämmung beständig gegen Verrottung und Schädlingsbefall. Außerdem werden durch diese Zusatzstoffe verbesserte Eigenschaften im Brandfall erreicht. Die Entsorgung der Zellulose mit Zusatzmitteln erfolgt daher nur durch thermische Verwertung, über die Bauschuttdeponie oder durch Wiederverwendung.

Durch die sehr hohe spezifische Wärmespeicherfähigkeit und die geringe Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig hohem Raumgewicht bieten Bauteile mit Zellulosedämmung einen guten sommerlichen Wärmeschutz. Das kapillaraktive Verhalten der Zellulose ermöglicht außerdem eine gute Feuchteregulierung. Preislich ist die eingebaute Zellulose auch im Vergleich zu konventionellen mineralischen Dämmstoffen wettbewerbsfähig (vgl. FNR 2014 und 2018 [70] [71]).

Die Anforderungen an verschiedene Produkteigenschaften von Zelluloseeinblasdämmstoffen sind der DIN EN 15101-1 [51] zu entnehmen.

Zellulose und Holzfaserdämmstoffe weisen einen sehr geringen Primärenergiebedarf von ca. 50-100 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 70-100 kWh/m<sup>3</sup> auf – Steinwolle und Glaswolle hingegen benötigen einen Primärenergiebedarf von 150-400 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 250-500 kWh/m<sup>3</sup> [70]. Außerdem entstehen bei der Herstellung im Vergleich zu mineralischen Dämmstoffen geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen (Zellulose ca. 40-60 kg/m<sup>3</sup>, Holzfaserdämmstoff 30-60 kg/m<sup>3</sup>, Steinwolle 90- 240 kg/m<sup>3</sup> und Glaswolle 150-300 kg/m<sup>3</sup>) [70].

Eine Zusammenstellung wesentlicher bauphysikalischer Eigenschaften unter Raumtemperatur findet sich für die meist genutzten Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe in Deutschland in Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Zusammenstellung einiger Eigenschaften von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen [1–5, 15–20, 28, 29, 79–82, 88, 90–94, 117, 118, 122–130, 143–145]

Eigenschaften	Einbau	Holzfaser			Zellulose Flocken
		Flocken	Matten	Platten	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0,038-0,043	0,038-0,04	0,037-0,055	0,038-0,04
Spez. Wärmespeicherkapazität	[J/(kgK)]	2100	2100	2100	2100-2544
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		50-60	110-270	
	frei aufliegend	[kg/m <sup>3</sup> ]	25-40		25-50
	Raum ausfüllend	[kg/m <sup>3</sup> ]	29-50		30-65
	offen eingeblasen	[kg/m <sup>3</sup> ]	32-38		30-45
	Aufsprühverfahren	[kg/m <sup>3</sup> ]			30-65
Dampfdiffusionswiderstand	[-]	1-3	1-3	3-5	1-3

#### 4.2 Eigenschaften unter erhöhten Temperaturen

Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe sind normal entflammbar Baustoffe und gehören der Brandklasse E entsprechend der europäisch harmonisierten DIN 13501-1 [44] an. In Deutschland werden sie gemäß DIN 4102-1 [33] klassifiziert und entsprechen der Baustoffklasse B2. Außerdem neigen die beiden Baustoffe zum Schwelen und Glimmen. Diese Eigenarten führen dazu, dass die Dämmstoffe infolge der jeweiligen Landesbauordnung nur in bestimmten Gebäudeklassen verwendet werden. Ganzheitliche Brandschutzkonzepte, die auf Kompensationen oder Ergebnisse aus Forschungsprojekten zurückgreifen, ermöglichen den Einsatz normal entflammbarer Dämmstoffe auch in höheren Gebäudeklassen oder Sonderbauten (vgl. Küppers [106]). Über dies hinaus sind auch schwer entflammbar und gemäß DIN EN 16733 [53] geprüfte nicht glimmende Holzfaserdämmstoffe erhältlich.

Kolb *et al.* [102] untersuchten die Glimmbeschleunigung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die als zweimalige Ableitung der Massenabnahme nach der Zeit während eines kontinuierlichen Glimmens verstanden wird. Dabei wurde festgestellt, dass die Glimmbeschleunigung bei steigender Rohdichte dieser Dämmstoffe abnimmt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der zum Glimmen benötigte Sauerstoff durch die größere Verdichtung bei steigender Rohdichte im Material reduziert wird. Eine lineare Abnahme der Glimmbeschleunigung in Abhängigkeit der Rohdichte zeigte sich bei Holzfaserdämmstoffen mit Rohdichten zwischen ca. 60 kg/m<sup>3</sup> und 160 kg/m<sup>3</sup>, die im Trockenverfahren hergestellt wurden. Bei Holzfaserdämmstoffen aus dem Nassverfahren mit Rohdichten zwischen 160 kg/m<sup>3</sup> bis 250 kg/m<sup>3</sup> war eine

Abnahme der Glimmbeschleunigung erkennbar. Es konnte jedoch kein linearer Zusammenhang zwischen Glimmbeschleunigung und Rohdichte nachgewiesen werden. Beim Vergleich loser Holzfasern mit Zellulosefasern wurde ersichtlich, dass die beiden Dämmstoffe als lose Fasern eine nahezu identische Glimmbeschleunigung aufweisen. Die Zellulose mit borhaltigem Flammschutzmittel zeigte eine etwas geringere Beschleunigung im Vergleich zum gleichartigen Dämmstoff mit einem borfreien Flammschutzmittel. Die Gegenüberstellung loser Holzfasern mit der flexiblen Holzfasermatte legte eine höhere Glimmbeschleunigung der Matte bei gleicher Rohdichte dar. Dies ist durch den besseren Transport der Wärme aufgrund textiler Binfasern in der Matte sowie durch die geringere Konzentration an Flammschutzmittel im Vergleich zu den Flocken zu begründen. Holzfaserdämmplatten mit erhöhten Anteilen an Flammschutzmittel, die der Baustoffklasse D oder C zugeordnet werden, weisen eine bedeutend geringe Glimmbeschleunigung auf.

Bei Versuchen im Cone-Calorimeter nach ISO 5660-1 [89] unter Wärmestromdichten von  $20 \text{ kW/m}^2$  stellte Kampmeier [99] eine thermische Zersetzung von Holzfaserdämmstoffen bei Temperaturen von bereits  $150^\circ\text{C}$  fest. Diese sichtlichen Verfärbungen von Holzfaserdämmstoffen konnten auch in Durchwärmungsversuchen bei ca.  $170^\circ\text{C}$  Ofentemperatur bestätigt werden (vgl. Winter *et al.* [152]). Außerdem wurde eine Entzündung des Holzfaserdämmstoffes bei Versuchen mittels Hot-Disk-Verfahren (siehe Abschnitt 5.2) bei Temperaturen zwischen  $180^\circ\text{C}$  und  $200^\circ\text{C}$  ersichtlich.

Die thermische Zersetzung von eingeblasenen Zelluloseflocken wurde im Cone-Calorimeter hingegen erst bei  $225^\circ\text{C}$  beobachtet [99]. Mittels Hot-Disk-Verfahren wurden für Zellulose exotherme Reaktionen bei Temperaturen knapp über  $220^\circ\text{C}$  aufgezeichnet. Beim Berühren mit einem Heizstab ermittelten Teibinger *et al.* [137] für Zelluloseflocken mit Einbaudichten von  $50 \text{ kg/m}^3$  und für Holzfaserdämmstoffe mit Rohdichten von  $180 \text{ kg/m}^3$  Entzündungstemperaturen von ca.  $375^\circ\text{C}$ .

Die optische Verfärbung der Holzfaserdämmstoffe ab ca.  $170^\circ\text{C}$  kann auf die Zersetzungsreaktionen des Flammschutzmittels (meist Ammoniumsulfat oder Ammoniumphosphat) zurückgeführt werden (vgl. Tabelle 4-2). Bei etwas geringeren Temperaturen ab ca.  $100^\circ\text{C}$  beginnen bereits die Mantelpolymere zu schmelzen, die bei flexiblen Holzfaserdämmungen als textile Binfasern eingesetzt werden. Die Kristallschmelztemperatur der Kernpolymere beträgt in Abhängigkeit des eingesetzten Kunststoffes mindestens  $158^\circ$  bis  $270^\circ\text{C}$ . Alternativ zu den Bikomponenten-Fasern aus Kern- und Mantelkunststoffen werden den flexiblen Holzfasermatten auch Polyamide als textile Binfasern beigelegt, deren Schmelzvorgang ab ca.  $175^\circ\text{C}$  beginnt.

Die Einlagerung von Sauerstoff zwischen den Fasern bei geringer Rohdichte und die vergrößerte Oberfläche rufen im Gegensatz zu Vollholz eine frühzeitige Entzündung hervor. Die eingesetzten Flammschutzmittel verzögern diese frühzeitige Entzündung in begrenztem Umfang.

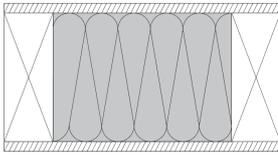
Meist beinhalten Zellulosedämmstoffe Borsalze (Borat) als Flammschutzmittel in gesundheitlich unbedenklichen Mengen. Deren Zersetzung beginnt bei Temperaturen von mehr als 1000°C (vgl. *GESTIS-Stoffdatenbank* [87]).

*Tabelle 4-2: Temperaturabhängige Prozesse von möglichen Bestandteilen aus Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen*

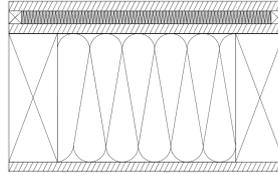
Temperatur	Bestandteil	Prozess
80-100°C	Wasser	Verdampfung
105-140°C [9]	Polyethylen als Mantelpolymer	Kristallit-schmelztemperatur
140°C-235°C [150]	Flammschutzmittel (Ammoniumphosphat, Ammoniumsulfat)	Zersetzung
158°C-270°C [9]	Polyester oder Polypropylen als Kernpolymer	Kristallit-schmelztemperatur
175°C-300°C [9]	Polyamid	Kristallit-schmelztemperatur
180°C	Lignin	Zersetzung
>1000°C [87]	Borat (Borsäure, Calciumsalz)	Schmelzpunkt
220°C	Zellulose	Zersetzung

### 4.3 Konstruktionsvarianten

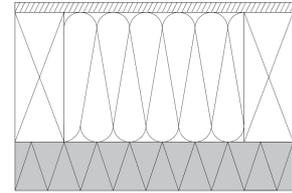
In der vorliegenden Arbeit werden biogene Dämmstoffe ausschließlich in Zusammenhang mit Holztafelbaukonstruktionen betrachtet. Winter *et al.* fassen die derzeit baupraktischen Holztafelbaukonstruktionen mit Holzfaser- oder Zellulosedämmstoffen zusammen [152]. Basierend auf diesen Untersuchungen werden zur Bestimmung des Raumabschlusses die Holzfaser- und Zellulosedämmungen als Gefachedämmung, als Dämmung in der Installationsebene, sowie als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) in Verbindung mit Holzrahmenkonstruktionen untersucht (vgl. Abbildung 4.2).



Flexible Holzfaser- und Zellulosedämmung als Gefachedämmung



Flexible Holzfaser- und Zellulosedämmung als Dämmung in der Installationsebene



Holzfaserdämmung als Wärme-dämmverbundsystem

Abbildung 4.2: Einsatz von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen in Holztafelkonstruktionen

In Kombination mit Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen werden im Holztafelbau meist Bekleidungen und Beplankungen aus Gips- oder Gipsfaserplatten, Massivholzplatten, OSB-Platten oder Spanplatten sowie Kombinationen dieser Platten verwendet. Für einige dieser Konstruktionsvarianten wurden Brandversuche unter einer Brandbeanspruchung entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve ausgewertet und in einer Datenbank zusammengefasst. Die Prüfberichte der Klein- und Großbrandversuche stammen aus Forschungsberichten und von Herstellern biogener Dämmstoffe. Diese Datenbank (vgl. Winter *et al.* [152]) dient im Folgenden der Optimierung der effektiven Materialkennwerte von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen (siehe Abschnitt 5.4) sowie der Validierung der ermittelten Gleichungen zur Bestimmung des Raumabschlusses gemäß Schleifer [120].

## 5 Temperaturabhängige Materialkennwerte für eine thermisch transiente Analyse

### 5.1 Grundlagen

Zur Beschreibung des Wärmetransports durch ein Bauteil unter Brandbeanspruchung werden die materialspezifischen Kennwerte, wie die Rohdichte, die spezifische Wärmespeicherkapazität und die spezifische Wärmeleitfähigkeit, des Bauteils benötigt. Wird die Funktion des Raumabschlusses eines mehrschichtigen Holzbauteils untersucht, werden für jede Bauteilschicht entsprechende Kennwerte erfragt. Unter Betrachtung der instationären, transienten Wärmeleitung werden zur Berechnung der Fourier'schen Differenzialgleichung (25) die temperaturabhängigen Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Rohdichte herangezogen. Die gesuchten Materialkennwerte sind für Baumaterialien vorwiegend unter Raumtemperatur bekannt. Für einige im Holztafelbau verwendeten Materialien wie Holz, Steinwolle, Glaswolle, Spanplatten, OSB-Platten, etc. sind temperaturabhängige Materialkennwerte unter anderem in der DIN EN 1995-1-2:2010 [55] und bei Schleifer [120] zu finden (vgl. Tabelle A. 1, Tabelle A. 2, Tabelle A. 3). Die materialspezifischen Kennwerte für biogene Dämmstoffe unter erhöhten Temperaturen sind bisher nicht verfügbar.

In der Regel werden zur Bestimmung des Wärmetransports effektive Materialkennwerte genutzt, um Vorgänge wie Pyrolyse, Rissbildung oder den Transport durch Verdampfung im Material zu berücksichtigen. Bei der Verdampfung des Wassers wird die Masse entweder an die Oberfläche oder in das Innere eines Querschnitts transportiert. Da das Wasser in kälteren Bereichen kondensiert, wird wiederum zusätzliche Energie zum Verdampfen benötigt. Die effektiven Kennwerte basieren meist auf experimentell bestimmten temperaturabhängigen Daten. Unter Berücksichtigung der physikalischen Vorgänge im Material werden die Kennwerte entsprechend angepasst. Durch die Anwendung angepasster Kennwerte sind in der Literatur oftmals diverse Angaben für ein Material zu finden. Verschiedene Autoren nutzen beispielsweise ungleiche Temperaturbereiche, um einen physikalischen Vorgang im Material zu beschreiben. Weitere Abweichungen entstehen, indem unterschiedlich viele Materialkennwerte (z.B. die spezifische Wärmekapazität oder eine Kombination aus Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität, etc.) angepasst werden. Auch die verschiedenen herangezogenen Messmethoden zur Bestimmung der temperaturabhängigen Materialkennwerte führen zu Differenzen bei der Bestimmung der Eigenschaften.

Derzeit liegen diverse effektive Materialkennwerte für Gipsplatten vor [24, 26, 27, 75, 98, 120, 136, 138], die vorwiegend auf Basis der experimentell bestimmten Eigenschaften von Harmathy [85], Sultan [132], Mehaffey *et al.* [113], Bénichou *et al.* [12] oder Wakili *et al.* [78] verändert wurden. Dabei wurde bei einigen Autoren eine erhöhte spezifische Wärmekapazität verwendet, die den Massetransport des verdampften Wassers widerspiegelt, sowie eine steigende Wärmeleitfähigkeit ab. ca. 600°C zur Berücksichtigung der Rissbildung im Material.

Die effektiven Kennwerte für brennbare Bekleidungen wie Massivholzplatten, Spanplatten und OSB-Platten sowie Holz beruhen vorwiegend auf gemessene Materialeigenschaften von Harmathy [85], Mehaffey *et al.* [113], Bénichou *et al.* [12] und Takeda *et al.* [136]. Für verschiedene

Holzarten ist eine Vielzahl an effektiven Kennwerten in der Literatur zu finden [12, 24–27, 55, 74, 75, 98, 113, 114, 119, 120, 132, 136, 138]. Mittels angepasster spezifischer Wärmekapazitäten werden der Massetransport durch das Verdampfen des Wassers bei ca. 100°C sowie der Vorgang der Pyrolyse zwischen ca. 200°-350°C abgebildet. Steigende Werte der Wärmeleitfähigkeiten repräsentieren die Verdampfung, die Rissbildung in der Holzkohle ab 500°C sowie deren Zersetzung ab ca. 800°C. Schleifer [120] leitet die effektiven Kennwerte für Spanplatten, OSB-Platten und Massivholzplatten auf Grundlage der Eigenschaften von Holz ab. Eine Modifikation wird zur Berücksichtigung der höheren Rohdichten durchgeführt. Ferner wird der von Schleifer beobachtete schnellere Abfall der Holzkohleschicht von OSB-Platten im Vergleich zur Spanplatte durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der OSB-Platte ab 500°C abgebildet (vgl. Tabelle A. 1, Tabelle A. 2, Tabelle A. 3). Mit den angepassten Werten werden nach Schleifer gute Übereinstimmungen zwischen den FE-Untersuchungen und zugehörigen Brandversuchen erzielt.

Für Dämmmaterialien wie Glaswolle und Steinwolle wurden die Materialeigenschaften von Bénichou *et al.* [12] experimentell ermittelt. Mittels effektiver Kennwerte werden der Schmelzvorgang der Glaswolle ab ca. 500°C und die Zersetzung der Steinwolle ab ca. 800°C berücksichtigt. Källsner *et al.* [98] und Takeda *et al.* [136] tragen diesem Vorgang mittels erhöhten Massenverlust ab entsprechender Schmelz- oder Zersetzungstemperatur Rechnung. Schleifer [120] und Bénichou *et al.* [12] hingegen bilden diese Vorgänge durch eine ansteigende Wärmeleitfähigkeit ab.

Harmathy [85], Kodur *et al.* [65], Mehaffey *et al.* [113] und Bénichou *et al.* [12] verwenden bei der experimentellen Analyse der untersuchten Materialien stationäre Apparate zur Messung der Wärmeleitfähigkeit. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit für Gips [12, 113], Glas- und Steinwolle [12] bis 1000°C, für Holz hingegen bis 450°C [12] untersucht.

Verschiedene Autoren verwendeten zur Analyse der spezifischen Wärmekapazität die Methode der Differential Scanning Calorimetry, kurz: DSC (siehe Abschnitt 5.2.2). Die Stoffproben wurden oftmals 24 Stunden bei 40°C vorgeheizt, um den Anteil an freiem Wasser im Material zu beseitigen. Im Anschluss wurden die auf ca. 10-30 mg genau abgewogenen und zerkleinerten Stoffproben in einer Stickstoffatmosphäre mit einer Heizrate zwischen 2 und 20 K/min untersucht. Ergebnisse für Gipsplatten bis ca. 700°C liefern Bénichou *et al.* [12] und bis 200°C Mehaffey *et al.* [113]. Außerdem stehen bis 700°C Materialeigenschaften für Glas- und Steinwolle zur Verfügung [12]. Harmathy [85] zeigt Werte für Holz bis ca. 350 °C auf.

Mittels Thermogravimetrischer Analyse (siehe 5.2.3) wird die prozentuale Masseänderung zwischen der Masse bei Raumtemperatur und der veränderten Masse unter an- bzw. absteigender Temperatur in Abhängigkeit der Temperatur angegeben. Einige Autoren wie Harmathy [85], Mehaffey *et al.* [113] und Bénichou *et al.* [12] trocknen die Materialien vor der Untersuchung 24 h lang bei 40°C. Schleifer [120] hingegen verwendet unbehandelte Proben. Als Heizraten für Gipsplatten werden überwiegend 20 K/min und für Holz 5 K/min entsprechend der angenommenen Erwärmung unter Brandbeanspruchung gewählt. Harmathy [85], Mehaffey *et*

*al.* [113] und Bénichou *et al.* [12] untersuchten die Stoffe in einer Stickstoff-Atmosphäre, Wakili *et al.* [78] setzte indessen Luftströmungen ein.

Zusätzlich wurden von Bénichou *et al.* [12] die Ausdehnung von Gips unter Temperaturerhöhung mittels eines Dilatometer gemessen. Bis ca. 800°C sind nur kleine Längenänderungen ersichtlich. Bei höheren Temperaturen schrumpften die Gipsplatten jedoch verstärkt. Dies ist auf die Phasenänderungen des Gipses (Calciumsulfat-Dihydrat) unter steigender Temperaturerhöhung zurückzuführen. Bei etwa 800°C liegt ein vernachlässigbarer Wasseranteil sowie Calciumsulfat-Anhydrit II vor. Dieser Zustand führt zur starken Rissbildung dieser Bekleidungen im Holztafelbau.

## 5.2 Messverfahren zur Bestimmung temperaturabhängiger Materialkennwerte bio-gener, faseriger Dämmstoffe

### 5.2.1 Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen bei Temperaturen bis ca. 1000°C stehen verschiedene Messverfahren zur Verfügung. Die Auswahl des Verfahrens folgt in Abhängigkeit des Materials, der Abdeckung des Wärmeleitfähigkeitsbereichs, der Höhe der Einsatztemperatur des Dämmstoffes und des Kosten- und Zeitaufwandes. Empfehlungen für die Auswahl des Messverfahrens in Abhängigkeit des zu untersuchenden Materials und deren Einsatzgebiete werden von Hammerschmidt *et al.* und Maglić *et al.* [84, 110] gegeben.

Für Dämmstoffe werden in der Regel Verfahren zur direkten Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit verwendet. Darüber hinaus gibt es auch Messverfahren, die die Temperaturleitfähigkeit bestimmen. Die Wärmeleitfähigkeit wird dann wie folgt ermittelt:

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho \quad (49)$$

mit:

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
$a$	Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg K)]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

Die Messverfahren zur direkten Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sind alle auf die Lösung der Fourier'schen Differentialgleichung (25) zurückzuführen. Sie werden in stationäre und instationäre Verfahren aufgeteilt.

Die stationären Messverfahren basieren auf einem zeitunabhängigen, örtlichen Temperaturfeld. Ziel der Messverfahren ist die Herstellung eines eindimensionalen Temperaturfelds innerhalb der Messzone des Probekörpers nach Erreichen des stationären Zustands. Dabei wird die eine Oberfläche der Probe mit der Temperatur  $T_1$  und die zweite gegenüberliegende Oberfläche wird mit der Temperatur  $T_2$  versehen. Die Wärmeleitfähigkeit kann durch die Messung

eines Wärmestroms  $\dot{Q}$  sowie der Temperaturdifferenz zwischen der wärmeren und kälteren Oberfläche der Probe innerhalb der Messzone errechnet werden. (vgl. Wulff [153])

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot h}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (50)$$

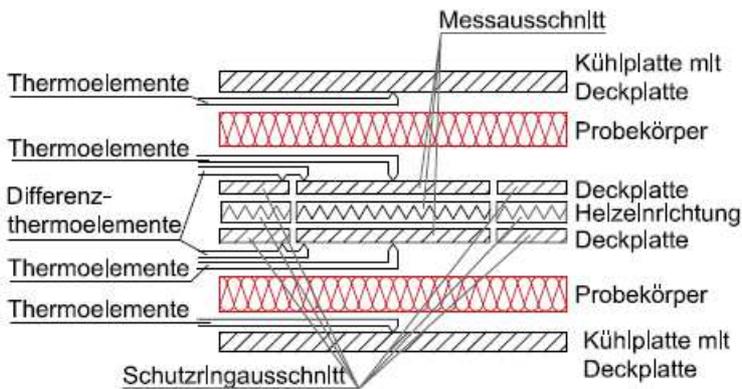
mit:

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
$\dot{Q}$	Wärmestrom [W]
$h$	Schichtdicke [m]
$A$	Durchströmte Messfläche [m <sup>2</sup> ]
$T_1; T_2$	Absolute Temperaturen der Flächen 1 bzw. 2 [K]

Am gängigsten sind absolute Plattenverfahren, die ebene Proben verwenden. Hierzu zählen das *Guarded-Hot-Plate-Verfahren*, welches mit einer Ein- oder Zweiplattenanordnung verwendet werden kann, sowie die Messung mit dem Wärmestrommessplattengerät (auch bekannt unter Heat-Flow-Meter). Wesentliche Grundlagen und Voraussetzungen zur Anwendung dieser Messverfahren für anisotrope Materialien (wie beispielsweise Holz) und lose Füllstoffe (wie Zellulose) werden in DIN EN 12664/ DIN EN 12667 [38, 40] angegeben.

Beim Ein- oder Zweiplattengerät wird der Wärmestrom durch die Messung der Leistungsaufnahme der Heizplatte in der Messzone gemessen. Bei der Zweiplattenanordnung wird zwischen zwei identischen Probekörpern eine Heizplatte angebracht. Auf den beiden parallelen außenliegenden Oberflächen der Probekörper sind Kühlplatten positioniert. Die Temperaturen der Heizplatte und der Kühlplatten werden zu Beginn der Messung festgelegt. In der Regel werden Temperaturdifferenzen von 30 bis 70 K erzeugt (vgl. Hammerschmidt *et al.* [84]). Der erzeugte Wärmestrom wird dabei gleichmäßig von der Heizplatte über die Probekörper zu den jeweiligen Kühlplatten übertragen. Zu Verhinderung eines seitlichen Wärmeflusses wird der zentrale Messbereich durch einen umliegenden Schutzring umgeben. Bei der Einplattenanordnung entfällt der zweite Probekörper. Dieser wird durch die Kombination eines Dämmstoffes mit einer Schutzplatte ersetzt (vgl. Abbildung 5.1). Bei entsprechender Konstruktion werden die Geräte auch für höhere Einsatztemperaturen von 200°C - 1000°C verwendet.

Zweiplattengerät:



Einplattengerät:

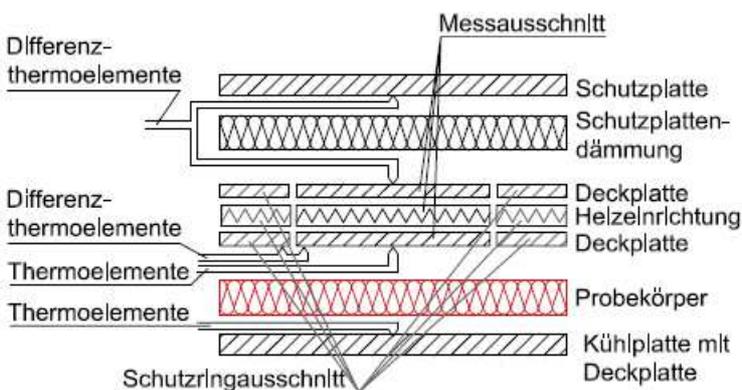


Abbildung 5.1: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines Ein- und Zweiplattengerätes angelehnt an DIN EN 12667:2001 [39] (nachgestellt mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V.)

Die Wärmestromdichte wird direkt über die Wärmemessplattengeräte gemessen. Eine Kalibrierung des Messapparates mit einer Referenzprobe ist notwendig. Dem Messverfahren werden etwas höhere Messunsicherheiten nach Wulff [153] und keine verlässliche Wärmeumsetzung bei hohen Einsatztemperaturen nach Hammerschmidt *et al.* [84] zugeordnet.

Mithilfe des konstruktiv aufwendigeren *Panel-Test*-Verfahrens können Probekörper auch unter höheren Einsatztemperaturen als beim Guarded-Hot-Plate-Verfahren geprüft werden. Die Untersuchung feuerfester Erzeugnisse für Wärmedämmzwecke findet bei höheren Temperaturen statt und wird mithilfe des Panel-Test-Verfahrens gemäß DIN EN 1094-1 [37] durchgeführt. Innerhalb einer solchen Messung wird der Probekörper auf der Oberseite elektrisch beheizt. Auf der Unterseite des Probekörpers wird der Wärmestrom in einem durchströmten Kalorimeter gemessen.

Alternativ werden auch absolute Rohrverfahren herangezogen, die auf hohlzylindrische Proben zurückgreifen. Auch mit diesem Verfahren können anisotrope Materialien und lose Füllungen in geeigneten Behältern untersucht werden. Wesentliche Grundlagen hierfür sind der DIN EN ISO 8497 [64] zu entnehmen. Das Verfahren ist nach Dumez *et al.* [67] für Einsatztemperaturen bis zu 2800°C geeignet. Im Weiteren stehen Relativverfahren wie die *Comperative Longitudinal Steady-State Method* zur Verfügung, bei welcher die Wärmeleitfähigkeit der Probe mithilfe einer Vergleichsprobe bestimmt wird, deren Wärmeleitfähigkeit bereits bekannt ist. Dabei kann auf die Bestimmung des Wärmestroms verzichtet werden. Eine genaue Beschreibung der Methode zeigen Maglić *et al.* [110] auf.

Im Vergleich zu den stationären Messverfahren sind die Messapparaturen bei instationären Messungen vorwiegend einfacher konzipiert. Meist dient das Heizelement gleichzeitig als Widerstandsthermometer, um den Temperaturverlauf im Probekörper zu messen. Die Funktion der Kühlplatte wird in der Regel durch den Probekörper übernommen, sofern dieser homogen ist.

Die instationären Messverfahren nutzen unterschiedliche Apparaturen. Man unterscheidet, ob deren Heizquelle in direktem Kontakt zum Probekörper steht oder von diesem entfernt liegen. Als Verfahren mit Heizquellen ohne Kontakt zu den Probekörpern sind optische *Xenon- oder Laser-flash-Techniken* zu nennen, die meist bei hohen Temperaturen eingesetzt werden. Die Verfahren mit elektrischem Kontakt der Heizquelle zum Probekörper werden unter anderem durch die Geometrie ihrer Heizquelle unterschieden. Dabei wird aufgeteilt in Heißdrahtverfahren (auch *Transient-Hot-Wire*, kurz: THW genannt) und Verfahren mit ebenen Heizquellen (*Transient-Hot-Strip*: THS, *Transient-Hot-Disk*: THD und *Transient-Hot-Plane*: THP).

Die Heißdrahtverfahren werden wiederum aufgegliedert in die Heizdraht-Widerstandstechnik, das Kreuzdraht- und das Paralleldrahtverfahren. Sie nutzen als Heizquelle einen dünnen metallischen Draht, der elektrisch beheizt wird. Beim Kreuzdrahtverfahren und Paralleldrahtverfahren werden jeweils zwei Drähte genutzt, wobei der zweite Draht die Temperaturen im Prüfkörper misst. Durch die aufgebrachte Heizung und die Messung des zeitlichen Verlaufs des Temperaturanstiegs kann die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Die Heizdraht-Widerstandstechnik verwendet nur einen Draht und findet seinen Einsatz häufig bei Flüssigkeiten und Gasen. Die Temperatur wird dabei über die Änderung des temperaturabhängigen Widerstands des Heizdrahtes ermittelt. Diese Prüfverfahren werden meist für feuerfeste Erzeugnisse bei erhöhten Einsatztemperaturen (>1000°C) gemäß DIN EN 993-14/ DIN EN 993-15 [61, 62] eingesetzt. Ausgangspunkt für die Auswertung ist die Fourier'sche Differentialgleichung (25) für den dreidimensionalen, instationären und quellenfreien Fall. Die mathematischen Lösungen sind von Carslaw *et al.* [22] ausführlich beschrieben und die Ergebnisse unter entsprechenden Randbedingungen werden von Hammerschmidt *et al.* und Wulff [84, 153] präsentiert. Bei Verwendung anisotroper Materialien müssen gesonderte Prüfbedingungen beachtet werden, da sich hierbei oft kein rotationssymmetrisches Temperaturfeld ausbilden kann. Um richtungsabhängige Werte der Wärmeleitfähigkeit für orthogonal anisotrope Materialien zu erhalten, muss

die Messung nach Davis und Wulff [30, 153] daher in allen Richtungen erfolgen und anschließend ausgewertet werden. Dämmungen mit Fasern sind meist in Schichten aufgebaut. Dies führt dazu, dass die Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Schichtung und senkrecht dazu ermittelt werden sollte. Sofern der Heizdraht senkrecht zur Schichtung eingebaut wird, kann die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung direkt gemessen werden, zumal sich nach Jackson *et al.* [95] ein ideal elliptisches Temperaturfeld um den Heizdraht ausbildet. Bei Einbau des Drahtes parallel zur Schichtung müssen gesonderte Gleichungen zur Lösungsfindung, die Wulff [153] vorstellt, herangezogen werden.

Instationäre Verfahren mit ebenen Heizquellen nutzen streifenförmige (THS), kreisförmige (THD) oder rechteckige (THP) Sensoren. Meist besteht die Heizquelle, die auch als Temperatursensor fungiert, aus einem dünnen Metallfilm, der mäanderförmig (THS, THD) oder spiralförmig (THD) zwischen zwei Metallfolien eingebaut ist. Durch den Sensor fließt ein konstanter Strom. Dies führt zu einem Temperaturanstieg der Folien in Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften des Probekörpers. Durch die hervorgerufene Erhöhung des Widerstands des Metalls wird ein zeitabhängiger Anstieg des Spannungsabfalls über die Folien hervorgerufen [153]. Die mathematischen Grundlagen sind dem des Heißdrahtverfahrens ähnlich, die Gleichungen können jedoch nicht linearisiert werden. Daher müssen die thermischen Wärmetransport-Eigenschaften des Probekörpers iterativ gelöst werden (vgl. Hammerschmidt *et al.* [84]). Beim Einsatz anisotroper Materialien muss, wie beim Heißdrahtverfahren, in allen Richtungen gemessen werden. Bei geschichteten Materialien genügt die Messung in zwei Richtungen.

### 5.2.2 Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen, spezifischen Wärmekapazität

Zur Messung der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  bei Temperaturen bis über 1600°C wird vorwiegend die *dynamische Leistungskompensations-Differenz-Kalorimetrie* (engl. *Differential Scanning Calorimetry*, kurz: *DSC*) verwendet.

Das Messgerät besteht aus zwei separaten Öfen für die Probe und das Referenzmaterial. In beiden Öfen sind Temperaturfühler angebracht, um die Temperaturen zu messen und die Heizleistung entsprechend steuern zu können. Die Öfen enthalten außerdem Heizelemente, um das gewünschte Temperatur-Zeit-Programm anlegen zu können. Beide Öfen sind mittels Temperiereinrichtungen den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Außerdem sind die Erstellung einer definierten Atmosphäre im Probenraum, eine Temperatursteuerung, sowie eine Datenerfassung erforderlich.

Das Verfahren ist in der DIN 51007 [36] genormt und nutzt die Aufzeichnung einer veränderten Heizleistung, die unter vorgegebenen Temperatur-Programmen notwendig wird, um die Temperaturdifferenzen zwischen Probe und Referenzmaterial auszugleichen, die sich nach Temperaturänderungen bei einer Reaktion der Proben ergeben haben.

Zur Ermittlung der Wärmekapazität wird ein leerer Probenbehälter und einer mit dem zu untersuchenden Probenmaterial gefüllter Behälter verwendet. Nach DIN 51007 [36] setzt sich

jede Messung aus einer isothermen Phase bei der Starttemperatur, einer darauffolgenden dynamischen Phase und zuletzt einer isothermen Phase bei Endtemperatur zusammen. Für Probe und Leerprobe werden die Wärmeströme über die Zeit aufgetragen. Bei beiden Messkurven werden die Anfangs- und Endbasislinien je durch eine Gerade verbunden. Dabei entstehen die linear interpolierten Basislinien für beide Probenbehälter. Die Differenzen aus Proben-Messkurve und zugehöriger interpolierter isothermer Basislinie sowie Leerproben-Messkurve und zugehöriger interpolierter isothermer Basislinie sind proportional zur Wärmekapazität der zu untersuchenden Probe und der verwendeten Heizrate.

Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur, erfolgt mittels instationärer Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit. Mithilfe der ermittelten temperaturabhängigen Werte der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit kann die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität (Wärmespeicherzahl) berechnet werden.

$$s(\vartheta) = \frac{\lambda(\vartheta)}{a(\vartheta)} \quad (51)$$

mit:

$s(\vartheta)$	Temperaturabhängige Wärmespeicherzahl [J/(m <sup>3</sup> K)]
$\lambda(\vartheta)$	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
$a(\vartheta)$	Temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]

Dividiert man die Wärmespeicherzahl durch die Rohdichte, die über eine thermogravimetrische Analyse für die gesuchte Temperatur bestimmt wird, kann die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität durch Umwandlung der Gleichung (51) wie folgt berechnet werden:

$$c_p(\vartheta) = \frac{\lambda(\vartheta)}{a(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta)} \quad (52)$$

mit:

$c_p(\vartheta)$	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg K)]
$\lambda(\vartheta)$	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
$a(\vartheta)$	Temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]
$\rho(\vartheta)$	Temperaturabhängige Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

Alternativ kann mittels Hot-Disk-Verfahren die spezifische Wärmefreisetzung unter Verwendung eines speziellen Zylinders auch direkt gemessen werden, vgl. Berge *et al.* [13]. Dabei wird auf die zugeführte Energie und die Temperaturänderung zurückgegriffen:

$$mc_p = \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P dt}{\Delta T} \quad (53)$$

mit:

$c_p$	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kgK)]
$m$	Masse [kg]
$\Delta E$	Zugeführte Energie [J]
$\Delta T$	Temperaturänderung [K]
$P$	Zugeführte Leistung [W]
$t$	Zeit [s]

### 5.2.3 Messverfahren zur Bestimmung der temperaturabhängigen Rohdichte

Mithilfe der thermogravimetrischen Analyse (TGA) werden Masseänderungen einer Materialprobe in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Mittels dieser Masseänderung kann die Modifikation der Rohdichte in Bezug zur Temperaturänderung ermittelt werden.

Dazu wird als Messapparatur eine Thermowaage benötigt. Diese setzt sich zusammen aus einem mit einer Waage gekoppelten Ofen, einem Temperaturregler, einem Schreiber zur Aufzeichnung und Verarbeitung der Messwerte sowie einer Einrichtung zur Herstellung der gewünschten Atmosphäre im Proberaum (vgl. Abbildung 5.2). Die einzelnen Bestandteile der Thermowaage sowie die zu beachtenden Randbedingungen sind in der DIN 51006 [35] und bei Hemminger *et al.* [86] ausführlich beschrieben.

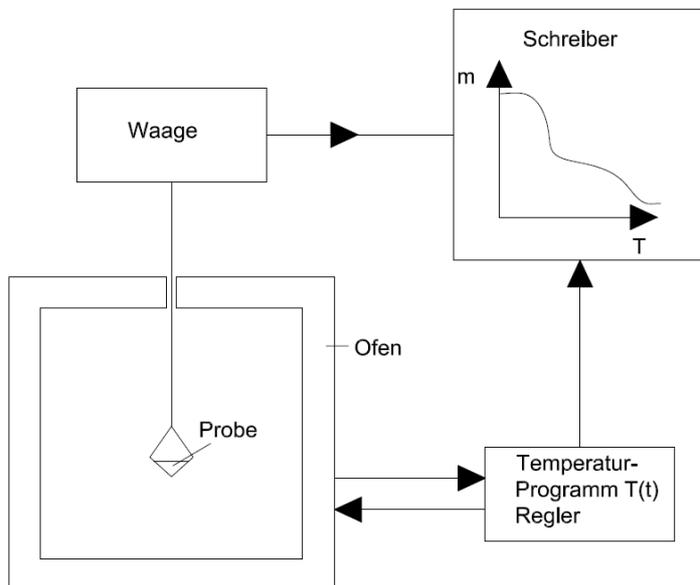


Abbildung 5.2: Darstellung einer Thermowaage zur gravimetrischen Analyse nach Hemminger *et al.* [86]

Üblicherweise wird die Temperatur im Ofen und demnach auch die der Probe mit einer konstanten Heizrate  $\beta$  erhöht. Weitere Arten zur Erhöhung der Temperatur werden von Hemminger *et al.* [86] detailliert aufgezählt.

Die Heizrate wird berechnet zu:

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (54)$$

mit:

$\beta$	Heizrate [K/s]
$T$	Absolute Temperatur [K]
$t$	Zeit [s]

Gemäß dem Massenerhaltungssatz ist die Masse eines geschlossenen Systems konstant und kann somit keine Funktion der Temperatur sein. Eine Masseänderung kann nur dann registriert werden, wenn die Probe flüchtige Stoffe, die beispielsweise bei der Zersetzung oder Oxidation (Probenreaktion) entstehen, an die Umgebung abgeben oder diese aufnehmen kann [86]. Infolge dessen muss auf die Atmosphäre im Proberaum geachtet werden. Meist werden inerte Gase (Stickstoff, Edelgase) verwendet, die die Probe laminar umströmen und somit Rückreaktionen verhindern. Sind jedoch Reaktionen mit einem bestimmten Gas vorgesehen, wird dieses der Probe ruhend oder strömend zugeführt. Die Art des Gases, der Druck und die Strömungsgeschwindigkeit beeinflussen die Messung beachtlich, da sie Auswirkungen auf die Wärmeübertragung vom Ofen zur Probe haben und demzufolge auf die Temperatur der Probe.

Die Änderung der Masse wird berechnet zu:

$$\Delta m = m(T) - m_0 \quad (55)$$

mit:

$\Delta m$	Massenänderung der Probe
$m(T)$	Masse der Probe in Abhängigkeit der Temperatur [kg]
$m_0$	Anfangsmasse der Probe [kg]

Mit Ausnahme von elektrischen und magnetischen Umwandlungen von Festkörpern können thermogravimetrisch nur Reaktionen unter Beteiligung flüchtiger Komponenten untersucht werden.

Nach Aufnahme der Massenänderung über die Zeit (TG-Kurve), kann durch die erste zeitliche Ableitung  $d(\Delta m)/dt$  eine „differenzierte thermogravimetrische Kurve“ gebildet werden. Diese gibt Aufschluss über die Reaktionen während der Temperaturerhöhung.

Da die Rohdichte über die Masse und das Volumen definiert ist, muss neben der Massenänderung einer Probe auch auf die Änderung des Volumens bei erhöhten Temperaturen geachtet werden. Durch die Messung der Längenänderungen in alle Richtungen wird das von der Temperatur abhängige Volumen berechnet.

Um Längenänderungen unter Temperaturbeanspruchung zu bestimmen, wird meist ein Dilatometer herangezogen. Dabei wird das zu untersuchende Material auf eine Rinne oder in ein

Rohr aus Quarzglas innerhalb eines Ofens aufgelegt. Eine Schubstange aus Quarzglas überträgt die thermische Ausdehnung der Probe auf einen Wegaufnehmer, der fest mit der Auflage verbunden ist. Dieser misst die Verschiebung mechanisch, optisch oder induktiv. Da sich Auflage und die Schubstange unter Temperatureinwirkung ebenfalls verlängern, muss der bekannte Ausdehnungskoeffizient bei der Auswertung berücksichtigt werden. (vgl. Maucherauch und Hemminger *et al.* [68, 86])

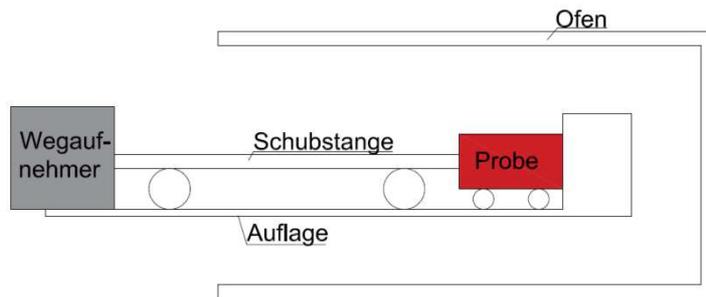


Abbildung 5.3: Darstellung eines Dilatometers nach Hemminger *et al.* [86]

Die Berechnung der temperaturabhängigen Rohdichte für isotrope Materialien erfolgt unter Berücksichtigung der thermogravimetrischen Ergebnisse und der Längenänderung aus Messungen mit dem Dilatometer wie folgt:

$$\rho(\vartheta) = \rho_0 \cdot \frac{m(T)/m_0}{\left[1 + \frac{\Delta l(T)}{l_0}\right]^3} \quad (56)$$

mit:

$\rho(\vartheta)$	Rohdichte der Probe in Abhängigkeit der Temperatur [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Anfangsrohichte der Probe [kg/m <sup>3</sup> ]
$m(T)$	Masse der Probe in Abhängigkeit der Temperatur [kg]
$m_0$	Anfangsmasse der Probe [kg]
$\Delta l(T)$	Längenänderung der Probe in Abhängigkeit der Temperatur [m]
$l_0$	Anfangslänge der Probe [m]

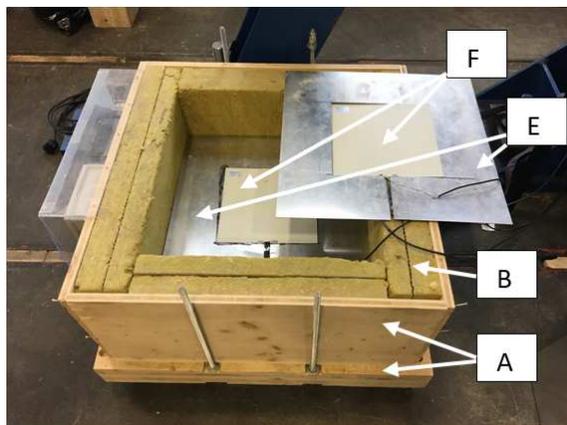
Für anisotrope Materialien sind die Längenänderungen in alle maßgebenden Richtungen zu berücksichtigen.

### 5.3 Experimentell bestimmte Materialeigenschaften für Zellulose und Holzfaser

#### 5.3.1 Wahl und Beschreibung der Messverfahren

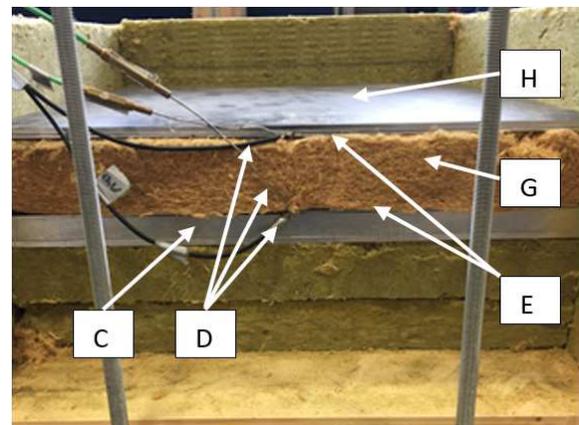
Die experimentellen Methoden zur Bestimmung der Materialeigenschaften wurden in Abhängigkeit der jeweiligen Entzündungs- bzw. Zersetzungstemperatur des untersuchten Stoffes ausgewählt.

Mittels Einplattengerät (vgl. Abschnitt 5.2.1), das an der Technischen Universität München vorwiegend nach DIN EN 12667:2001 [39] gefertigt wurde, wurde die Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfasermatte bis ca. 70°C auf der Warmseite der Probe ermittelt (vgl. Winter *et al.* [146]). Die Auswertung der Wärmeleitfähigkeit war aus gerätetechnischen Gründen auf eine Temperatur von maximal 80°C begrenzt. Untersucht wurden flexible Holzfaserplatten mit Rohdichten von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>, einem Feuchtegehalt von 9-10 M-% und Dicken von ca. 60 mm sowie 120 mm. Im Gegensatz zu der in der DIN EN 12667:2001 [39] beschriebenen Kühlplatte, wurde die Temperatur der klimatisierten Prüfhalle zum Kühlen genutzt und durch Thermoelemente überwacht. Eine Metallplatte, die über die obere Messplatte gelegt wurde, sollte zum einen dazu beitragen, dass die Temperatur von außen gleichmäßig auf den Prüfkörper übertragen wird und zum anderen auch als Beschwerung dienen, um die Ausbildung von Luftschichten zwischen den Bauteilschichten zu verhindern (siehe Abbildung 5.4).



Draufsicht

- A Holzrahmen (Seiten 20 mm, unten 100 mm)
- B Weichschottplatten (100 mm)
- C Aluminiumplatte mit Heizspule (60 mm)
- D Thermoelemente
- E Ausgleichsblech



Schnitt

- F Messplatte zur Ermittlung des Wärmeflusses
- G Prüfkörper
- H Metallplatte (6 mm)

Abbildung 5.4: Aufbau des verwendeten Einplattengeräts zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [146]

Weiterhin wurden am Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München die Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit für flexible Holzfaser- sowie Zellulosedämmstoffe senkrecht zur Mattenrichtung für drei Temperaturstufen unterhalb der Entzündungstemperatur mittels Zweiplattengerät (siehe Abbildung 5.1) gemäß DIN EN 12667:2001 [39] gemessen. Die Messapparatur verfügte über Heizplatten der Größe 250 mm x 250 mm und war mit Heizringen der Abmessung 500 mm x 500 mm ausgestattet. Vor der Messung wurden die Proben auf die jeweiligen festgelegten Temperaturen der Warmseite (80°C, 120°C, 150°C) konditioniert. Im Anschluss wurden die Probekörper horizontal eingebaut. Die Holzfaserdämmmatten wiesen im Mittel eine Dicke von 62,2 mm und eine mittlere Rohdichte von 50,8 kg/m<sup>3</sup> auf. Die Zellulosematten hingegen verfügten über eine mittlere Dicke von 63,2 mm und eine mittlere Rohdichte von 63,1 kg/m<sup>3</sup>.

Diesen Messungen vorangegangen waren Untersuchungen mithilfe des Transient-Hot-Disk (THD)-Verfahrens (siehe Abschnitt 5.2.1) zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, der Temperaturleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität.

Die Untersuchungen mittels Hot-Disk-Verfahren wurde von der Firma Hot Disk AB in Gothenburg (Schweden) gemäß ISO 22007-2 [63] durchgeführt [23]. Dabei wurde die Apparatur *Hot Disk TPS 3500* mit einem Sensor *4922 Kapton* und dem zugehörigen Radius von 14,9 mm bei einer Heizleistung von 0,025 bis 0,03 W verwendet. Die Messzeit belief sich auf 160 - 320 s. Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit wurden die Proben in einen Zylinder mit dem Durchmesser von 80 mm und einer Höhe von 50 mm eingebracht. Die flexible Holzfaserplatte mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> wurde entsprechend zugeschnitten, während die losen Zelluloseflocken auf ca. 14 g pro Probe abgewogen wurden, um eine Rohdichte von ca. 55 kg/m<sup>3</sup> zu erhalten. Für die Messung der spezifischen Wärmekapazität wurden die Proben in eine metallische, gedämmte Zylinderform mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 10 mm eingebettet. Hierfür wurde eine Heizleistung von 0,103 - 107 W bei einer Messzeit von 80 s verwendet. Ergebnisse zur Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit konnten für Holzfaserdämmstoffe für die gesuchten Temperaturstufen zwischen 22°C und 180°C erzielt werden. Bei der Erhöhung der Temperatur von 180°C auf 200°C entzündete sich der Dämmstoff. Für die Zellulose wurden Werte bis einschließlich 220°C ermittelt, da sich bei einer weiteren Temperaturerhöhung exotherme Reaktionen einstellten. Die Messungen wurden jeweils wiederholt, um Abweichungen innerhalb der Messung auszuschließen.

Die Massenänderung beider Proben wurde durch eine thermogravimetrische Analyse an der Technischen Universität München bestimmt. Zur Analyse wurde ein Gerät der Firma Linseis, Modell STA PT-1750 verwendet. Als Inertgas im Ofen wurde Stickstoff eingesetzt, um eine mögliche Rückreaktion auszuschließen. Zur Ermittlung des Massenverlustes der flexiblen Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> und einer Holzfeuchte von ca. 6 M-% wurden eine Heizrate von 10 K/min bis zu einer Maximaltemperatur von 300°C sowie eine Heizrate von 5 K/min bis zu einer Temperatur von 1000°C angelegt. Für die Analyse der Zellulose mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> und einer Feuchte von ca. 5 M-% wurde eine Heizrate von 5 K/min genutzt. Der Masseverlust wurde hierbei bis zu einer Temperatur von 1200°C betrachtet.

### 5.3.2 Messergebnisse flexible Holzfaserdämmung

Mittels Plattengeräten werden die Wärmeleitfähigkeiten für Holzfaserdämmstoffe der Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> senkrecht zur Plattenrichtung im Temperaturbereich von ca. 25°C bis 150°C auf der Warmseite der Proben ermittelt [73, 146]. Die Ergebnisse dieser ermittelten Wärmeleitfähigkeit aus den stationären Verfahren wurden einerseits in Bezug zur Temperatur auf der Warmseite des Prüfkörpers und andererseits in Bezug zur Mitteltemperatur zwischen Kalt- und Warmseite aufgezeichnet (vgl. Abbildung 5.5). Da die Messung der Wärmeleitfähigkeit bei stationären Verfahren über einen Temperaturgradienten verursacht wird, verwendet

man den integralen Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit über die Temperaturen der Warm- und Kaltseite der Probe. Üblicherweise erfolgt die Angabe dieser mittleren Wärmeleitfähigkeit in Zuordnung zur Mitteltemperatur. Durch die vorherige Konditionierung einiger Proben, werden die Ergebnisse zusätzlich in Abhängigkeit der Temperatur auf der Warmseite betrachtet.

Vergleichend dazu werden die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit für Holzfaserdämmstoffe der Rohdichte von ca.  $50 \text{ kg/m}^3$  aus dem Hot-Disk-Verfahren abgebildet (vgl. Abbildung 5.5). Hier wird ersichtlich, dass die Ergebnisse bei ca.  $20^\circ\text{C}$  um ca. 50% voneinander abweichen. Der Unterschied reduziert sich jedoch mit zunehmender Temperatur und liegt bei  $80^\circ\text{C}$  bei ca. 30%. Bei  $100^\circ$  und  $120^\circ\text{C}$  beträgt die Differenz konstant nur noch etwa 19%.

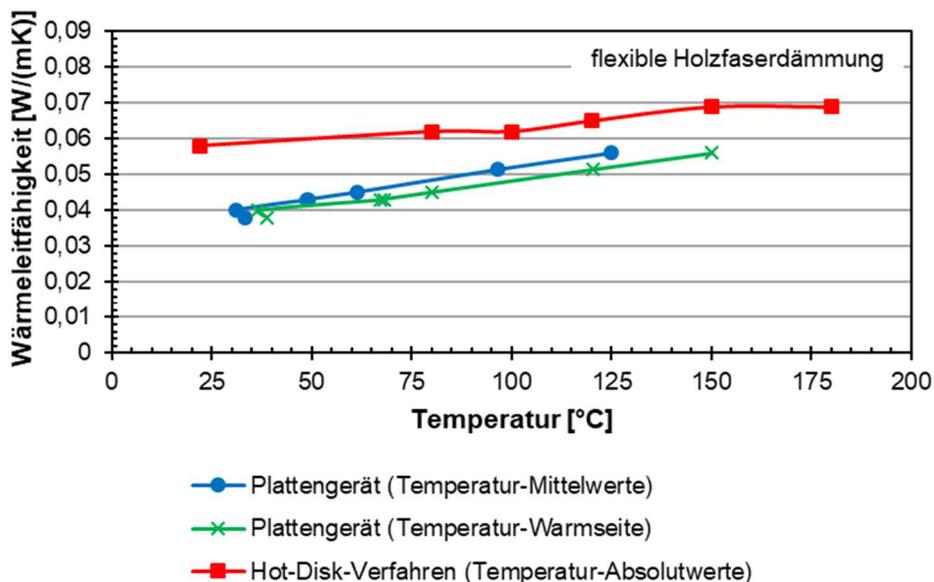


Abbildung 5.5: Experimentell ermittelte Werte der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Temperatur für flexible Holzfaserdämmstoffe (Rohdichte ca.  $50 \text{ kg/m}^3$ )

Ein prinzipieller Unterschied zwischen stationären und instationären Verfahren ist damit zu begründen, dass die Werte aus stationären Verfahren in der Regel Mittelwerte über die Temperatur der Warm- und Kaltseite darstellen. Die Resultate aus instationären Verfahren hingegen entsprechen den tatsächlichen („wahren“) Werten der untersuchten Temperatur aufgrund des geringen Temperaturhubs in der Probe. Liegt jedoch eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur vor, entspricht die mittlere Wärmeleitfähigkeit der wahren Wärmeleitfähigkeit. Für andere Abhängigkeiten der mittleren Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur, die beispielsweise mittels quadratischer Funktion beschrieben werden können, beschreibt Wulff [153] Lösungsmöglichkeiten zur Entwicklung der wahren Werten der Wärmeleitfähigkeit. Da die Ergebnisse aus den stationären Verfahren durch Plattengeräte eine lineare Abhängigkeit andeuten, wird davon ausgegangen, dass diese mittleren Werte den wahren Werten entsprechen und der Unterschied der Ergebnisse nicht darauf zurückzuführen ist.

Ferner ist anzunehmen, dass in dieser Untersuchung die Anisotropie des Holzfaserdämmstoffes mittels einer Standard-Hot-Disk-Messung nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Die Fasern der Holzfaserdämmung sind hauptsächlich in Scheibenebene angeordnet, weshalb die Wärmeleitfähigkeit in dieser Richtung einen größeren Wert vorweisen sollte als orthogonal dazu, wie es bei Holz oder anderen geschichteten Faserdämmstoffen der Fall ist.

Bei Standard-Hot-Disk-Messungen wird eine Anisotropie des Materials in der Regel ausgeschlossen, wenn die gemessene spezifische Wärmekapazität unter Raumtemperatur der errechneten spezifischen Wärmekapazität aus Messergebnissen unter gleicher Temperatur gemäß Gleichung (52) entspricht. Unter Voraussetzung des Einbaus der Sensorebene in radialer Richtung der zylindrischen Probe wird bei der Berechnung die gemessene Temperaturleitfähigkeit in radialer Richtung, das gemessene geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeit sowie die gemessene Rohdichte hierfür herangezogen. Der gemessene Wert der spezifischen Wärmekapazität für den Holzfaserdämmstoff entspricht 1480 J/(kgK) bei 22°C. Bei gleicher Temperatur wurde ein geometrischer Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,058 W/(mK) und eine Temperaturleitfähigkeit von 0,752 mm<sup>2</sup>/s gemessen. Bei einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> lässt sich die spezifische Wärmekapazität errechnen:

$$c_p(22^\circ\text{C}) = \frac{\lambda(22^\circ\text{C})}{\alpha(22^\circ\text{C}) \cdot \rho(22^\circ\text{C})} = \frac{0,058 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0,752 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \cdot 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1540 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Trotz der geringen Abweichung des gemessenen Wertes von 1480 J/(kg K) vom errechneten Wert von 1540 J/(kg K) der spezifischen Wärmekapazität, können unterschiedliche Eigenschaften der Wärmeleitfähigkeit in bzw. orthogonal zur Mattenrichtung aufgrund der Faserausrichtung nicht ausgeschlossen werden. Durch eine weitere, nicht durchgeführte, Messung unter Einbau des Sensors in axialer Richtung des Probezylinders, könnte ein Verhältnis der gesuchten Temperaturleitfähigkeit in axialer Richtung mit der bereits ermittelten Temperaturleitfähigkeit in radialer Richtung verglichen werden. Auf Basis dieses Verhältnisses könnte die Temperaturleitfähigkeit gemäß Davis [30] in axialer und radialer Richtung der Probe ermittelt werden.

Die signifikanten Abweichungen der Ergebnisse aus stationären und instationären Verfahren von bis zu 50% bei Temperaturen unter 80°C sind durch die unterschiedlichen Feuchtegehalte der Proben während der Prüfungen erklärbar (vgl. Abbildung 5.5). Durch die längeren Messzeiten bei der Verwendung von Plattengeräten ist das Entweichen der Feuchtigkeit stärker ausgeprägt. Dies führt zu einer geringeren Wärmeleitfähigkeit. Im Gegensatz dazu führt das instationäre Verfahren durch die kurzen Messzeiten kaum zur Entweichung von Wasser bis ca. 100°C. Zusätzlich wurden beim Hot Disk Verfahren Proben mit einem nicht vor Ort überprüften Feuchtegehalt eingesetzt, während die Proben im Zweiplattengerät ab 80°C konditioniert waren. Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Einplattenversuchen mit den Hot-Disk-Versuchen ist von einer deutlich höheren Materialfeuchte zu Beginn der Messungen bei den Hot-Disk-Versuchen auszugehen.

Andersen *et al.* [6] stellte bereits für isotrope und anisotrope Materialien deutlich höhere Werte mittels Hot-Disk-Verfahren im Vergleich zu den Ergebnissen mithilfe einer Panel-Test-Apparatur fest. Hagemann *et al.* [83] sowie Jackson [95] bestätigen diese Ergebnisse.

Die temperaturabhängigen Werte der spezifischen Wärmekapazität wurden gemäß Gleichung (52) entsprechend der gemessenen Werte der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit aus den Hot Disk Messungen sowie der temperaturabhängigen Rohdichte gemäß den Ergebnissen der thermisch gravimetrischen Analyse (TGA) ermittelt und sind Abbildung 5.6 zu entnehmen.

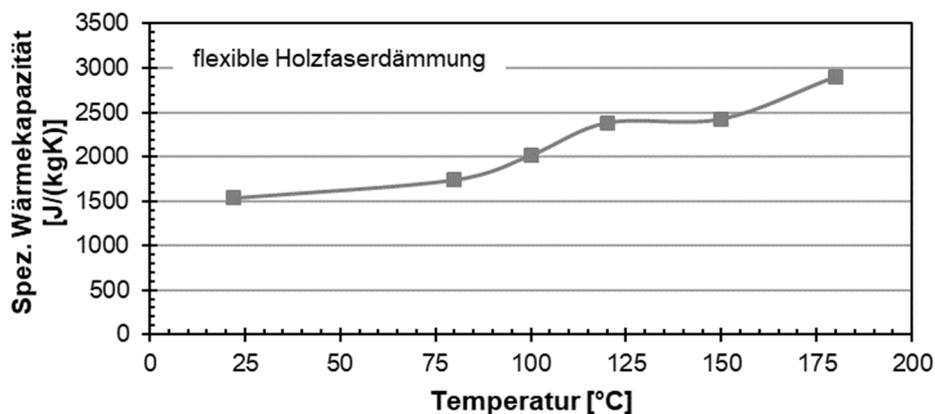


Abbildung 5.6: Berechnete Werte der spezifischen Wärmeleitfähigkeit für Holzfaserdämmstoffe aus dem THD- Verfahren sowie den Resultaten aus der TGA

Im Gegensatz zu den von den Dämmstoff-Herstellern meist mittels DSC (Differential-Scanning-Calorimetry) gemessenen Werten der spezifischen Wärmekapazität bei Raumtemperatur von 2100 J/(kgK) werden durch das Hot Disk-Verfahren nur 1480 J/(kgK) gemessen bzw. 1540 J/(kgK) errechnet. Die Unterbestimmung um ca. 30% weicht deutlich von der von Berge *et al.* [13] ermittelten Unterbestimmung bei Verwendung des Hot-Disk-Verfahrens um 7% für reines Silber ab.

Der durch die TGA gemessene Masseverlust wurde wie bei Vollholz (vgl. Harmathy [85] und Mehaffey *et al.* [113]) mit einer Heizrate von 5 K/min bestimmt. Im Folgenden wird die temperaturabhängige Rohdichte im Verhältnis zur Darrrohichte betrachtet (siehe Abbildung 5.7). Über den Feuchtegehalt von ca. 6 M-% wird das Verhältnis der Rohdichte bei Raumtemperatur zur Darrrohichte folgendermaßen ermittelt:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{w}{100} \quad (57)$$

mit:

$\rho$	Rohdichte bei Raumtemperatur [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Darrrohichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$w$	Feuchtegehalt [M-%]

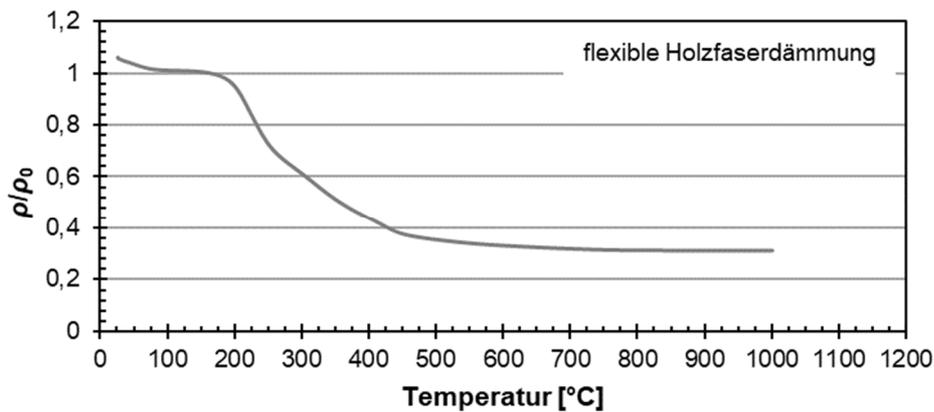


Abbildung 5.7: Gemessene Werte für flexible Holzfaserdämmung (Rohdichte ca. 50 kg/m<sup>3</sup>) für das Verhältnis von Rohdichte zur Darrohdichte

Eine volumetrische Veränderung des Holzfaserdämmstoffs bis 170°C ist mithilfe von Versuchen im Labor-Wärmeschrank nicht ersichtlich, vgl. Winter *et al.* [152]. Brandversuche hingegen zeigen ein deutliches Schrumpfverhalten der Dämmung unter erhöhten Temperaturen. Da das Schrumpfen für Temperaturen größer 170°C versuchstechnisch nicht ermittelt werden konnte, sind die Angaben der Rohdichte bei erhöhten Temperaturen für ein gleichbleibendes Volumen dargestellt.

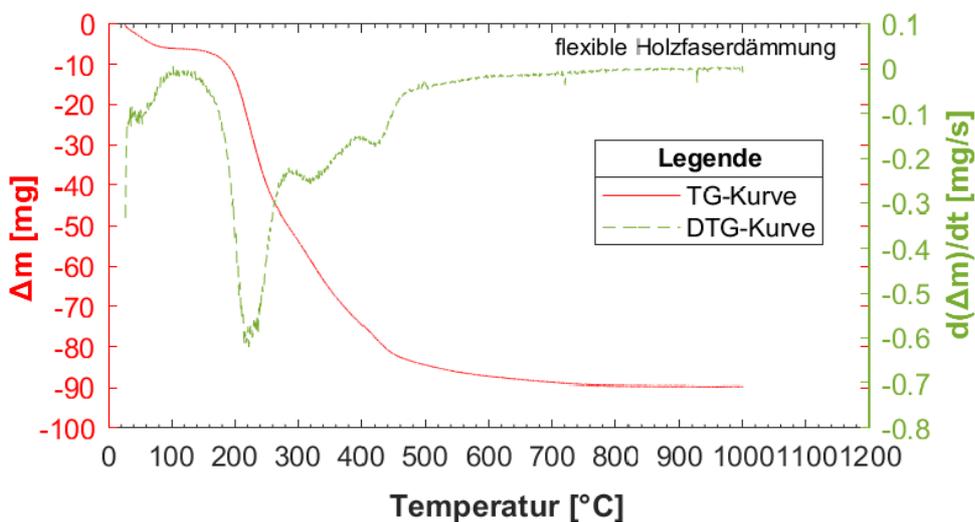


Abbildung 5.8: TG- und DTG-Kurve für Holzfaserdämmstoffe

Mithilfe der Thermogravimetrischen Kurve (TG-Kurve) und deren ersten Ableitung der Differenzierten-Thermogravimetrischen-Kurve (DTG-Kurve) werden maßgebliche Reaktionen im Material unter thermischer Beanspruchung ersichtlich (vgl. Abbildung 5.8). Bei Betrachtung des Masseverlustes lässt sich erkennen, dass die Masse bis etwa 110°C um ca. 5% im Bezug zur Ausgangsmasse von ca. 127 mg abnimmt. Der bedeutendste Masseverlust von ca. 65%

beginnt jedoch ab ca. 150°C und endet bei etwa 700°C. Im Anschluss wird kein weiterer Masseverlust aufgezeichnet. Mithilfe der Peaks in der DTG-Kurve wird deutlich bei welcher Temperatur eine Reaktion im Material auftritt. Die erste deutliche Reaktion ist bei etwa 80°C zu erkennen und lässt sich auf das Entweichen des Wassers zurückführen. Die zweite ersichtliche Reaktion ist auf die Pyrolyse zurückzuführen, deren Umsatz bei etwa 230°C ihren Höhepunkt findet. Der Beginn dieser Reaktion deckt sich in etwa mit der Zersetzung des Flamm- schutzmittels im Material (vgl. Tabelle 4-2). Bei 320°C und 450°C sind weitere Reaktionen zu erkennen, die jedoch keinen deutlichen Masseverlust hervorrufen. Ab 700°C sind keine weiteren Reaktionen ersichtlich.

### 5.3.3 Messergebnisse Zellulosedämmung

Die Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 63 kg/m<sup>3</sup> wurde mittels Zweiplattengerät im Temperaturbereich von 80°C bis 150°C auf der Warmseite der Proben ermittelt [73]. Die Ergebnisse werden analog zu den Holzfaserdämmstoffen einerseits in Bezug zur Temperatur auf der Warmseite des Prüfkörpers und andererseits in Bezug zur Mitteltemperatur zwischen Kalt- und Warmseite aufgezeichnet. Diesen Ergebnissen werden die Resultate für Zellulosedämmstoffe der Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> aus dem Hot-Disk-Verfahren bis 220°C gegenübergestellt (vgl. Abbildung 5.9).

Dabei lässt sich eine kontinuierliche Abweichung im Bereich von 80-150°C um ca. 20% zwischen den Ergebnissen aus den THD-Verfahren und den Ergebnissen mittels Plattengerät feststellen.

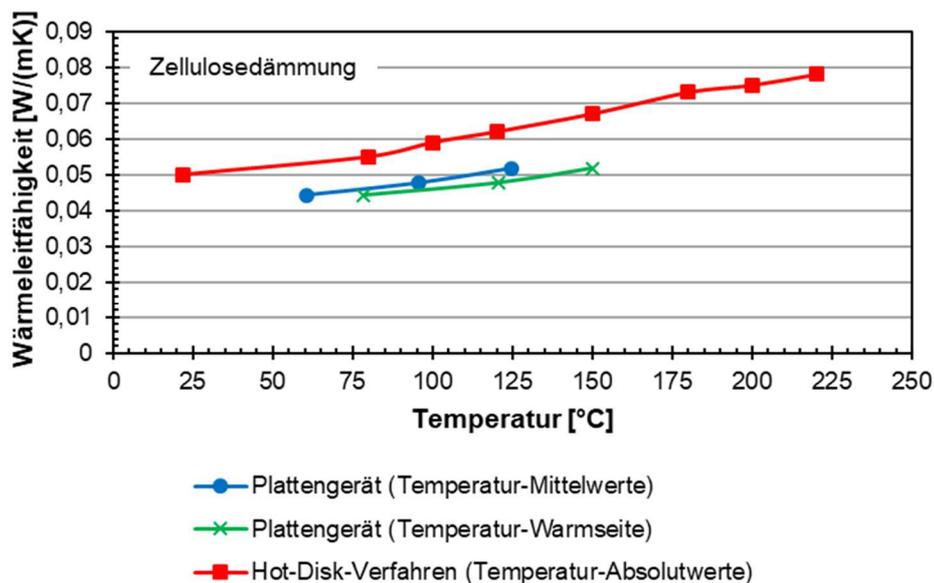


Abbildung 5.9: Experimentell ermittelte Werte der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Temperatur für Zellulosedämmstoffe (Rohdichte ca. 50-63 kg/m<sup>3</sup>)

Wie bei den Holzfaserdämmstoffen wurde die Wärmeleitfähigkeit gemäß Gleichung (52) berechnet, vgl. Abbildung 5.10. Hierfür wurden die gemessenen Werte der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit aus den THD Messungen sowie der temperaturabhängigen Rohdichte gemäß den Ergebnissen der thermisch-gravimetrischen Analyse (TGA) eingesetzt.

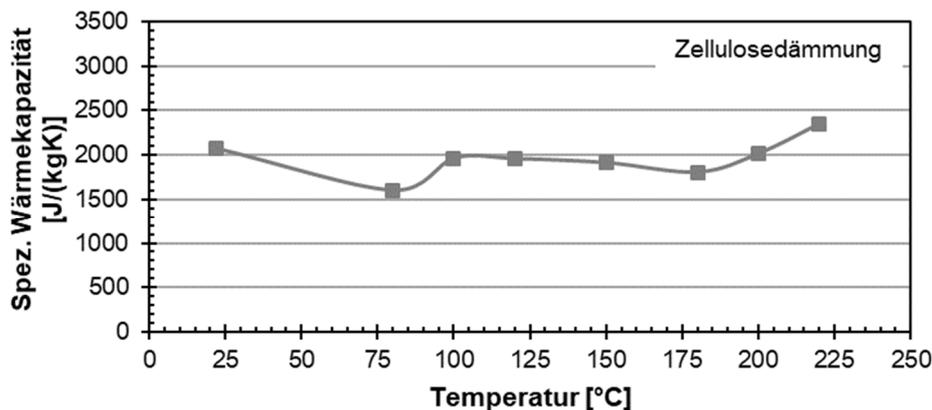


Abbildung 5.10: Berechnete Werte der spezifischen Wärmekapazität für Zellulosedämmstoffe aus dem THD Verfahren sowie den Resultaten aus der TGA

Von den meisten Herstellern von Zellulosedämmstoffen wird eine spezifische Wärmekapazität von ca. 2100 J/(kgK) unter Raumtemperatur angegeben. Dieser Wert entspricht den Ergebnissen aus DSC-Untersuchungen. Der berechnete Wert aus dem Hot-Disk-Verfahren von 2070 J/(kgK) ist den Veröffentlichungen der Hersteller gleichzusetzen. Der gemessene Wert der spezifischen Wärmekapazität aus den Hot-Disk-Verfahren von 1260 J/(kgK) liegt jedoch deutlich unter den vorherigen Angaben. Die Differenz des gemessenen Wertes vom errechneten Wert von 40% lässt sich möglicherweise auf eine unterschiedliche Ausgangsfeuchte und/oder Rohdichte der Proben zurückführen. Eine weitere Möglichkeit der unterschätzten spezifischen Wärmekapazität ist durch das Hot-Disk-Verfahren selbst zu begründen, vgl. Berge *et al.* [13].

Wie bei den Holzfaserdämmstoffen wird der Masseverlust mittels TGA bei einer Heizrate von 5 K/min bestimmt. Die temperaturabhängige Rohdichte wird im Verhältnis zur Darrohdichte mit einer Ausgangsfeuchte von 9 M-% gemäß Gleichung (57) ohne Berücksichtigung eines veränderlichen Volumens dargestellt (siehe Abbildung 5.11).

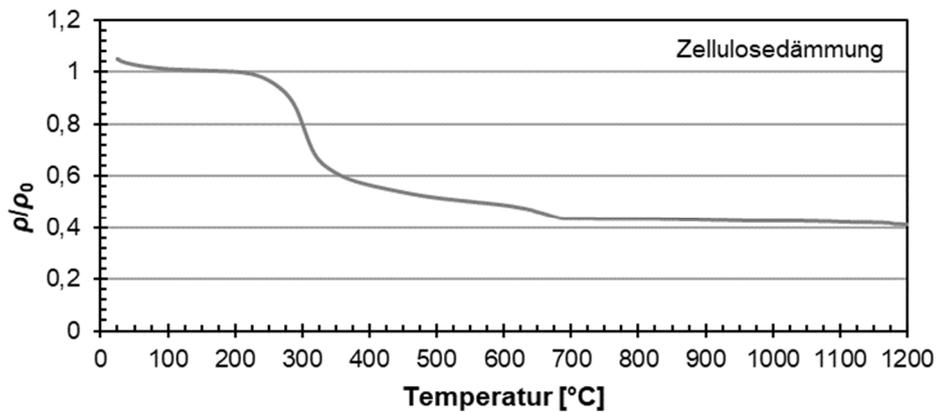


Abbildung 5.11: Gemessene Werte für Zellulosedämmstoffe (Rohdichte ca.  $50 \text{ kg/m}^3$ ) für das Verhältnis von Rohdichte zur Darrohdichte

Der Masseverlust, der durch die TG-Kurve in Abbildung 5.12 beschrieben wird, entspricht bei  $110^\circ\text{C}$  etwa 4% der Ausgangsmasse von ca. 58 mg. Der größte Verlust an Masse von ca. 54% beginnt bei ca.  $200^\circ\text{C}$  und findet sein Ende bei etwa  $700^\circ\text{C}$ . Bei höheren Temperaturen wird kein weiterer Masseverlust festgestellt. Die erste, kaum wahrzunehmende Reaktion ist in der Entweichung von Wasser bei etwa  $80^\circ\text{C}$  zu erkennen. Die zweite Reaktion, die als signifikanter Peak in der DTG-Kurve zu erkennen ist, verursacht die Pyrolyse, die bei etwa  $300\text{-}320^\circ\text{C}$  ihren Höhepunkt findet. Eine letzte Reaktion ist dem Peak bei etwa  $680^\circ\text{C}$  zu entnehmen, wo die Zersetzung des Materials eintritt.

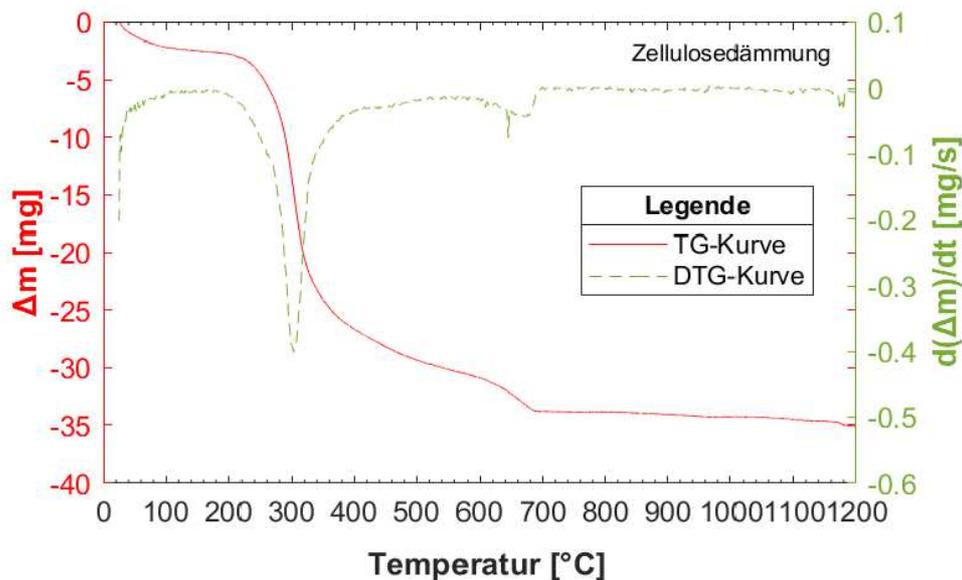


Abbildung 5.12: TG- und DTG-Kurve für Zellulosedämmstoffe

### 5.3.4 Schlussfolgerung und Gegenüberstellung der Messergebnisse mit dem Werkstoff Holz

Aufgrund ähnlicher Bestandteile werden im Folgenden die experimentell ermittelten Materialkennwerte für Holzfaserdämmstoffe und Zellulosedämmstoffe mit dem Werkstoff Holz verglichen.

Die Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Masseverlustes zeigt für Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe bei deutlich geringeren Temperaturen eine erhebliche Reduktion der Masse im Vergleich zu Holz auf. Dies ist durch die früher einsetzende Pyrolyse ab etwa 150°C für die flexible Holzfaserdämmung und ab ca. 200°C für die Zellulosedämmung zu erklären. Für Holz beginnt ein geringer Masseverlust durch die entstehende Pyrolyse auch ab etwa 200°C, steigert sich in den Untersuchungen von Harmathy [85] aber erst ab ca. 350°C signifikant. Frangi [74] hingegen verweist auf einen rapiden Gewichtsverlust schon ab 280°C, der mit der Zersetzung von Zellulose und der Bildung leicht brennbarer Gase einhergeht.

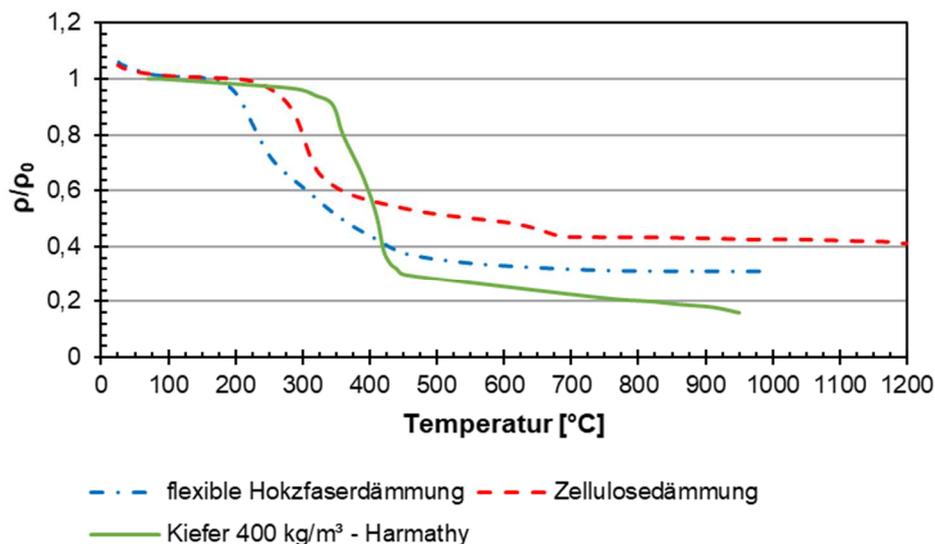


Abbildung 5.13: Vergleich des gemessenen Verhältnisses von Rohdichte zur Darrrohichte für Holz [85, 120], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung

Eine Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Wärmekapazität von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen mit dem Werkstoff Holz sei hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt (vgl. Abbildung 5.14), da die Genauigkeit der Messergebnisse für Holz mittels DSC nach Meinung von Kodur *et al.* [65] fragwürdig ist. Außerdem werden nach Meinung der Verfasserin die Fehlerlosigkeit der Ergebnisse aus den Hot-Disk-Verfahren für Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe aufgrund der vorliegenden Anisotropie der Stoffe angezweifelt.

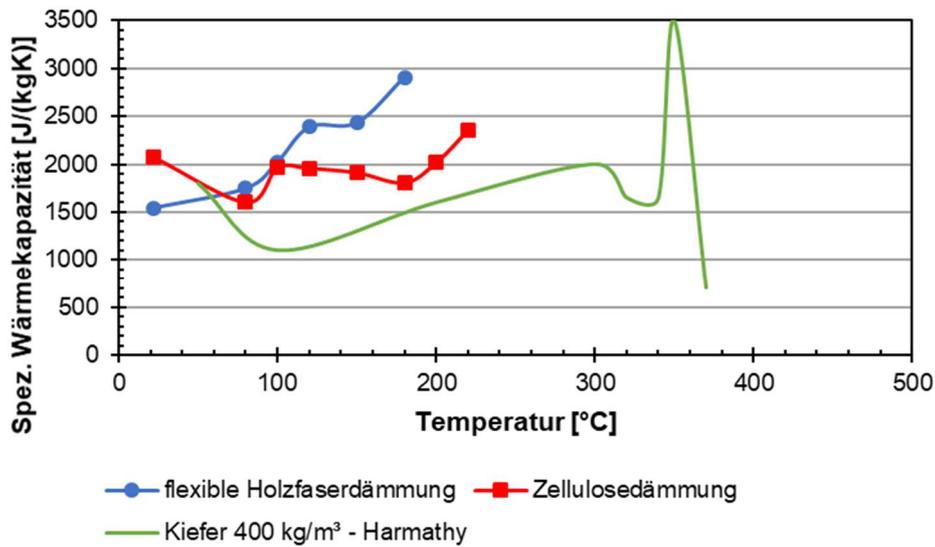


Abbildung 5.14: Vergleich der gemessenen spezifischen Wärmekapazität von Holz [65], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung

Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeiten der flexiblen Holzfaser- und Zellulosedämmung unter steigender Temperatur ist mit Holz vergleichbar (vgl. Abbildung 5.15). Gleichsam wie die Wärmeleitfähigkeit von Holz bei steigender Temperatur (vgl. Maku [111]) entwickeln sich die experimentell ermittelten Werte für Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe bis zum Eintritt der Pyrolyse proportional zur absoluten Temperatur. Ergebnisse von Bénichou [12] bestätigen diese Proportionalität bis etwa 200°C (vgl. Fichte 1 und Fichte 2 in Abbildung 5.15). Mit Einhergehen der Bildung einer Holzkohleschicht endet der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und führt zu einer deutlichen Reduktion der Werte.

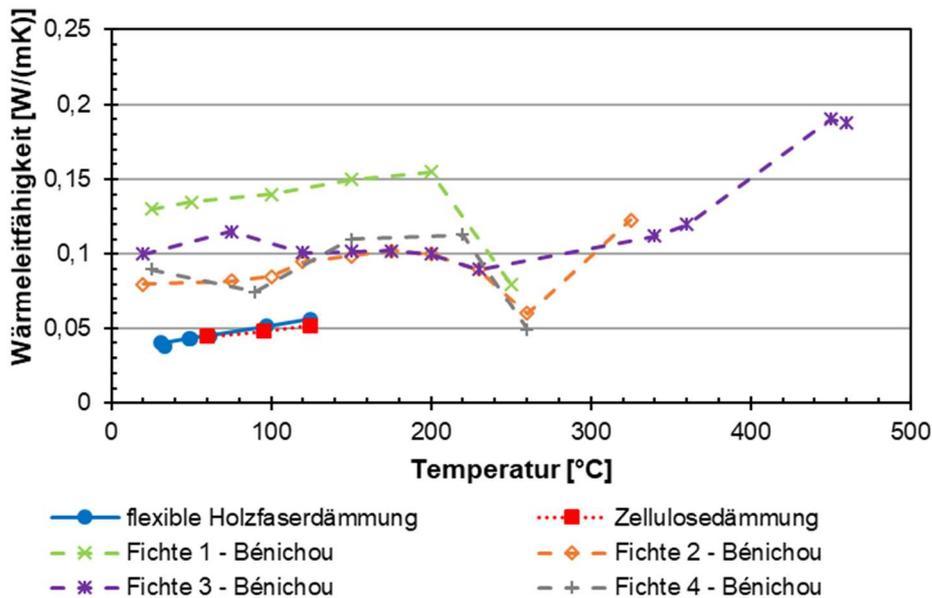


Abbildung 5.15: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeit von Holz [12], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung

## 5.4 Analyse effektiver Materialkennwerte

### 5.4.1 Verwendete Ausgangswerte

Die experimentell ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und des Masseverlusts (vgl. Abschnitt 5.3) sind die Ausgangsbasis zur Bestimmung der effektiven Materialkennwerte. Die ermittelten Ergebnisse des Verhältnisses von Rohdichte zur Darrrohichte für die flexible Holzfaserdämmung und die Zellulosedämmung werden ohne Veränderung aus den Abschnitten 5.3.2 und 5.3.3 übernommen.

Die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität müssen entsprechend der erwarteten Reaktionen im Material, die sich anhand der DTG-Kurven (vgl. Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3) abzeichnen, angepasst werden. Deren Verlauf muss zusätzlich bis etwa 1200°C erweitert werden. In Orientierung an den Entwicklungen der effektiven Materialkennwerten für Holz (vgl. Schleifer [120] und Frangi [74]), die in Abhängigkeit physikalischer und chemischer Reaktionen im Material verändert wurden, werden Ausgangswerte für effektive Materialkennwerte der Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe festgelegt.

Als Ausgangswerte für die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  wird der grafische Verlauf aus Abbildung 5.16 für flexible Holzfaserdämmstoffe verwendet. Dabei werden die Werte der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  in Abhängigkeit ausgewählter Temperaturschritte zur Nachbildung der Reaktionen dargestellt (vgl. Tabelle 5-1). Die Start-Werte zwischen 20°C und 79°C gehen auf die von den Dämmstoffherstellern ermittelten Kennwerte unter Raumtemperatur zurück. Der folgende Anstieg zwischen 80°C und 100°C, der die Entweichung des Wassers widerspiegelt, wird analog zu den effektiven Kennwerten von Holz gestaltet. Die Verdampfungswärme,

die als nahezu rechteckige Fläche unter der Kurve nachgebildet wird, berechnet sich folgendermaßen:

$$q_{\text{lat}} = 2257 \text{ kJ/kg} \cdot \frac{\frac{u}{100}}{\left(1 + \frac{u}{100}\right)} \cdot 10^3 \quad (58)$$

mit:

$q_{\text{lat}}$	Verdampfungswärme [J/kg]
2257	spezifische Verdampfungswärme von Wasser [kJ/kg]
$u$	Ausgangsfeuchte [M-%]

Mit einer Ausgangsfeuchte von 8 M-% entsteht gemäß Gleichung (58) eine Verdampfungswärme von 167185 J/kg. Durch die Entweichung des Wassers zwischen 80°C und 100°C erhält man ein Maximum der spezifischen Wärmekapazität von ca. 8360 J/(kgK). Im Temperaturbereich zwischen 101°C bis 150°C wird davon ausgegangen, dass die spezifische Wärmekapazität in etwa den Start-Werten entspricht. Eine Veränderung der Werte tritt erst durch den Start der Pyrolyse auf. In Anlehnung an die effektiven Kennwerte der spezifischen Wärmekapazität von Holz nach Schleifer [120], wird für die flexible Holzfaserdämmung eine dreieckige Fläche unter der Kurve entwickelt. Die Pyrolyse beginnt bei etwa 150°C, erreicht ihr Maximum bei 230°C und endet bei ca. 500°C. Die Höhe des Peaks wird mit 4100 J/(kgK) angenommen und führt zu einer abgeschätzten Reaktionswärme als Fläche unter der Kurve von etwa 368000 J/kg. Dies entspricht in etwa der Reaktionswärme der pyrolytischen Zersetzung von Holz nach Frangi [74]. Die restlichen Werte ab 500°C entsprechen den in der DIN EN 1995-1-2 [55] verwendeten Werten für Holzkohle. Zwischen 700°C und 1200°C sind entsprechend des horizontalen Verlaufs der DTG-Kurve (vgl. Abbildung 5.8) keine Reaktionen mehr zu erwarten, daher werden zwischen den Wertepaaren bei 700°C und 1200°C keine weiteren Temperaturschritte benötigt.

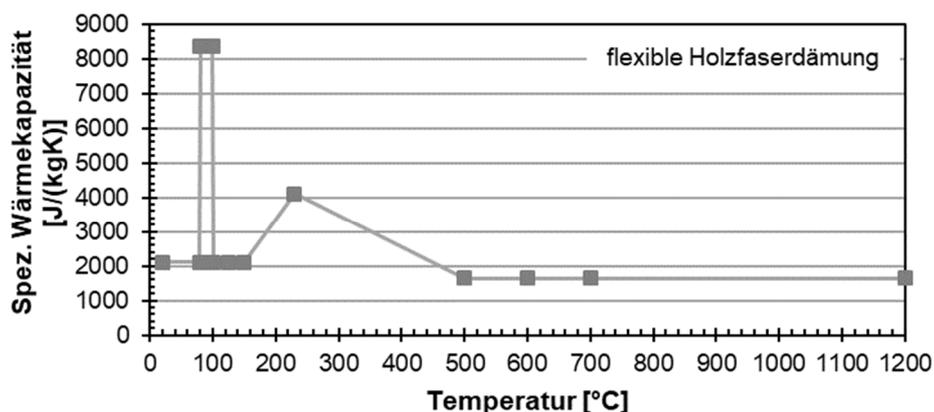


Abbildung 5.16: Ausgangswerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der flexiblen Holzfaserdämmung

Tabelle 5-1: Kennwerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der flexiblen Holzfaserdämmung

<b>Temperatur [°C]</b>	20	79	80	100	101	125
<b>c<sub>p</sub> [J/(kgK)]</b>	2100	2100	8360	8360	2100	2100
<b>Temperatur [°C]</b>	150	230	500	600	700	1200
<b>c<sub>p</sub> [J/(kgK)]</b>	2100	4100	1650	1650	1650	1650

In Abbildung 5.17 ist der grafische Verlauf der effektiven spezifischen Wärmekapazität für Zellulosedämmstoffe dargestellt. Die zugehörigen Wertepaare sind in Tabelle 5-2 wiedergegeben. Der Verlauf ist dem der flexiblen Holzfaserdämmung nahezu identisch. Auch bei der Zellulosedämmung wird als Startwert unter Raumtemperatur eine spezifische Wärmekapazität von 2100 J/(kg K) gemäß den Angaben der Hersteller zwischen 20°C und 79°C verwendet. Für die Zellulosedämmung ist ebenfalls eine Ausgangsfeuchte von 8 M-% anzunehmen, die bei einer Entweichung des Wassers zwischen ca. 80°C und 100°C, zu einer spezifischen Wärmekapazität von ca. 8360 J/(kgK) führt. Im Bereich zwischen 101°C und 220°C wird auch hier davon ausgegangen, dass die effektiven Kennwerte in etwa den Start-Werten entsprechen. Durch die Nachbildung der Pyrolyse steigt die spezifische Wärmekapazität ab ca. 220°C erneut an. Entsprechend der DTG-Kurve (vgl. Abschnitt 5.3.3) wird der entsprechende Höhepunkt bei etwa 320°C angesetzt. Da im Gegensatz zu Holz keine Angaben zur benötigten Reaktionswärme vorliegen, wird hierfür von etwa 327000 J/kg ausgegangen. Ab 500°C wird wie bei der Holzkohle eine spezifische Wärmekapazität von etwa 1650 J/(kgK) erwartet (vgl. Abbildung 5.17).

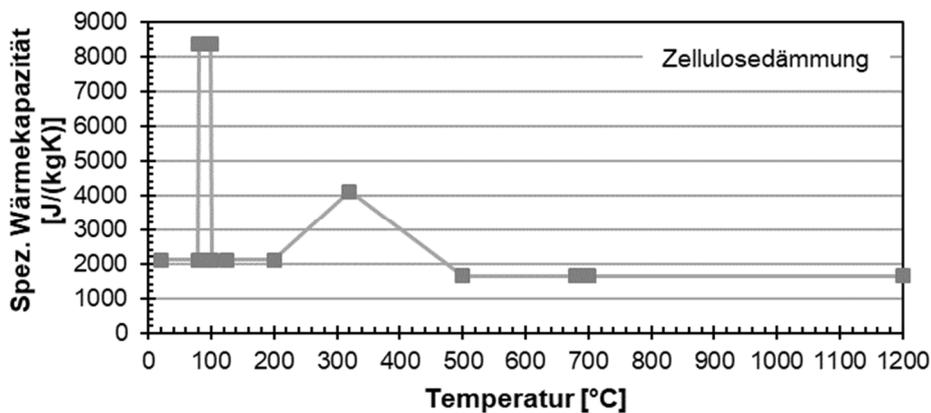


Abbildung 5.17: Ausgangswerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der Zellulosedämmung

Tabelle 5-2: Kennwerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der Zellulosedämmung

<b>Temperatur [°C]</b>	20	79	80	100	101	125
<b>c<sub>p</sub> [J/(kgK)]</b>	2100	2100	8360	8360	2100	2100
<b>Temperatur [°C]</b>	200	320	500	680	700	1200
<b>c<sub>p</sub> [J/(kgK)]</b>	2100	4100	1650	1650	1650	1650

Die Ausgangswerte der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der flexiblen Holzfaserdämmung und der Zellulosedämmung basieren auf den Ergebnissen aus den Plattenverfahren in Bezug zu den Mittelwerten der Temperaturen zwischen Warm- und Kaltseite (vgl. Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3). Der weitere Verlauf entspricht für die flexible Holzfaserdämmung bis etwa 180°C und für die Zellulosedämmung bis 230°C der linearen Trendlinie aus den experimentell ermittelten Ergebnissen dieser Plattenversuche. Eine Ausnahme bildet dabei die Nachbildung der Entweichung von Wasser bei ca. 80°C, die mittels eines Peaks berücksichtigt wird. Im Anschluss an die experimentell ermittelten Werte wird die Pyrolyse zwischen 320°C und 500°C über eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit ausgedrückt. Die folgende Zersetzung des Materials wird mit einem steilen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit widergespiegelt. Der grafische Verlauf sowie die zugehörigen Wertepaare werden für die flexible Holzfaserdämmung in Abbildung 5.18 und Tabelle 5-3 dargestellt, für Zellulose in Abbildung 5.19 und Tabelle 5-4. Die Wahl der Temperaturschritte zwischen 20°C und 125°C erfolgte für die flexible Holzfaserdämmung sowie für die Zellulosedämmung analog. Der erwartete Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zur Beschreibung der Entweichung des Wassers wird für beide Dämmstoffe zwischen 80°C und 100°C gewählt. Da der Verlauf der Pyrolyse beider Dämmstoffe voneinander abweicht, werden die Temperaturschritte differenziert gewählt. Diese werden zum jeweiligen Beginn der Pyrolyse, an einigen lokalen Maxima im Verlauf, sowie am jeweiligen Ende festgelegt. Aufgrund fehlender Reaktionen zwischen 700°C und 1200°C werden keine zusätzlichen Temperaturschritte in diesem Bereich angesetzt.

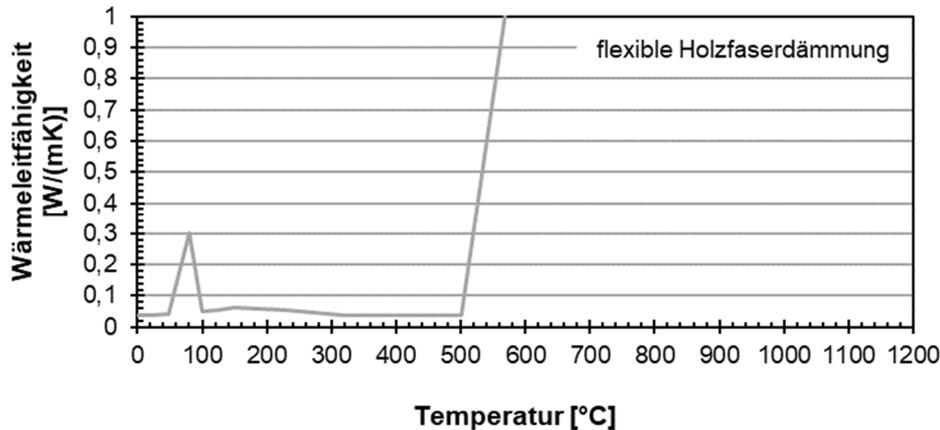


Abbildung 5.18: Ausgangswerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung

Tabelle 5-3: Ausgangswertewerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung

<b>Temperatur [°C]</b>	20	50	80	100	110	125
<b><math>\lambda</math> [W/(mK)]</b>	0,039	0,043	0,3	0,051	0,053	0,056
<b>Temperatur [°C]</b>	180	230	320	500	700	1200
<b><math>\lambda</math> [W/(mK)]</b>	0,069	0,079	0,04	0,04	2,89	10

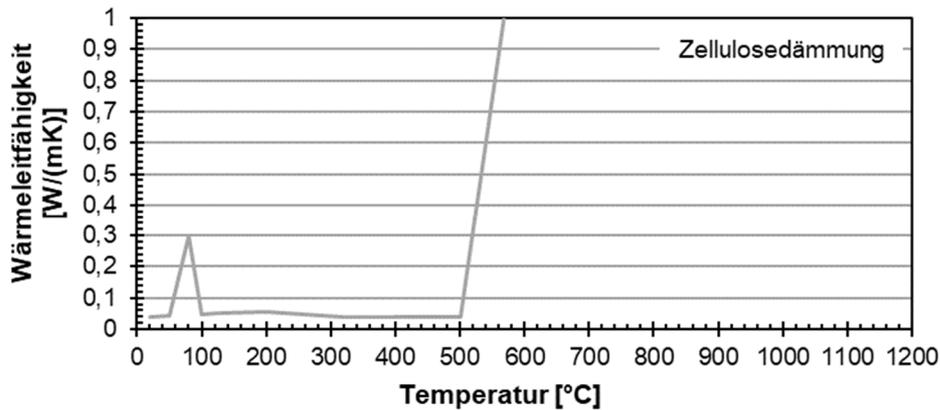


Abbildung 5.19: Ausgangswerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung

Tabelle 5-4: Ausgangswertewerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung

<b>Temperatur [°C]</b>	20	50	80	100	110	125
<b>λ [W/(m K)]</b>	0,039	0,043	0,3	0,048	0,049	0,052
<b>Temperatur [°C]</b>	200	320	400	500	700	1200
<b>λ [W/(m K)]</b>	0,057	0,04	0,04	0,04	2,89	10

#### 5.4.2 Methode zur Anpassung der Materialkennwerte

In einer numerischen Simulation (vgl. Abschnitt 6.1) werden die Ausgangswerte aus Abschnitt 5.4.1 zum Lösen der transient-instationären Wärmeleitung auf Basis der Fourier'schen Differenzialgleichung (15) als Ausgangswerte eingesetzt. Das Finite-Elemente-Modell besteht dabei aus dem gleichen Schichtenaufbau wie der zum Vergleich herangezogene Brandversuch. Hierfür wurde ein Versuchsaufbau gewählt, in welchem der Dämmstoff (flexible Holzfasero- oder Zellulosedämmung) in variierenden Dicken dem Brand unter einer Brandbeanspruchung entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve direkt ausgesetzt wird und durch eine 19 mm dicke Spanplatte hinterlegt wird. Diese Untersuchung entspricht dem Vorgehen zur Bestimmung der Grundschutzzeit einer Bauteilschicht gemäß Schleifer [120]. Darüber hinaus wurde im Brandversuch durch konstruktive Maßnahmen (Drahtgitter, Latten, Gipsplatten an den Rändern des Dämmstoffes) ein Herausfallen des zu untersuchenden Dämmstoffes verhindert (vgl. Anhang F und G aus Winter *et al.* [152] sowie Abbildung A. 1 und Abbildung A. 3 im Anhang). Auf Grundlage dieser Brandversuche werden die Temperatur-Zeit-Kurven betrachtet, die aus Aufzeichnungen verschiedener Thermoelemente des Typs K stammen, die zwischen Dämmung und Spanplatte angebracht waren (siehe Brandversuche aus Winter *et al.* [152]). Im Weiteren werden der Mittelwert und der Maximalwert der Temperatur-Zeit-Kurven aus dem entsprechenden Brandversuch mit dem Ergebnis der numerischen Simulation verglichen. Diese Gegenüberstellung der Kurven bildet die Grundlage einer systematischen Anpassung der effektiven Materialkennwerte.

Die Simulationskurve aus der numerischen Berechnung bildet dabei eine Temperatur-Zeit-Kurve eines repräsentativen Punkts im Konstruktionsaufbau zwischen Spanplatte und Dämmschicht nach. Sie ändert ihren Verlauf entsprechend der Anpassungen der effektiven Materialkennwerte.

Ein Vergleich der Simulation auf Basis der gewählten Ausgangswerte mit den Mittel- und Maximalwerten der jeweiligen Brandversuche lässt erkennen, dass die Kurvenverläufe unter Verwendung der gewählten Ausgangswerte (vgl. Abschnitt 5.4.1) der effektiven Kennwerte ohne weitere Anpassungen deutlich voneinander abweichen (vgl. Abbildung 5.20).

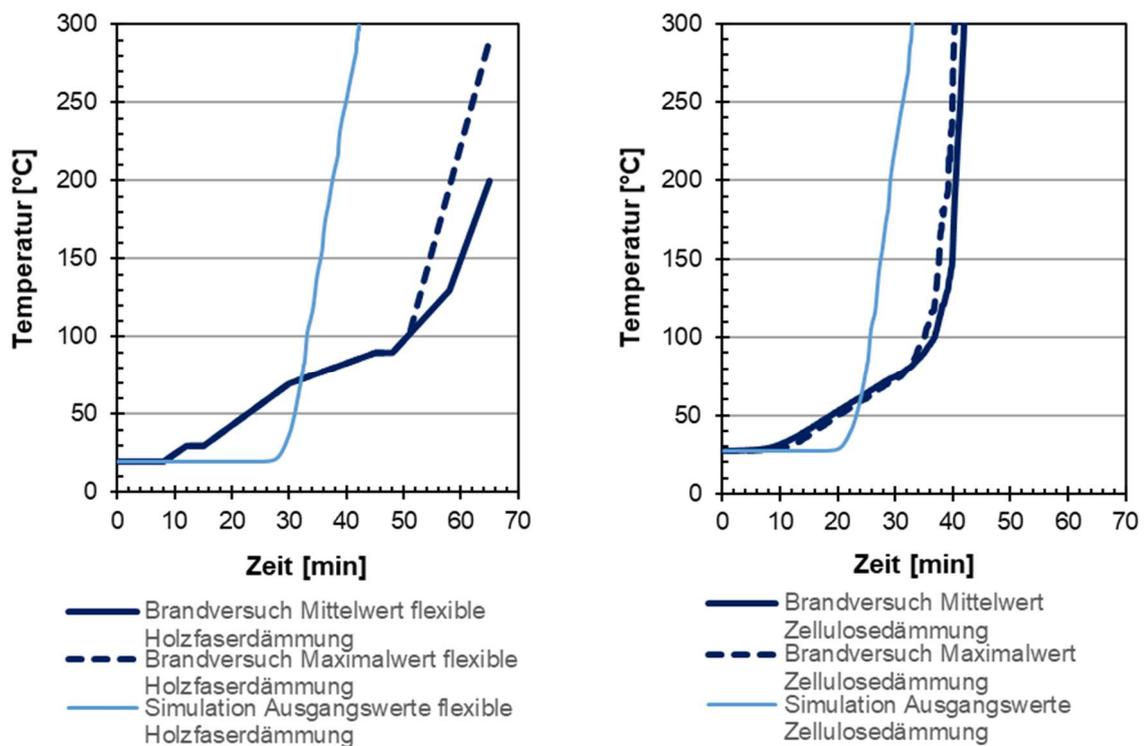


Abbildung 5.20: Vergleich der Brandversuche mit den Ausgangswerten der effektiven Kennwerte für 160 mm flexible Holzfaserdämmung (links) und 120 mm Zellulosedämmung (rechts)

Unter Verwendung der Software MATLAB werden die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit bei 80°C und ab ca. 230°C bzw. 300°C solange systematisch verändert, bis die simulierten Kurven an die Temperatur-Zeit-Kurven aus den Brandversuchen angenähert sind. Dies erfolgt innerhalb einer Regressionsanalyse durch die Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes (oder auch Determinationskoeffizient genannt), das mit  $R^2$  bezeichnet wird, um die Angleichung der simulierten Kurve an die Brandversuchskurve bewerten zu können. Dafür wird die Summe der Residuenquadrate erzeugt. Diese wird über die Summe der quadrierten Differenzen der simulierten Temperatur zur Brandversuchstemperatur zum jeweilig gleichen Zeitpunkt über alle Zeitschritte hinweg hergestellt. Dieses Vorgehen entspricht der Kleinst-Quadrat-Methode (engl. least squares method). Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen (vgl.

Mayerl *et al.* [112]). Ziel ist die Erreichung eines möglichst großen Bestimmtheitsmaßes von nahezu 1, indem die Residuenquadratsumme verkleinert wird.

Mithilfe des implementierten Levenberg-Marquardt-Algorithmus innerhalb einer Optimierungsfunktion (vgl. Gavin [76], Bäker [8], Sjöberg *et al.* [121]), in welcher die Kurvenanpassung über nichtlineare least-squares-Probleme gelöst werden, werden die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit systematisch innerhalb der Grenzen von 0,01 und 20 W/(mK) derartig verändert, dass gleichzeitig eine Verkleinerung der Abweichung der Kurven erzwungen wird.

Für eine weitere spezifische Anpassung der Kennwerte wird der Kurvenverlauf näher betrachtet. Eine Auswertung der Brandversuche lässt sowohl für Zellulose- als auch Holzfaserdämmstoffe jeweils einen typischen Verlauf der Temperatur-Zeitkurve erkennen (vgl. Abbildung 5.20). Diese eigenartigen Temperatur-Zeit-Verläufe beginnen mit einem *horizontalen Verlauf*, der mit dem Entweichen des gebundenen Wassers in einen linearen Anstieg der Temperatur übergeht. Der *mäßige Anstieg* endet mit dem Beginn eines markanten, deutlich steilen Anstiegs ab etwa 90°C. Dieser deutlich schnellere Temperaturanstieg lässt sich in den ausgewerteten Brandversuchen durch das Hinterströmen von Heißgasen über die Flanken infolge des Schrumpfens des Dämmstoffes erklären (vgl. Winter *et al.* [152] und Abbildung 5.22) und stellt ein spezifisches Verhalten einiger biogenen Dämmstoffe dar. Sofern die Temperatur zwar deutlich ansteigt, aber kein annähernd senkrechter Temperaturverlauf zu erkennen ist, wird von einem direkten Wärmedurchgang gemäß Abbildung 5.21 ausgegangen. Dieser Anstieg bei direktem Wärmedurchgang ist mit der Zersetzung des Materials einhergehend.

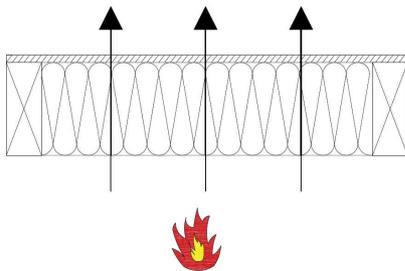


Abbildung 5.21: Direkter Wärmedurchgang durch das Bauteil

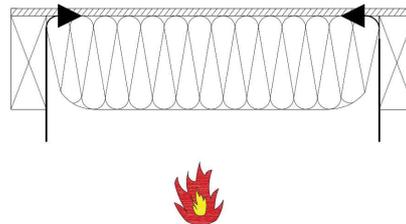


Abbildung 5.22: Hinterströmen heißer Gase über die Flanken

Um das Niveau des Kurvenverlaufs mit *mäßigem Anstieg* zwischen Raumtemperatur und etwa 90°C steuern zu können, wird der Kennwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei 80°C maßgebend (vgl. Abbildung 5.23).

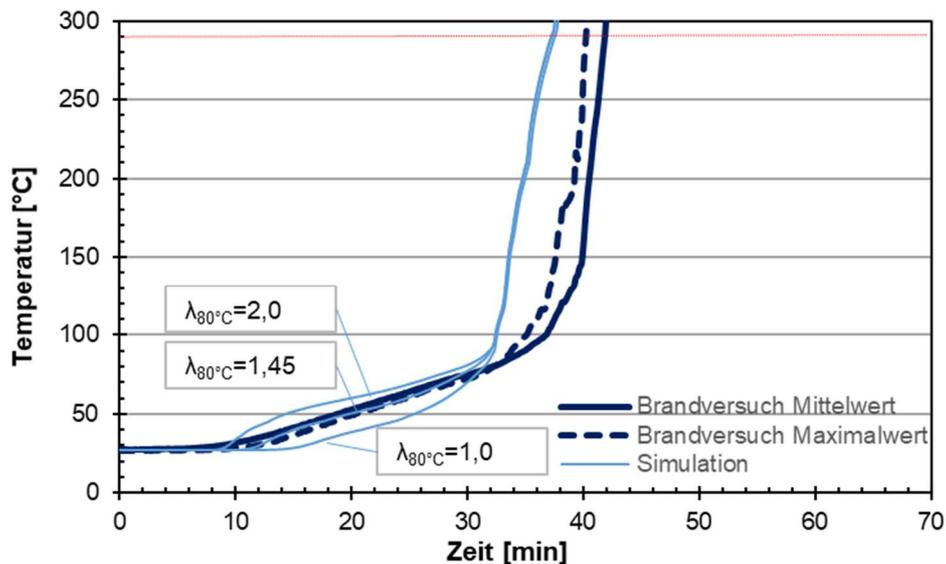


Abbildung 5.23: Auswirkung veränderter effektiver Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit bei 80°C auf die berechneten Temperatur-Zeitverläufe auf der feuerabgewandten Seite (Beispiel für 120 mm dicker Zellulosedämmstoff)

Für die flexible Holzfaserdämmung wird der nachfolgende steile Anstieg der Kurve durch einen hohen effektiven Kennwert der Wärmeleitfähigkeit bei einer zugehörigen Temperatur von 1200°C bewirkt. Eine Änderung des Kennwertes bei 700°C lässt die Startzeit des steilen Anstiegs verschieben. Je größer dieser Wert gewählt wird, desto schneller tritt der Temperaturanstieg ein. Zusätzlich wirkt sich die Wahl dieses Wertes in Kombination mit dem Wert bei 1200°C auf die Steigung dieses Kurvenverlaufs aus.

Bei Zellulosedämmstoffen wird zur Nachbildung des nahezu *senkrechten Kurvenverlaufs* eine feinere Abstufung der Kennwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit zwischen 680°C und 700°C gewählt. Diese Abstufung lässt den typischen steilen Anstieg der Temperatur-Zeitkurve für alle Dämmstoff-Dicken besser nachbilden. Effektive Kennwerte für Zellulose von 15 W/(mK) bei 700°C sowie 100 W/(mK) bei 1200°C rufen einen nahezu senkrechten Kurvenverlauf hervor. Eine Veränderung des Wertes bei 680°C sorgt bei höheren Werten für eine schnellere Temperaturerhöhung. Die Wahl geringerer Werte erzielt hingegen einen verspäteten und weniger steilen Anstieg des betrachteten Kurvenverlaufs (vgl. Abbildung 5.24).

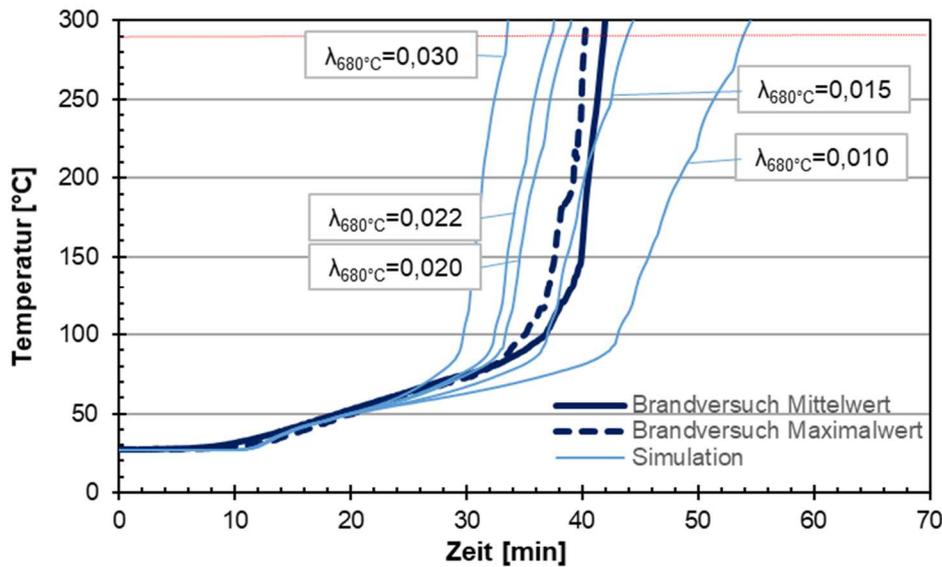


Abbildung 5.24: Auswirkung veränderter effektiver Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit bei 680°C auf die berechneten Temperatur-Zeitverläufe auf der feuerabgewandten Seite (Beispiel 120 mm dicker Zellulosedämmstoff)

Zur Bestimmung allgemeingültiger temperaturabhängiger effektiver Kennwerte eines Dämmmaterials werden nachfolgend zuerst die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung der beschriebenen Vorgehensweise unter Einsatz einer größeren Dämmstoffdicke (flexible Holzfaser 160 mm; Zellulose 120 mm) ermittelt. Auf Grundlage der gewonnenen effektiven Kennwerte werden die Kurvenverläufe der numerischen Simulation jeweils für die kleinere getestete Dämmstoffdicke (60 mm für flexible Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung) mit den entsprechenden Brandversuchen verglichen. Abbildung 5.25 veranschaulicht eine sehr gute Übereinstimmung der Temperatur-Zeit-Kurven aus Simulation und Brandversuch über einen gewissen Zeitabschnitt. Bei Eintritt des rapiden Temperaturanstiegs weichen die Verläufe jedoch in Bezug zur Startzeit und der Steigung deutlich voneinander ab.

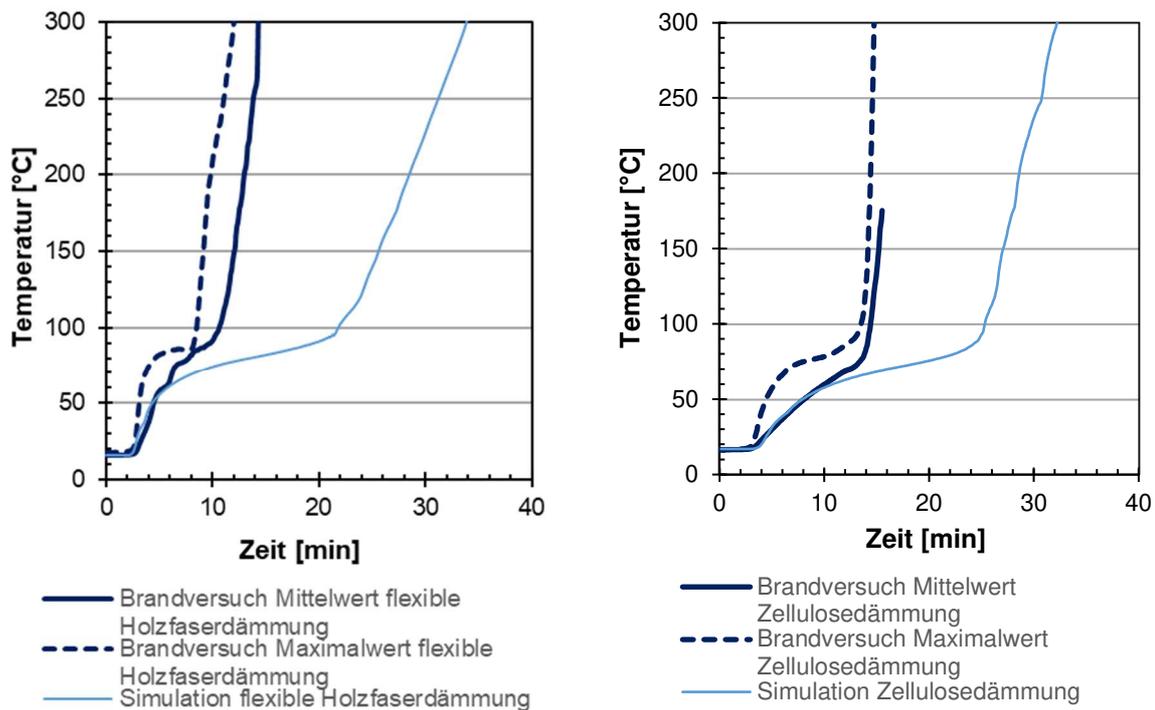


Abbildung 5.25: Vergleich des Brandversuchs für 60 mm dicke flexible Holzfaserdämmstoffe (links) bzw. Zellulosedämmstoffe (rechts) mit entsprechender Simulation auf Basis der ermittelten effektiven Kennwerte für 160 mm dicke flexible Holzfaserdämmstoffe (links) und 120 mm dicke Zellulosedämmstoffe (rechts)

Eine durch die Abweichung der Temperatur-Zeit-Kurven in Abbildung 5.25 hervorgerufene erneute Bestimmung der effektiven Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit für die 60 mm dicken Dämmstoffe gemäß der beschriebenen Kurvenanpassung über nichtlineare least-squares-Probleme zeigt lediglich eine signifikante Abweichung bei 700°C für die flexible Holzfaserdämmung und bei 680°C für die Zellulosedämmung auf.

Eine Analyse von Temperatur-Zeit-Kurven und Prüfberichten aus Brandversuchen mit Zello- und Holzfaserdämmstoffen, die innerhalb einer Datenbank von Winter *et al.* [152] gesammelt wurden, belegt, dass vor allem bei Dämmstoffen geringerer Dicke ein vorzeitiges Hinterströmen infolge des Schrumpfens des Dämmstoffes zu erkennen ist und demzufolge ein schnellerer Temperaturanstieg stattfindet.

Das voranschreitende Schrumpfen unter gleichbleibender Rückzugsgeschwindigkeit des Dämmstoffes entlang der Flanken bei Brandeinwirkung bewirkt eine fortentwickelnde Reduzierung des Kontaktes des Dämmstoffes zum Tragwerk und führt zu einer verminderten Klemmwirkung (siehe Abbildung 5.26). Bei geringen Dämmstoffdicken ermöglicht die verhältnismäßig deutlich verkleinerte Kontaktfläche ein vorzeitiges Hinterströmen des Dämmstoffes und löst das Herausfallen des Dämmstoffes aus.

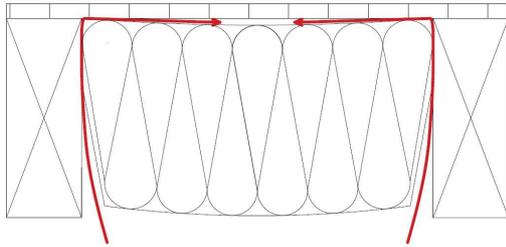


Abbildung 5.26: Hinterströmen von Heißgasen durch verringerte Kontaktfläche der Dämmung zum Tragwerk ausgelöst durch Schrumpfen

Abweichend vom Vorgehen bei der Bestimmung der temperaturabhängigen effektiven spezifischen Wärmeleitfähigkeit unter direktem Wärmedurchgang (vgl. Abbildung 5.21) durch die untersuchte Bauteilschicht werden die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe bei 700°C bzw. 680°C infolge der Auswirkungen durch das Schrumpfen dickenabhängig angepasst. Diese dickenabhängigen Werte bei 700°C bzw. 680°C werden entsprechend der gemessenen Grundschutzzeiten und einer jeweilig angefertigten linearen Trendlinie entsprechend Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 entwickelt.

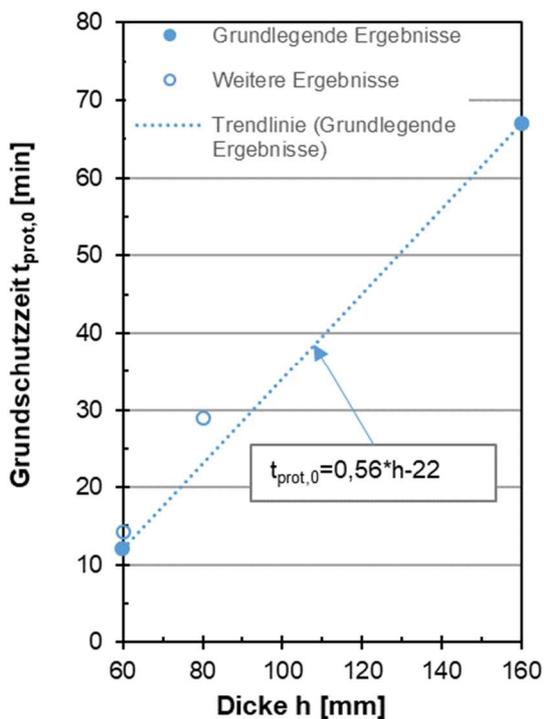


Abbildung 5.27: Gemessene Grundschutzzeiten der Holzfaserdämmung mit entscheidender Trendlinie

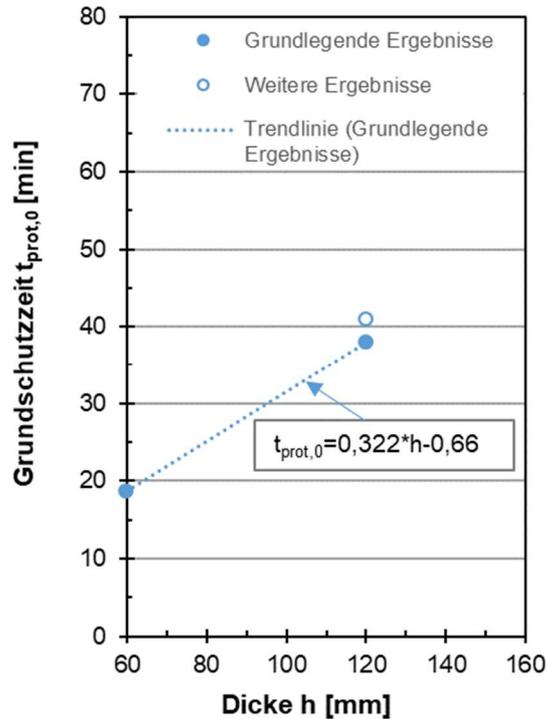


Abbildung 5.28: Gemessene Grundschutzzeiten der Zelledämmung mit entscheidender Trendlinie

Im Weiteren wurden auf Basis der ermittelten Kennwerte der flexiblen Holzfaserdämmstoffe auch die Kennwerte für Holzfaserplatten gemäß DIN EN 13171 [42], die einerseits im Nassverfahren, andererseits im Trockenverfahren hergestellt werden, ermittelt.

Zur Optimierung der Kennwerte werden Brandversuche aus der Datenbank (vgl. Winter *et al.* [152]) herangezogen, in welchen die Holzfaserplatten direkt dem Brand ausgesetzt waren. Zur Bestimmung der Grundschutzzeiten werden diejenigen Messstellen hinter der Holzfaserplatte aus Versuchen ausgewertet, in welchen das Dämmmaterial ausschließlich mit einer 19 mm dicken Spanplatte hinterlegt ist. Zusätzlich dienen Versuche, in welchen die Holzfaserplatten durch eine Bekleidung oder einen Ständer hinterlegt sind. Bei diesen Versuchen ist durch die beschriebene Hinterlegung ein Fugenbeiwert  $k_{f,i}$  von 1 und ein Positionsbeiwert  $k_{pos,unexp}$  für dahinter liegende Bekleidungen von 1 anzunehmen. Demnach kann die ermittelte Schutzzeit mit der Grundschutzzeit  $t_{prot,0}$  gleichgesetzt werden.

In Abbildung 5.29 wird ersichtlich, dass keine eindeutige Beziehung der Rohdichte zur Grundschutzzeit  $t_{prot,0}$  aller ausgewerteter Daten aus Versuchen mit Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke vorliegt. Dämmstoffplatten größerer Rohdichte weisen zwar bei großen Dämmstoffdicken höhere Grundschutzzeiten auf, bei geringeren Dämmstoffdicken liegen jedoch umgekehrte Verhältnisse vor.

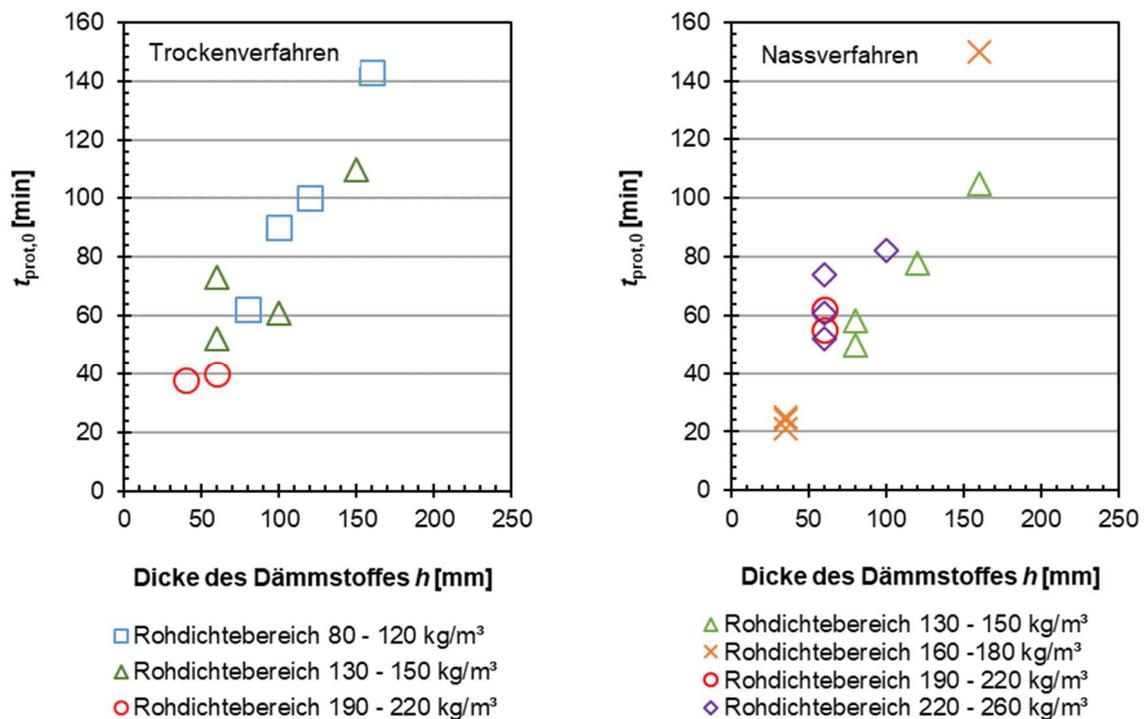


Abbildung 5.29: Gegenüberstellung der roh-dichtebezogenen Grundschutzzeiten für im Trockenverfahren (links) und im Nassverfahren (rechts) hergestellte Holzfaserdämmplatten

Im Weiteren zeigt sich in Abbildung 5.30, dass die Regressionsgeraden aus Trocken- und Nassverfahren nahezu identisch sind. Folglich werden die Kennwerte unabhängig vom Herstellungsverfahren und der Rohdichte für alle Holzfaserplatten erarbeitet. Die Grundlage zur Bestimmung der effektiven Kennwerte für alle Holzfaserplatten bilden die ermittelten Kennwerte für flexible Holzfaserdämmstoffe, wobei eine gemittelte effektive Rohdichte von  $180 \text{ kg/m}^3$  verwendet wird.

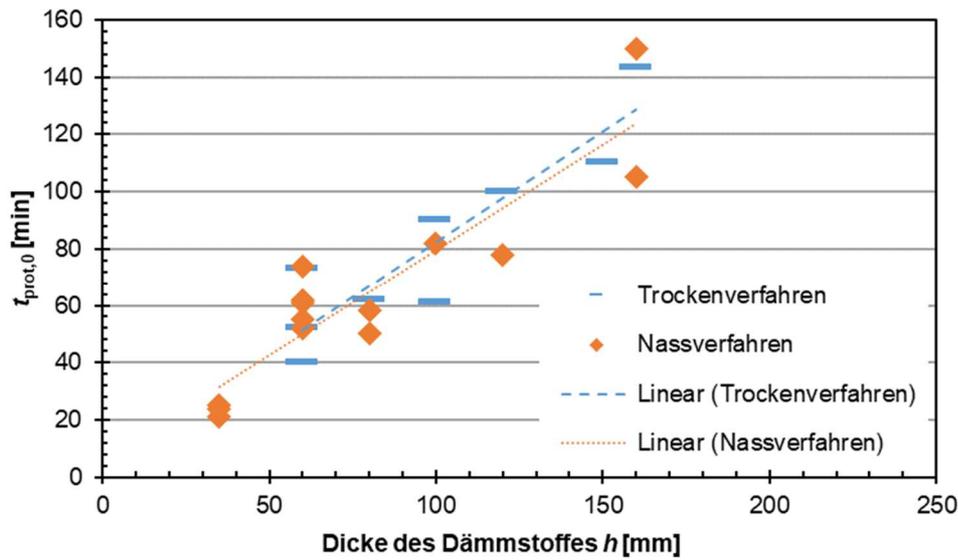


Abbildung 5.30: Grundschatzzeiten von Holzfaserplatten mit entsprechenden Regressionsgerade in Bezug zum Herstellungsverfahren

Unter Nutzung der effektiven Kennwerte der flexiblen Holzfaserdämmstoffe wird nach Anpassung der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei  $80^\circ$  sowie bei  $700^\circ\text{C}$  eine gute Annäherung der Simulationskurven der Holzfaserplatten zu entsprechenden Brandversuchskurven erzielt (vgl. Abbildung 5.31). Die Werte der Wärmeleitfähigkeit werden auch hier dickenabhängig bei  $700^\circ\text{C}$  angepasst, um die Auswirkungen des Schrumpfens des Dämmstoffs berücksichtigen zu können (vgl. Abbildung 5.31). Den berechneten Grundschatzzeiten der Holzfaserplatten ist eine vom Herstellungsverfahren unabhängige Trendlinie in Anlehnung an Abbildung 5.30 zu Grunde gelegt.

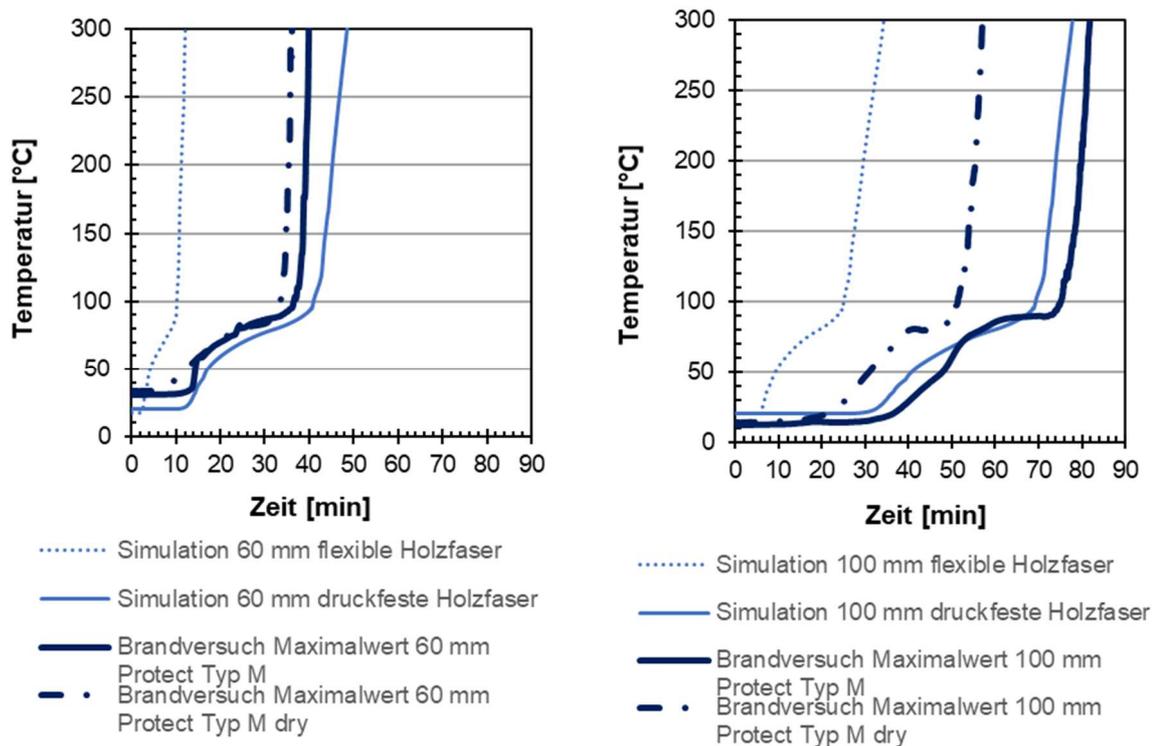


Abbildung 5.31: Vergleich der Grundschutzzeiten von 60 mm bzw. 100mm dicken Holzfaserplatten, die im Trocken- und Nassverfahren hergestellt wurden, mit den Temperatur-Zeit-Kurven aus entsprechenden Simulationen für 60 mm bzw. 100 mm dicke flexible Holzfasermatten und Holzfaserplatten (Trockenverfahren: Protect Typ M dry, Nassverfahren: Protect Typ M)

#### 5.4.3 Effektive Kennwerte für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe

Zusammenfassend werden die in der numerischen FE-Simulation berechneten Temperatur-Zeit-Verläufe der untersuchten Dämmmaterialien für alle üblichen Dämmstoffdicken in Abbildung 5.32 bis Abbildung 5.34 dargestellt und den entsprechend durchgeführten Brandversuchen unter einer Brandbeanspruchung nach Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve gegenübergestellt. Ein Vergleich der dickenabhängigen simulierten Temperatur-Zeit-Kurven von Holzfaserdämmplatten nach Abbildung 5.34 mit entsprechenden Brandversuchen ist nicht möglich, da die vergleichenden Grundschutzzeiten aus allen verfügbaren Brandversuchen unabhängig vom Herstellungsverfahren gemittelt wurden. Für flexible Holzfaser- und Zellsulosedämmstoffe entsprechen die zugehörigen Zeitpunkte der Temperatur-Zeit-Kurven bei ca. 290°C weitestgehend den aus den in Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 ermittelten Grundschutzzeiten, die aus Trendlinien auf Basis von Brandversuchen bestimmt wurden.

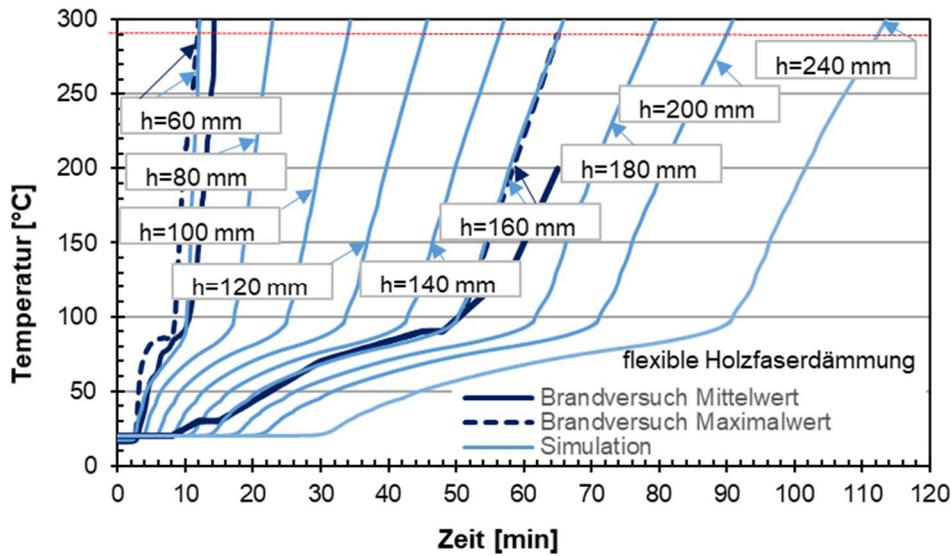


Abbildung 5.32: Simulierte Temperaturverläufe der flexiblen Holzfaserdämmstoffe für Dicken von 60 mm bis 240 mm und Vergleich der gemessenen Mittel- und Maximalwerte aus zugehörigen Brandversuchen für die Dämmstoffdicken von 60 mm und 160 mm mit den Ergebnissen aus der Simulation

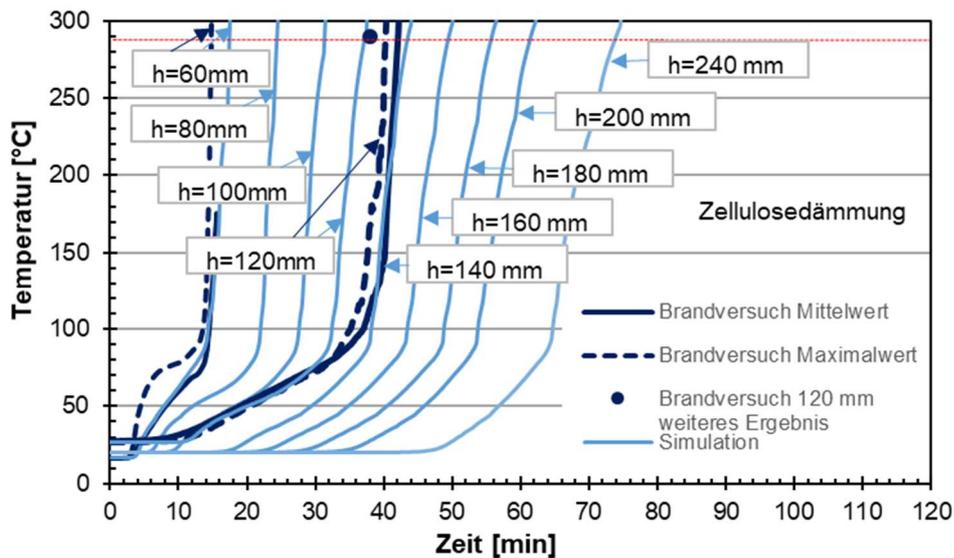


Abbildung 5.33: Simulierte Temperaturverläufe der Zellulosedämmstoffe für Dicken von 60 mm bis 240 mm und Vergleich der gemessenen Mittel- und Maximalwerte aus zugehörigen Brandversuchen für die Dämmstoffdicken von 60 mm und 120 mm mit den Ergebnissen aus der Simulation

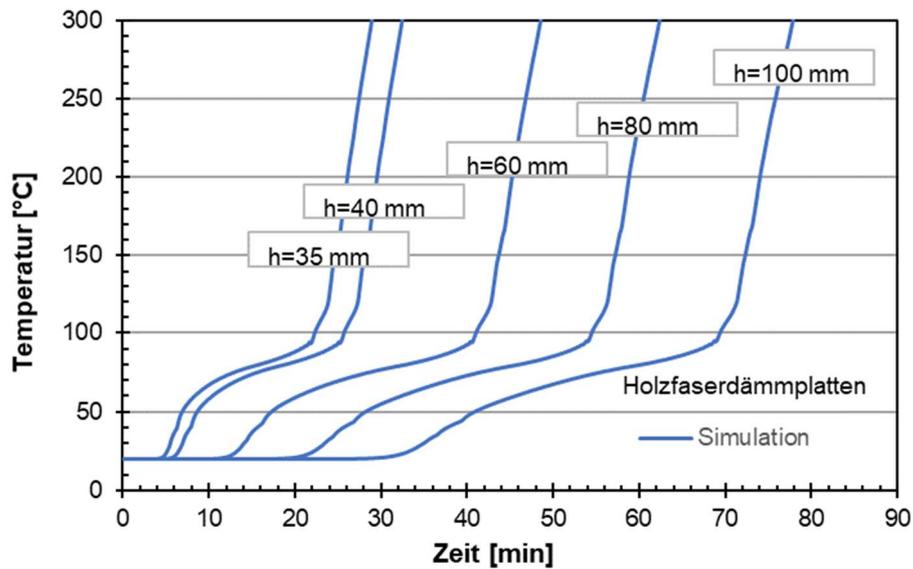


Abbildung 5.34: Simulierte Temperaturverläufe der Holzfaserplatten von 35 mm bis 100 mm

Die in den Berechnungen verwendeten effektiven Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit werden in Tabelle 5-5 bis Tabelle 5-9 aufgelistet. Die effektiven Kennwerte der spezifischen Wärmekapazität sind für flexible Holzfaserplatten und Holzfaserplatten aus Tabelle 5-1 und für Zellulosedämmstoffe aus Tabelle 5-2 zu entnehmen.

Tabelle 5-5: Ermittelte effektive spezifische Wärmeleitfähigkeit für flexible Holzfaserdämmstoffe

Temperatur [°C]	20	50	80	100	110	125
$\lambda$ [W/(mK)]	0,039	0,043	<b>2,76</b>	0,052	0,053	0,056
Temperatur [°C]	180	230	320	500	700	1200
$\lambda$ [W/(mK)]	0,069	<b>0,037</b>	<b>0,059</b>	<b>0,075</b>	*)	<b>8,19</b>

\*) Siehe Tabelle 5-6 für flexible Holzfaserdämmstoffe und Tabelle 5-9 für Holzfaserplatten

Tabelle 5-6: Dickenabhängige spezifische Wärmeleitfähigkeit bei 700°C für flexible Holzfaserdämmstoffe

Dicke [mm]	60	80	100	120	140	160	180	200	240
$\lambda$ [W/(mK)]	20	3,4	1,9	1,28	0,9	0,76	0,43	0,3	0,05

Tabelle 5-7: Ermittelte effektive spezifische Wärmeleitfähigkeit für Zellulosedämmstoffe

Temperatur [°C]	20	50	80	100	110	125
$\lambda$ [W/(mK)]	0,039	0,043	<b>1,45</b>	0,048	0,049	0,052
Temperatur [°C]	200	320	500	680	700	1200
$\lambda$ [W/(mK)]	0,057	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>	*)	<b>15</b>	<b>100</b>

\*) Siehe Tabelle 5-8

Tabelle 5-8: Dickenabhängige Wärmeleitfähigkeit bei 680°C für Zellulosedämmstoffe

Dicke [mm]	60	80	100	120	140	160	180	200	240
$\lambda$ [W/(mK)]	2	0,07	0,034	0,022	0,019	0,016	0,0135	0,012	0,0095

Für Holzfaserplatten (gemäß DIN EN 13171 [42] oder DIN EN 622-4 [59] und DIN EN 13986 [49]) gelten die effektiven Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 5-5 mit Ausnahme der Kennwerte für 80°C und 700°C. Bei 80°C ist der Wert durch 1,4 W/(mK) zu ersetzen und für 700°C sind die dickenabhängigen Werte der Tabelle 5-9 zu entnehmen.

Tabelle 5-9: Dickenabhängige Werte der Wärmeleitfähigkeit bei 700°C für Holzfaserplatten

Dicke [mm]	35	40	60	80	100	160
$\lambda$ [W/(mK)]	0,82	0,75	0,42	0,33	0,19	0,061

Die Verhältnisse von temperaturabhängiger Rohdichte zur Rohdichte unter Raumtemperatur, das hier lediglich den Masseverlust ohne die Berücksichtigung eines veränderlichen Volumens unter Temperatureinfluss widerspiegelt, werden für die flexible Holzfaserdämmung in Tabelle 5-10 und für die Zellulosedämmung in Tabelle 5-11 zusammengefasst. Für die Holzfaserplatten werden näherungsweise die gleichen Verhältnisse der Rohdichte wie für die flexible Holzfaserdämmung verwendet.

Tabelle 5-10: Effektive Kennwerte für das Verhältnis der Rohdichte von flexiblen Holzfaserdämmstoffen

Temperatur [°C]	20	50	80	100	120	200
$\rho/\rho_{20}$ [-]	1,00	0,98	0,96	0,95	0,95	0,9
Temperatur [°C]	300	400	500	600	800	1200
$\rho/\rho_{20}$ [-]	0,58	0,41	0,33	0,31	0,3	0

Tabelle 5-11: Effektive Kennwerte für das Verhältnis der Rohdichte von Zellulosedämmstoffen

Temperatur [°C]	20	50	80	100	120	200
$\rho/\rho_{20}$ [-]	1,00	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95
Temperatur [°C]	300	400	500	600	800	1200
$\rho/\rho_{20}$ [-]	0,76	0,54	0,49	0,46	0,41	0

#### 5.4.4 Gegenüberstellung mit dem Werkstoff Holz

Im Vergleich zu Holz ( $\lambda = 0,12$  W/(mK)) sind die Werte der Wärmeleitfähigkeit unter Raumtemperatur für die untersuchten Materialien aufgrund ihrer Entwurfsidee als Dämmstoff deutlich geringer ( $\lambda = \text{ca. } 0,04$  W/(mK)) – vgl. Tabelle 5-12. Unter steigenden Temperaturen erhöhen sich die Werte jedoch bis etwa 200°C. Materialspezifisch reduziert sich die Wärmeleitfähigkeit während der Pyrolysevorgänge. Um die Zersetzungsvorgänge der Materialien wiedergeben

zu können, werden für die untersuchten Dämmstoffe ab 500°C und für Holz ab 800°C signifikant gesteigerte Werte eingesetzt (vgl. Abbildung 5.35).

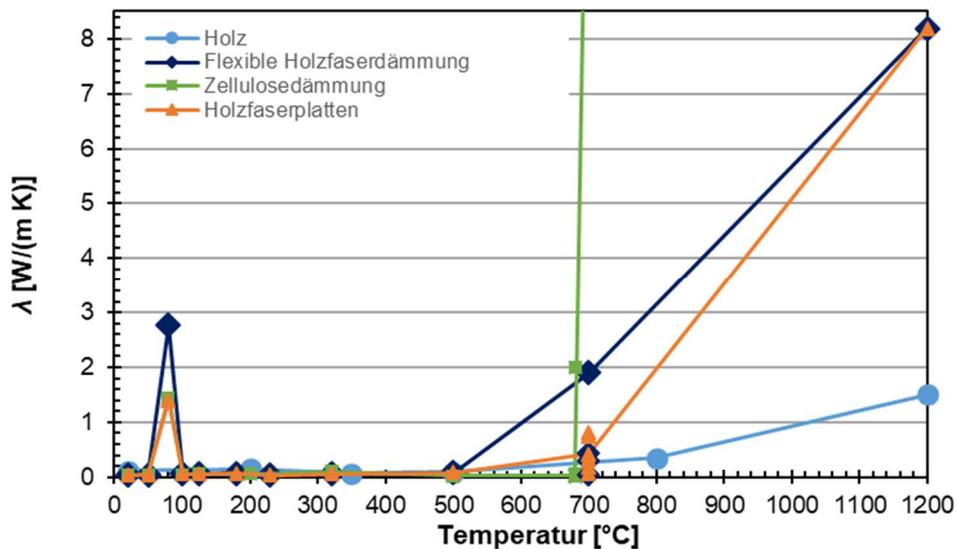


Abbildung 5.35: Gegenüberstellung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten von Holz, flexibler Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose

Tabelle 5-12: Gegenüberstellung der tabellarischen effektiven Wärmeleitfähigkeiten von Holz, flexibler und Holzfaserplatten sowie Zellulose

	Holz [69]	Flexible Holzfaserdämmung	Zellulose	Holzfasерplatte
Temperatur [°C]	λ [W/(mK)]	λ [W/(mK)]	λ [W/(mK)]	λ [W/(mK)]
20	0,12	0,039	0,039	0,039
50	*	0,043	0,043	0,043
80	*	2,76	1,45	1,4
100	*	0,052	0,048	0,052
125	*	0,056	0,052	0,056
180		0,069		0,069
200	0,15		0,057	
230		0,037		0,037
320		0,059	0,1	0,059
350	0,07			
500	0,09	0,075	0,02	0,075
680			***	
700		**	15	****
800	0,35			
1200	1,5	8,19	100	8,19

\*es darf linear interpoliert werden

\*\* Siehe Tabelle 5-6

\*\*\* Siehe Tabelle 5-8

\*\*\*\*Siehe Tabelle 5-9

Entsprechend den in Abschnitt 5.4.1 gewählten Werten der effektiven Wärmekapazität werden für die untersuchten Dämmstoffe das Entweichen von Wasser zwischen 80°C und 100°C sowie die Pyrolyse ab ca. 150° bzw. 200°C bis 500°C berücksichtigt (vgl. Tabelle 5-13). Im Gegensatz dazu wird im Entwurf der EN 1995-1-2 [69] der Pyrolysevorgang bei Holz nicht durch gesteigerte Werte der Wärmekapazität ausgedrückt (siehe Abbildung 5.36), sondern lediglich durch die effektiven Werte der Wärmeleitfähigkeit.

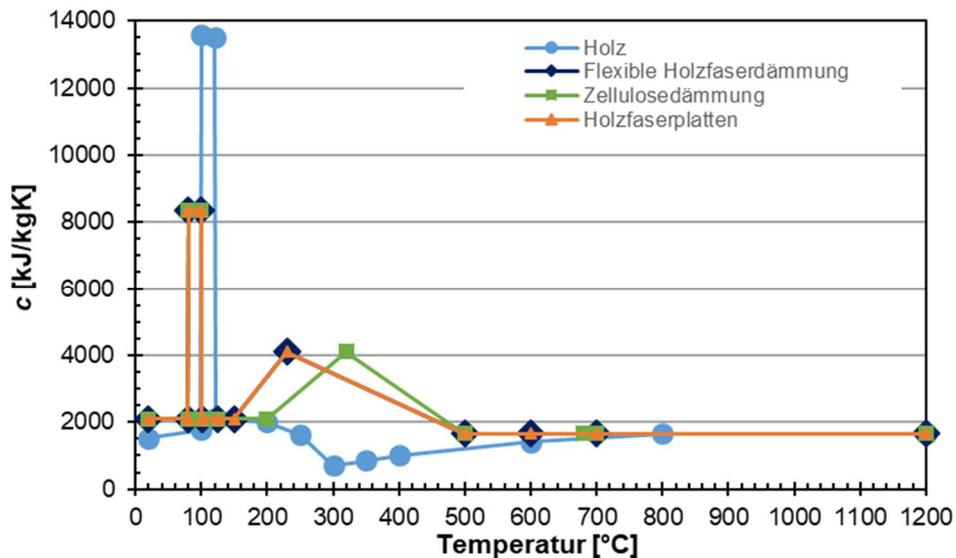


Abbildung 5.36: Gegenüberstellung der effektiven Wärmekapazitäten von Holz, flexibler und Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose

Tabelle 5-13: Gegenüberstellung der tabellarischen effektiven Wärmekapazitäten von Holz, flexibler Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose

Temperatur [°C]	Holz [69] c [J/kgK]	Flexible serdämmung c [J/kgK]	Holzfa- Zellulose c [J/kgK]	Holzfaserplatten c [J/kgK]
20	1530	2100	2100	2100
79		2100	2100	2100
80		8360	8360	8360
99	1770			
100	13600	8360	8360	8360
101		2100	2100	2100
120	13500			
121	2120			
125		2100	2100	2100
150		2100		2100
200	2000		2100	
230		4100		4100
250	1620			
300	0710			
320			4100	
350	0850			
400	1000			
500		1650	1650	1650
600	1400	1650		1650
680			1650	
700		1650	1650	1650
800	1650			
1200	1650	1650	1650	1650

## 6 Numerische Simulation

### 6.1 Grundlagen

Eine analytische Lösung der Fourier'schen Differenzialgleichung (26) gelingt bei Wärmeleitungsvorgängen, in welchen sich die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit oder in mehreren Richtungen ändert, nur noch in wenigen Sonderfällen. Daher werden numerische Lösungen mittels FE-Analysen erarbeitet. Die Untersuchung bestimmter Temperaturkriterien innerhalb einer mehrschichtigen Holzkonstruktion zur Bestimmung der raumabschließenden Funktion dieses Bauteils wird nachfolgend mittels transienten Temperaturfeldberechnungen durch die Simulationssoftware ANSYS ausgeübt. Die zu analysierende instationäre, transiente Wärmeleitung innerhalb des Bauteils wird durch die Fourier'sche Differenzialgleichung ohne Angabe einer Umwandlungsenthalpie nachgebildet. Um chemisch-physikalische Vorgänge wie Rissbildung, Verkohlung oder Massentransporte von Wasser oder Gasen dennoch berücksichtigen zu können, werden dem untersuchten Bauteil schichtweise entsprechende effektive Materialkennwerte zugeordnet (vgl. Abschnitt 5.1).

### 6.2 Modellauswahl

Das innerhalb von ANSYS gewählte Modell zur Nachbildung von Dämmschichten und Bekleidungen mehrschichtiger Holzkonstruktionen wird durch ein zweidimensionales Element des Typs PLANE55 generiert. Durch den zweidimensionalen Aspekt können Hohlräume berücksichtigt werden. Die Auswirkungen von Fugen hingegen werden ausschließlich aufgrund von Brandversuchen beurteilt. Als Temperaturquelle wird einem Umgebungsknoten auf der brandzugewandten Seite des Bauteils zur Nachbildung des Brandes ein Temperaturverlauf gemäß der Einheits-Temperatur-Zeitkurve nach DIN 1991-1-2 [54] zugewiesen. Auf der brandabgewandten Seite wird mithilfe eines weiteren Umgebungsknoten ausgedrückt, dass eine Raumtemperatur von 20°C vorliegt. Zwischen den äußeren Kanten des Modells und den jeweiligen Umgebungsknoten findet der Wärmeaustausch über Strahlung und Konvektion durch das Oberflächenelement SURF151 statt.

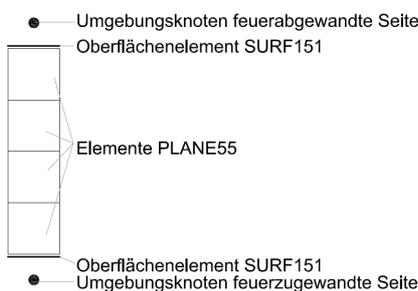


Abbildung 6.1: Gewähltes Finite-Elemente-Modell in ANSYS gemäß Schleifer [120]

Zur Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangs werden als Wärmeübergangskoeffizienten dem Umgebungsknoten auf der brandzugewandten Seite für alle Materialien  $\alpha_{\text{exp}}=25 \text{ W/m}^2\text{K}$

und auf der brandabgewandten Seite  $\alpha_{\text{exp}}=4 \text{ W/m}^2\text{K}$  zugewiesen. Die beiden Werte entsprechen den Empfehlungen gemäß DIN EN 1991-1-2 [54] und liegen Werthers Untersuchungen [149] zufolge für nahezu alle Bauteilbemessungen auf der sicheren Seite.

Der Emissionskoeffizient auf der brandzugewandten Bauteiloberfläche wird gemäß DIN EN 1991-1-2 mit  $\varepsilon = 0,8$  für alle verwendeten Materialien angenommen. Im Weiteren zeigt eine Auswertung von Schleifer [120] für Gips- und Massivholzplatten sehr geringe Unterschiede im Temperatur-Zeit-Verlauf auf der feuerzugewandten Seite und geringe Unterschiede auf der feuerabgewandten Seite des Bauteils bei der Wahl unterschiedlicher Emissionskoeffizienten im Bereich von 0,6 bis 0,9. Im Gegensatz zu Thomas [139] und demzufolge Gerlich [77], die auf der brandabgewandten Bauteiloberfläche einen Emissionskoeffizienten von  $\varepsilon = 0,6$  annehmen, verwendet Schleifer [120]  $\varepsilon = 0,8$ . Begründet wird ihre Wahl durch eine gleiche Aufnahme und Abgabe von Wärmestrahlung gemäß dem Kirchhoff'schen Gesetz unter der Annahme, dass die Emissivität von Luft einen Wert von 1,0 annimmt. In der vorliegenden Arbeit wird ebenfalls ein Emissionskoeffizient von 0,8 auf der brandabgewandten Seite für alle Materialien den numerischen Berechnungen zugrunde gelegt.

Ein Versagen von Bauteilschichten nach bestimmten Temperaturkriterien wird in diesem Modell durch das Entfernen der entsprechenden Schicht realisiert.

Effektive Materialkennwerte, wie die spezifische Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmespeicherkapazität und der Massenverlust werden für OSB-Platten, Massivholz-, Span-, Gips- und Gipsfaserplatten sowie für Stein- und Glaswolle von Schleifer [120] übernommen (vgl. Tabelle A. 1 bis Tabelle A. 3). Die effektiven Materialkennwerte für Holzfaser- und Zellulosedämmstoffe werden gemäß Abschnitt 5.4.3 angewendet.

### 6.3 Ermittlung der Grundzeiten und Beiwerte

Zur Ermittlung der Grundisoliationszeit  $t_{\text{ins},0,i}$  werden dem gewählten Finite-Elemente Modell (vgl. Abschnitt 6.2) die entsprechenden Materialkennwerte des zu untersuchenden Materials zugeordnet. In der vorliegenden Arbeit wird die Grundisoliationszeit ausschließlich für Holzfaserplatten analysiert. Diese werden in der Praxis beispielsweise innerhalb eines Wärmedämmverbundsystems oder als Unterdecke oder als abschließende Schicht einer Wand- oder Deckenkonstruktion eingesetzt wird. Zellulose- und flexible Holzfaserdämmstoffe hingegen bilden in der Regel nicht den Abschluss von Wand- oder Deckenkonstruktionen, sondern werden durch Bekleidungsschichten geschützt. Innerhalb der Untersuchungen der Grundisoliationszeit wurden die in der Praxis verwendeten Dicken der Holzfaserplatten von 35 mm bis 100 mm betrachtet. Das FE-Modell zur Untersuchung der Grundisoliationszeit besteht einzig aus dem zu untersuchenden Material einer bestimmten Dicke. Dabei wird die Zeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur von 160°C auf der brandabgewandten Seite des Materials als Grundisoliationszeit bezeichnet (vgl. Abbildung 6.2 und Abschnitt 2.2).

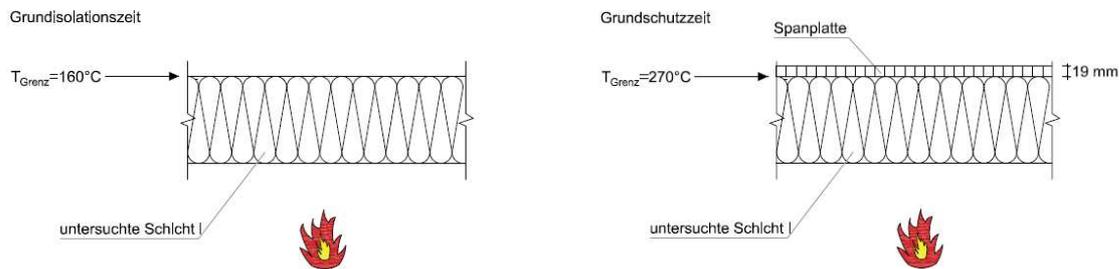


Abbildung 6.2: Modell und zugehörige Grenztemperaturen zur Bestimmung der Grundschutzzeiten gemäß Schleifer [120]

Zur Bestimmung der Grundschutzzeit  $t_{prot,0,i}$  wird ein Finite-Elemente-Modell bestehend aus zwei Materialschichten gewählt. Auf der brandzugewandten Seite wird das zu untersuchende Material in variierender Dicke platziert. Dieses wird durch eine 19 mm dicke Spanplatte hinterlegt (vgl. rechter Teil von Abbildung 6.2), die repräsentativ für sämtliche Schichten auf der brandabgewandten Seite verwendet wird. Dieses Vorgehen in Anlehnung an die Vorgaben zur Brandschutzfunktion K gemäß DIN EN 13501-2 [45] wird aufgrund der nicht existierenden Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion einer schützenden Schicht zur brandabgewandten Seite gewählt. Für Zellulose und flexible Holzfaserdämmstoffe wurden praxisrelevante Dicken von 60 mm bis 240 mm untersucht. Die Holzfaserplatten wurden in Dicken von 35 mm bis 100 mm geprüft. Die Grundschutzzeit wird erreicht, wenn zwischen dem zu untersuchenden Material und der Spanplatte eine Grenztemperatur von  $270^\circ\text{C}$  erreicht wird.

Mittels Positionsbeiwert  $k_{pos,exp}$  wird der Einfluss davorliegender Schichten auf das zu untersuchende Material berücksichtigt. Wie Abbildung 6.3 zeigt, sichern die schützenden Schichten  $i-1$  die zu untersuchende Schicht  $i$  bis zum Erreichen einer Grenztemperatur von  $270^\circ\text{C}$  zwischen den betrachteten Schichten. Im Anschluss fallen die schützenden Schichten bei Erreichen dieser Grenztemperatur im FE-Modell ab. Vor dem Abfallen der schützenden Schicht wird die zu untersuchende Schicht bereits vorewärmt. Nach dem Abfallen der schützenden Schicht beginnt die Isolationszeit  $t_{ins,i}$  bzw. die Schutzzeit  $t_{prot,i}$ , die entsprechend der Vorewärmung im Vergleich zur Grundzeit um den Beiwert  $k_{pos,exp}$  reduziert ist.

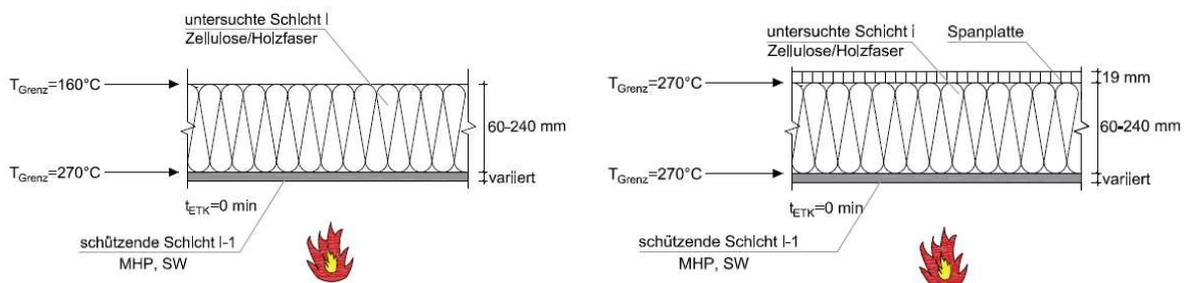


Abbildung 6.3: Einfluss der Vorewärmung durch schützende Schichten gemäß Schleifer [120]

Dividiert man die ermittelte Isolationszeit  $t_{ins,i}$  bzw. die Schutzzeit  $t_{prot,i}$  durch die Grundisolationszeit bzw. die Grundschutzzeit, erhält man den entsprechenden Positionsbeiwert  $k_{pos,exp}$ :

$$k_{\text{pos,exp},i} = \frac{t_{\text{ins},i}}{t_{\text{ins},0,i}} \quad (59)$$

$$k_{\text{pos,exp},i} = \frac{t_{\text{prot},i}}{t_{\text{prot},0,i}} \quad (60)$$

Gemäß Abbildung 6.3 berechnet sich die Isolationszeit  $t_{\text{ins},i}$  nach der Zeit, die ab Simulationsbeginn benötigt wurde, um 160°C auf der brandabgewandten Seite der untersuchten Schicht  $i$  zu erreichen, abzüglich der Zeit, die bis zum Versagen der schützenden Schichten  $i-1$  zwischen der schützenden Schicht und der untersuchten Schicht benötigt wurde. Für die Schutzzeit hingegen wird die Zeit betrachtet, die ab Simulationsbeginn benötigt wurde, um 270°C zwischen der untersuchten Schicht  $i$  und einer dahinterliegenden 19 mm Spanplatte zu erreichen, abzüglich der Zeit, die bis zum Abfallen der schützenden Schichten  $i-1$  bei Erreichen von 270°C zwischen der schützenden Schicht und der untersuchten Schicht benötigt wurde.

Zellulose- und flexible Holzfaserdämmstoffe wurden in den Dicken von 60 mm, 120 mm, 160 mm und 240 mm untersucht. Für die Holzfaserplatten wurden die Dicken 35 mm, 60 mm und 100 mm verwendet. Die untersuchten Dämmstoffe wurden durch Massivholzplatten (MHP) oder Steinwollematten (SW) variierender Dicken geschützt (vgl. Abbildung A. 13, Abbildung A. 14, Abbildung A. 16, Abbildung A. 17, Abbildung A. 20 bis Abbildung A. 23). Bei der Ermittlung von  $t_{\text{prot},i}$  wurden die untersuchten Zellulose- oder Holzfaserdämmungen zusätzlich durch eine 19 mm dicken Spanplatte hinterlegt. Innerhalb der untersuchten Modelle wurden Massivholzplatten mit einer Rohdichte von jeweils  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$  und Dicken von 6 mm, 10 mm, 16 mm, 22 mm, 32 mm und 40 mm als schützende Schichten herangezogen. Bei der Verwendung von Steinwolle als schützende Schicht wurde eine Rohdichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  und Dicken von 40 mm, 60 mm, 100 mm und 160 mm gewählt.

Der Positionsbeiwerte  $k_{\text{pos,unexp}}$  beinhaltet den Einfluss der dahinterliegenden Schichten  $i+1$  auf die untersuchte Schicht  $i$ . Schleifer stellte bei ihren Untersuchungen fest, dass dahinterliegende Schichten aus Massivholzplatten, Spanplatten, OSB-Platten, etc. kaum Einfluss auf die Schutzzeit des davorliegenden untersuchten Materials haben. Dahinterliegende Dämmstoffe hingegen verursachen einen Wärmestau, der eine verminderte Schutzzeit zur Folge hat. Demnach wird zur Untersuchung des Positionsbeiwertes  $k_{\text{pos,unexp}}$  bei variierender Dicke des untersuchten Materials nur eine 60 mm dicke Steinwollendämmung der Rohdichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  verwendet (vgl. Abbildung 6.4). Zellulose- und flexible Holzfaserdämmstoffe wurden in den Dicken von 60 mm bis 240 mm und die Holzfaserplatten in den Dicken von 35 mm bis 100 mm untersucht (vgl. Abbildung A. 15, Abbildung A. 18, Abbildung A. 24).

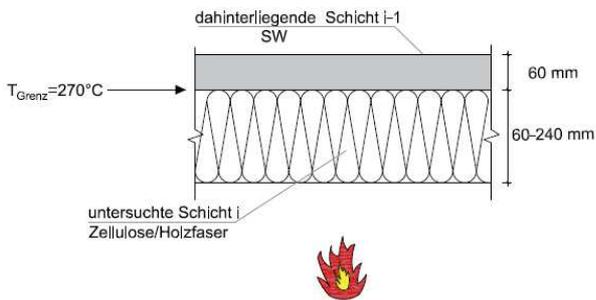


Abbildung 6.4: Einfluss dahinterliegender Dämmstoffe auf das untersuchte Material gemäß Schleifer [120]

Beim Bemessungsmodell nach Schleifer wird das verspätete Abfallen von Gipsfaserplatten und Gipsplatten des Typ F als schützende Schicht  $i-1$  durch die Zeitdifferenz  $\Delta t$  bei der untersuchten Schicht angerechnet. Schleifer geht von einem Abfallen der Gipsfaser- bzw. Gipsplatten des Typ F bei vertikalem Einbau in einer Wandkonstruktion erst nach Erreichen von  $600^\circ\text{C}$  zwischen dieser Gipsplatte und der untersuchten Schicht aus. Bei einem horizontalen Einbau innerhalb einer Deckenkonstruktion wird das Abfallen der Gipsfaser- bzw. Gipsplatten des Typ F bereits nach  $400^\circ\text{C}$  zwischen den betrachteten Schichten angenommen.

Zur Ermittlung der Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird im ersten Schritt (I) der Fall betrachtet, in welchem man von einem Abfallen der Gipsfaserplatte bzw. Gipsplatte des Typ F nach Erreichen der Grenztemperatur von  $270^\circ\text{C}$  ausgeht (vgl. Abbildung 6.5). Hierfür muss die Isolations- bzw. Schutzzeit berechnet werden.

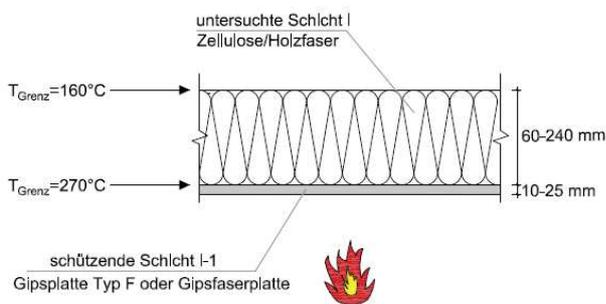


Abbildung 6.5: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose bzw. Holzfasern geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei  $270^\circ\text{C}$  abfallen gemäß Schleifer [120]

Im zweiten Schritt (II) wird die Isolations- bzw. Schutzzeit für den Fall berechnet, in welchem das Abfallen durch Erreichen einer Grenztemperatur von  $600^\circ\text{C}$  für den Einbau in Wänden bzw.  $400^\circ\text{C}$  für den Einbau in Decken ausgelöst wird (vgl. Abbildung 6.6).

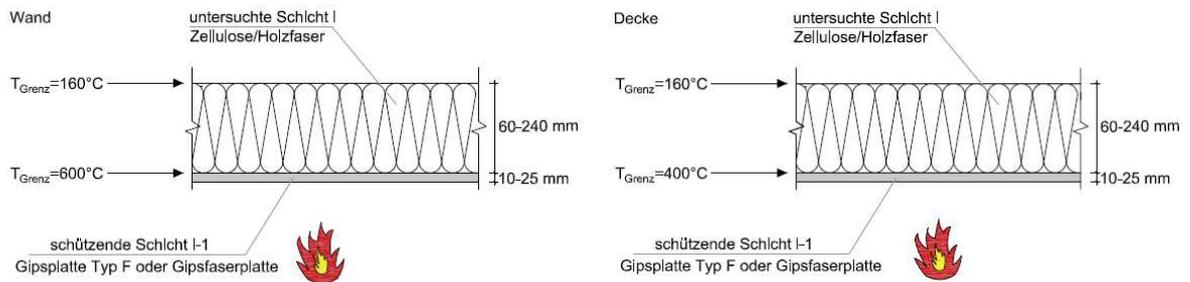


Abbildung 6.6: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose bzw. Holzfasern geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei  $600^\circ\text{C}$  (Bild links) bzw.  $400^\circ\text{C}$  (Bild rechts) abfallen gemäß Schleifer [120]

Zuletzt wird die Zeitdifferenz bestimmt, indem man das Ergebnis aus dem ersten Schritt (I) vom Ergebnis des zweiten Schrittes (II) subtrahiert.

Innerhalb der durchgeführten numerischen Simulationen wurden als schützende Schichten Gipsplatten des Typ F in den Dicken 10 mm, 15 mm und 25 mm herangezogen. Zellulose- und flexible Holzfaserdämmstoffe wurden in den Dicken von 60 mm bis 240 mm und die Holzfasersplatten in den Dicken von 35 mm bis 100 mm untersucht.

## 7 Bemessungsgleichungen für den Raumabschluss

### 7.1 Ergebnisse

#### 7.1.1 Gleichungen

Die Auswertung der Ergebnisse aus den FE-Simulationen nach Abschnitt 6.3 führt zu den Gleichungen der Grundisoliationszeit, der Positionsbeiwerte für die beanspruchte und die unbeanspruchte Seite sowie den Korrekturzeiten bei Verwendung von Gipsfaserplatten und Gipsplatten des Typ F. Die Gleichungen der Grundschutzzeiten wurden im Wesentlichen aus Versuchen (vgl. Brandversuche und Datenbank aus Winter *et al.* [152] und Abbildung A. 1 bis Abbildung A. 12) ermittelt, in welchen durch konstruktive Maßnahmen, ein Herausfallen der Dämmung verhindert wurde. Da die Dämmstoffe im Regelfall in Gefache eingebaut werden und mit einer Bekleidungsplatte abgedeckt sind, werden sie nicht unmittelbar (primär) vom Brand beansprucht. Daher wird keine Grundisoliationszeit angegeben. Die nachfolgenden Gleichungen basieren für Zellulose auf Zelluloseeinblasdämmstoffe und für flexible Holzfaserdämmstoffe auf flexible Holzfasermatten. Die Grundschutzzeiten von Zellulosematten oder Holzfasereinblasdämmung wurden nicht separat ermittelt, da hierfür zusätzliche Brandversuche benötigt würden. Die Ergebnisse aus den entwickelten Gleichungen der Grundschutz- und Grundisoliationszeit weichen durch die verbesserte Ermittlung der effektiven Materialkennwerte nach Abschnitt 5.4.3 um maximal drei Minuten von den Ergebnissen aus den bereits von der Autorin entworfenen Gleichungen in Winter *et al.* [152] ab, die im Entwurf der EN 1995-1-2 [69] aufgenommen wurden. Neben den verbesserten Gleichungen zur Grundschutz- und Grundisoliationszeit, wurden auch die Gleichungen zur Ermittlung der Beiwerte angepasst. Diese unterscheiden sich geringfügig von den Ergebnissen in Winter *et al.*

Tabelle 7-1: Ermittelte Grundschutzzeiten der untersuchten Dämmstoffe

Dämmung	Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0}$ [min]		
Flexible Holzfaser	$t_{\text{prot},0,i} = 0,56 \cdot h_i - 22$	für $40 \text{ mm} \leq h_i \leq 240 \text{ mm}$	(61)
Holzfasерplatte	$t_{\text{prot},0,i} = 0,98 \cdot h_i^{0,95}$	für $35 \text{ mm} \leq h_i \leq 160 \text{ mm}$	(62)
Zellulose	$t_{\text{prot},0,i} = 0,32 \cdot h_i - 0,8$	für $40 \text{ mm} \leq h_i \leq 240 \text{ mm}$	(63)

Tabelle 7-2: Grundisoliationszeit der „isolierenden“ Holzfasерplatten

Dämmung	Grundisoliationszeit $t_{\text{ins},0}$ [min]		
Holzfasерplatte	$t_{\text{ins},0,i} = 0,47 \cdot h_i^{1,09}$	für $35 \text{ mm} \leq h_i \leq 100 \text{ mm}$	(64)

Tabelle 7-3: Positionsbeiwerte für die beanspruchte Seite einer schützenden Schicht

Dämmung	Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite $k_{pos,exp,i}$ [-]	
Flexible Holzfaser	$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 0,95 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,29 \cdot \left( \frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{1,05} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases}$	(65)
Holzfaserplatte	$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 1,05 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,28 \cdot \left( \frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{0,9} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases}$	(66)
Zellulose	$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 0,9 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,27 \cdot \left( \frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{1,1} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases}$	(67)

Tabelle 7-4: Positionsbeiwerte für die beanspruchte Seite einer Isolationsschicht

Dämmung	Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite $k_{pos,exp,i}$ [-]	
Holzfaserplatte	$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{ins,0,i}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{ins,0,i}}{2} \\ 0,28 \cdot \left( \frac{t_{ins,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{0,9} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{ins,0,i}}{2} \end{cases}$	(68)

Tabelle 7-5: Positionsbeiwerte für die unbeanspruchte Seite einer schützenden Schicht

Dämmung	$k_{pos,unexp,i}$ für dahinterliegende Bekleidungen [-]	$k_{pos,unexp,i}$ für dahinterliegende Dämmungen oder Hohlräume ( $\geq 40$ mm) [-]
Flexible Holzfaser	1,0	$k_{pos,unexp,i} = 1,05 \cdot h^{-0,085}$ (69)
Holzfaserplatte	1,0	$k_{pos,unexp,i} = 0,5 \cdot h^{0,125}$ (70)
Zellulose	1,0	$k_{pos,unexp,i} = 0,94 \cdot h^{-0,02}$ (71)

Tabelle 7-6: Korrekturzeiten für Gipsplatten Typ F oder Gipsfaserplatten gemäß Schleifer

Dämmung	Korrekturzeit $\Delta t_i$ [min] ( $\geq 0$ ), sofern eine Gipsplatten Typ F oder Gipsfaserplatten gemäß Schleifer die untersuchte Dämmung schützt	
Flexible Holzfaser	$\Delta t_i = -0,21 \cdot \frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}} + 0,54 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} + 1,16$	Für Deckenkonstruktionen
	$\Delta t_i = -0,98 \cdot \frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}} + 5,62 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} + 4,43$	Für Wandkonstruktionen (72)
Holzfaserplatte	$\Delta t_i = 0,075 \cdot \sum t_{\text{prot},i-1} - 0,027 \cdot t_{\text{prot},0,i} + 0,57$	Für Deckenkonstruktionen
	$\Delta t_i = 0,23 \cdot \sum t_{\text{prot},i-1} - 0,1 \cdot t_{\text{prot},0,i} + 3,55$	Für Wandkonstruktionen (73)
Zellulose	$\Delta t_i = -0,24 \cdot \frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}} + 1,02 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} + 0,77$	Für Deckenkonstruktionen
	$\Delta t_i = -0,89 \cdot \frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}} + 3,88 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} + 2,7$	Für Wandkonstruktionen (74)

Der Fugenbeiwert ist für die untersuchten Dämmstoffe, die durch eine Bekleidung oder einen Dämmstoff hinterlegt sind, mit  $k_{j,i} = 1,0$  anzunehmen. Bei der Verwendung von Holzfaserplatten als isolierende Schicht werden die Fugenbeiwerte für Holzwerkstoffe und Dämmschichten gemäß Schleifer [120] herangezogen. Dabei gilt für die handelsüblichen einfachen Nut-Federbindungen  $k_{j,i} = 0,4$ , für doppelte Nut-Feder-Verbindungen  $k_{j,i} = 0,6$  und für Stufenfalze  $k_{j,i} = 0,3$ , wobei die Überlappung gemäß Schleifer in Abhängigkeit der Fugenausbildung zwischen 15 mm und 30 mm betragen muss und die maximale Fugenbreite einen Wert von 2 mm nicht überschreiten darf.

Zur Berücksichtigung einer erhöhten Schutzzeit von verputzten Holzfaserplatten im Vergleich zu unverputzten Holzfaserplatten, wird eine pauschale Erhöhung der Grundsutzzeit der verputzten Holzfaserplatten bei einem Achsabstand von 625 mm um 25% angenommen. Abbildung 7.1 zeigt unter Berücksichtigung der um den Faktor 1,25 erhöhten Grundsutzzeit für verputzte Holzfaserdämmplatten mit einem Achsabstand von 625 mm und einer Putzdicke von ca. 6-10 mm Ergebnisse für die errechnete Grundsutzzeit, die sich der Soll-Ist-Gerade gut annähern und nur etwas über 10% von den Werten aus Brandversuchen abweichen. In einigen Fällen entsprechen die Grundsutzzeiten aus der Handrechnung nahezu den jeweiligen

Grundschutzzeiten aus den Brandversuchen und liegen direkt auf der Soll-Ist-Gerade. Sofern ein Handrechenergebnis für die Grundschutzzeit über den entsprechenden Wert aus dem jeweiligen Brandversuchen liegt, ist die entwickelte Gleichung für diesen Fall unsicher. Für verputzte Holzfaserplatten mit einem Achsabstand von 835 mm konnte die pauschale Erhöhung von 25% nicht bestätigt werden (vgl. Abweichungen von deutlich über 10% in Abbildung 7.1-rechts), da sich in den Versuchen die Fugen über die Nut-Feder-Verbindungen hinaus öffneten.

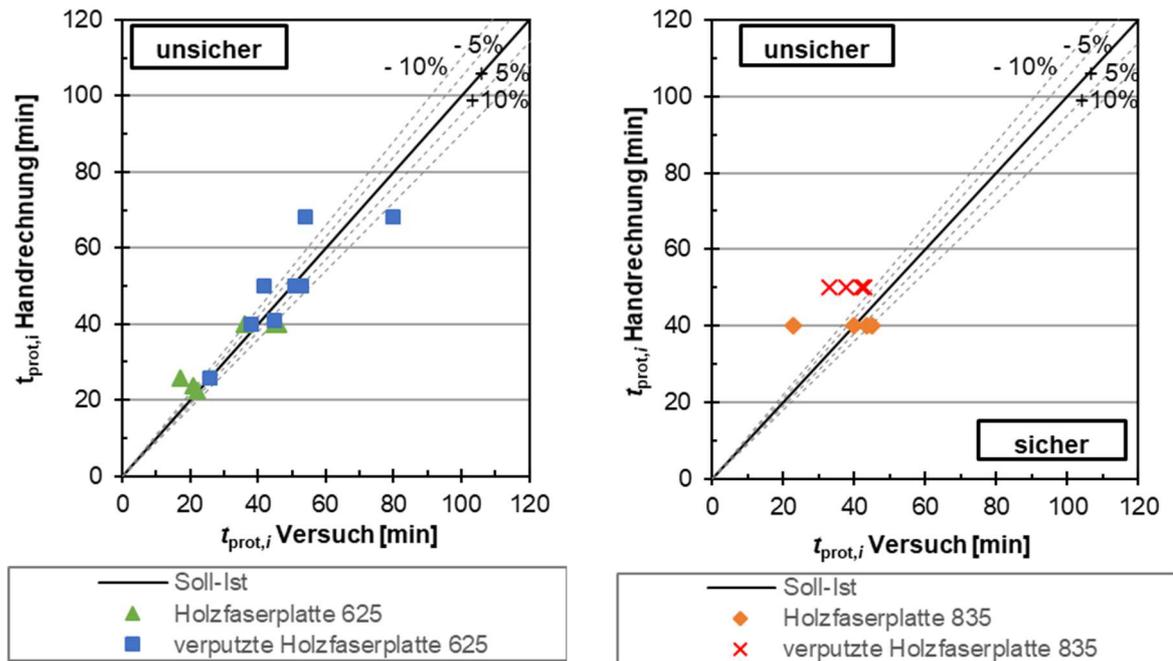


Abbildung 7.1: Berücksichtigung der Putzschicht bei Holzfaserdämmplatten

### 7.1.2 Versagenszeiten

Nach dem Entwurf der EN 1995-1-2 [69] soll überprüft werden, ob die Summe der Schutzzeiten aller vor einer Dämmung liegenden Schichten inklusive der Dämmschicht in Abhängigkeit des Protection Levels der Dämmung innerhalb der vorgegebenen Grenzen nach Gleichung (5) - (7) liegt. Dabei wird die Versagenszeit des *fire protection system* relevant. Dieses System kann aus einer einzelnen Schicht oder einer Kombination aus verschiedenen Materialien bestehen und besitzt die Aufgabe die massiven Holzbauteile zu schützen und die Feuerwiderstandsdauer des gesamten Bauteils zu vergrößern. Zur Bewertung des Beitrags von schützenden Schichten aus Zellulose- oder Holzfaserwerkstoffen zum Raumabschluss werden die Versagenszeiten aller in den ausgewerteten Brandversuchen verwendeten Materialien innerhalb des *fire protection system* relevant.

Bislang ist die Bestimmung der Versagenszeiten auf wenige Materialien wie Gipsplatte, Gipsfaserplatten, Lehmputze, Lehmplatten sowie unter großen Einschränkungen auch OSB-Platten, Spanplatten, Sperrholzplatten, Massivholzplatten und Furnierschichtholzplatten (LVL) (vgl. Abschnitt 2.3). Die Angaben werden durch die Auswertung von Brandversuchen (vgl. Datenbank in Winter *et al.* [152]) um die Versagenszeiten von Holzfaserdämmplatten erweitert.

Die ausgewerteten Großbrandversuche aus der Datenbank mit Holzfaserdämmplatten als dem Feuer direkt zugewandte erste schützende Schicht wurden in Abhängigkeit der Dicke der Holzfaserplatten, dem Vorhandensein einer Putzschicht sowie bezüglich des Achsabstands der Ständer des betrachteten Bauteils kategorisiert. Außerdem wurden die Art der Befestigungsmittel sowie deren Abstände und die Ausführung der Fugen in der Analyse berücksichtigt. Als Befestigungsmittel wurden überwiegend Breitrückensklammern nach DIN EN 14592 [50] eingesetzt. Nur in zwei Versuchen kamen Holzschrauben mit Haltetellern zum Einsatz. Die Klammerlänge wurde einheitlich gemäß der jeweiligen Dicken der Holzfaserplatten zwischen 75 mm und 120 mm gewählt. Die Achsabstände zwischen den Klammern bei einem Achsabstand der Ständer von 625 mm variieren zwischen 100 mm und 200 mm, wobei am häufigsten 150 mm gewählt wurden. Bei größeren Achsabständen der Ständer (833 mm - 835 mm) lag der gewählte Abstand zwischen den Befestigungsmitteln zwischen 100 mm und 150 mm. Die Holzfaserplatten wurden in der Regel durch eine einfache Nut-Feder-Verbindung miteinander verbunden, wobei in zwei Versuchen auch ein einfacher Stufenfalz zur Anwendung kam. Bei den Nut-Feder-Verbindungen variierte die Tiefe der Nut zwischen 15 mm und 30 mm und die Dicke der Nut zwischen 13 mm und 35 mm. Die Tiefe der Stufenfalze lag zwischen 18 mm und 30 mm. Es konnte weder ein deutlicher Einfluss der Fugengeometrie noch der Verbindungsmittel auf die Versagenszeiten zugeordnet werden.

Die ermittelten Versagenszeiten entsprechen den Versuchsbeobachtungen zum Abfallen von Plattenteilen.

Tabelle 7-7: Versagenszeiten von Holzfaserplatten

Zeile	Achsabstand der Ständer [mm]	Plattendicke [mm]	Putzschicht [mm]	Zeitfenster des Versagens [min]	Anzahl der Versuche
1	625	35	-	20-22	2
2	625	40	-	23,5-39	2
3	625	60	-	65-72	7
4	625	60	5-8	60-65	7
5	625	80	6-10	89-99	2
6	835	60	-	37-51	3
7	835	60	6-7	47-54	3

Die in Tabelle 7-7 erfassten Versagenszeiten weisen innerhalb einer Zeile mit gleicher Plattendicke, gleichem Achsabstand der Ständer und dem Vorhandensein einer Putzschicht zum Teil Unterschiede von über 10 Minuten auf (Zeilen 2, 5 und 6). Bei der Auswertung von 60 mm dicken, unverputzten Holzfaserplatten (Zeile 3) wurden bei 5 Versuchen der gleiche Typ (in Bezug auf Rohdichte und Hersteller) an Holzfaserplatte untersucht, wobei hier Versagenszeiten zwischen 65 min und 72 min auftraten. In Zeile 2 sind die großen Unterschiede möglicherweise auf die verschiedenen Rohdichten der Platten zurückzuführen. Dabei wies eine Platte der Rohdichte von ca. 140 kg/m<sup>3</sup> ein Versagen nach ca. 23,5 min auf wohingegen eine Platte der Rohdichte von 200 kg/m<sup>3</sup> erst nach 39 min versagte. Diese Tendenz in Abhängigkeit der Rohdichte zeigt sich auch bei verputzten 60 mm dicken Holzfaserplatten (Zeile 4). Platten unterschiedlicher Hersteller mit Rohdichten von ca. 190 kg/m<sup>3</sup> zeigen ein Versagen nach 60 min, bei einer Rohdichte von ca. 250 kg/m<sup>3</sup> erst nach ca. 65 min. Die Unterschiede bei 80 mm dicken, verputzten Holzfaserplatten (Zeile 5) sind hingegen nicht auf signifikante Abweichungen in der Rohdichte ( $\Delta < 10 \text{ kg/m}^3$ ) zurückzuführen, sondern lediglich im Herstellungsverfahren (Nass- oder Trockenverfahren) zu suchen. Bei der Verwendung von 60 mm dicken unverputzten Holzfaserplatten bei einem Ständerabstand von 835 mm (Zeile 6) tritt das Versagen unter Verwendung einer Platte der Rohdichte von 140 kg/m<sup>3</sup> nach 37 min ein, wohingegen die Platte der Rohdichte von ca. 180 kg/m<sup>3</sup> ein Versagen nach 51 min aufzeigt. Die Platte der Rohdichte von 200 kg/m<sup>3</sup> versagt dagegen bereits nach 42 min. Die in diesen drei Versuchen verwendeten Platten stammen aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren. In Zeile 7 treten die Versagenszeiten von 47 min und 54 min unter Verwendung des gleichen Plattentyps auf.

Um einen Zusammenhang der Versagenszeiten in Bezug zur Rohdichte analysieren zu können, werden diese in Tabelle 7-8 aufgegliedert. Aufgrund der eingeschränkten verfügbaren Datenmenge kann weder ein Trend in Abhängigkeit der Plattendicken identifiziert werden, noch eine eindeutige Rohdichteabhängigkeit nachgewiesen werden.

Tabelle 7-8: Versagenszeiten der Holzfaserplatte in Abhängigkeit der Rohdichte

Achsabstand der Ständer [mm]	Plattendicke [mm]	Putzschicht [mm]	Versagenszeit [min]			
			Rohdichte ca. 140 kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte ca. 180 kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte ca. 200 kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte ca. 250 kg/m <sup>3</sup>
625	35	-		21		
625	40	-	23,5		39	
625	60	-		68		
625	60	5-8		60		65
625	80	6-10			94	
835	60	-	37	51	42	
835	60	6-7			50,5	50

Als verwendbare Versagenszeit einer Holzfaserdämmplatten innerhalb des Berechnungsverfahrens wird derzeit die Auswahl der geringsten Versagenszeit in Abhängigkeit des Achsabstands der Ständer und der Plattendicke der Holzfaserplatte entsprechend Tabelle 7-7 unabhängig vom Vorhandensein einer Putzschicht und von der tatsächlichen Rohdichte empfohlen.

Gemäß dem Entwurf der EN 1995-1-2 [69] werden Holzfaserdämmplatten und Zellulosedämmstoffe dem *Protection Level 2* zugeordnet, sofern durch Versuche keine andere Zuweisung nachgewiesen werden kann. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass bei der Berechnung des Versagens für beide Dämmstoffarten eine Rückzugsgeschwindigkeit von etwa 14 mm/min vorliegt. Versuche von Winter *et al.* [152] zeigen jedoch, dass die Einblaszellulose durchaus auch dem *Protection Level 1* zugeordnet werden kann und über eine Rückzugsgeschwindigkeit von nur etwa 3 mm/min bei Wandkonstruktionen verfügen kann. Die Rückzugsgeschwindigkeit von Holzfaserdämmplatten wurde innerhalb dieser Versuche bei Deckenkonstruktionen mit ca. 16 mm/min bestimmt, wobei die Holzfaserdämmung durch konstruktive Maßnahmen (hier Metallzaun 6 Eck-Geflecht) am Herausfallen gehindert wurde. Sofern kein Schutz gegen Herabfallen vorlag, fiel die Dämmung direkt nach Abfallen der voranliegenden Gipsplatte ab. Bei Versuchen, in welchen der Einfluss des Eigengewichts der Dämmung durch einen liegenden Prüfkörper verhindert wurde, wurden für die Dämmstoffe eine Rückzugsgeschwindigkeit von 2 mm/min (Zellulose) bzw. 3,5 mm/min (flexible Holzfaserplatte) ermittelt. Demnach lässt sich erkennen, dass die Ausrichtung des Bauteils einen erheblichen Einfluss auf die Rückzugsgeschwindigkeit besitzt.

## 7.2 Validierung und Berücksichtigung des Schrumpfens

Die verwendeten effektiven Materialkennwerte zur Bestimmung der Gleichungen aus Abschnitt 7.1 basieren auf Versuchen, in welchen durch konstruktive Maßnahmen das Herausfallen der Dämmung verhindert wurde. Ein Hinterströmen von Heißgasen über die Flanken durch den Rückzug der Dämmung infolge der Temperatureinwirkung konnte dennoch nicht verhindert werden. Demzufolge sind der Rückzug der Dämmung und die zum Teil einhergehende Temperaturerhöhung auf der Rückseite der Dämmschicht in den Gleichungen berücksichtigt. Die Gleichungen bilden den Fall ab, dass ein Herausfallen der Dämmung vor Erreichen der 270°C auf der Rückseite verhindert wird.

In der Praxis wird auf zusätzliche konstruktive Maßnahmen verzichtet, um das Herausfallen einer Gefachdämmung infolge des Rückzugs an den Flanken zu verhindern. Um diesen Fall Rechnung zu tragen, muss die Betrachtung des Wärmedurchgangs bis zum Erreichen von 270°C auf der Rückseite der Dämmung (entspricht  $\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k}$  nach Gleichung (6) aus Abschnitt 2.3) gemäß dem Modell von Schleifer [120] mit dem tatsächliche Versagen der schützenden Schichten inklusive dem Herabfallen der Dämmung nach Gleichung (6) verglichen werden.

In den weiterführenden Betrachtungen entsprechen die Versagenszeiten  $t_{f,pr}$  von Gipsplatten den errechneten Versagenszeiten gemäß dem Entwurf des 2 nd Draft der EN 1995-1-2 [66].

Sofern keine Gleichungen vorlagen, wurden Annahmen getroffen, die dem Abfallen der Gipskarton- oder Gipsfaserplatten aus Versuchsbeobachtungen entsprechen.

Über dies hinaus werden auch die Versagenszeiten von OSB, Spanplatten, etc. berücksichtigt. Diese werden vorwiegend den Prüfberichten entnommen und entsprechen annähernd ihrer errechneten Schutzzeit ( $t_{\text{prot},i} \approx t_{\text{f,pr}}$ ). Die Versagenszeiten von Holzfaserplatten durch das Herabfallen von Plattenteilen werden ebenfalls direkt den Versuchsbeobachtungen aus Prüfprotokollen entnommen.

Zur Bestimmung der Versagenszeit der Dämmung, die vereinfacht für Decken und Wände sowie für alle Spannweiten durch den Quotienten der Dämmstoffhöhe zur Rückzugsgeschwindigkeit berechnet wird, wird im Weiteren eine pauschale Rückzugsgeschwindigkeit von 14 mm/min für Zellulose- und Holzfaserdämmungen gemäß dem Vorschlag des Entwurfes der EN 1995-1-2 angenommen.

Im Folgenden werden die berechneten Schutzzeiten der untersuchten Dämmstoffe nach dem Modell von Schleifer mit dem weiterentwickelten Rechenverfahren auf Grundlage des Entwurfes der EN 1995-1-2 (Draft 2) miteinander verglichen. Abweichend vom Entwurf des 2nd Draft der EN 1995-1-2 [66] wurden die Schutzzeiten mehrlagiger Gipskartonplatten oder Gipsfaserplatten nicht mit einer reduzierten Gesamtdicke berücksichtigt, sondern für jede Schicht einzeln, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Dicke, berechnet.

Den Ergebnissen aus dem Modell nach Schleifer liegen die in Abschnitt 7.1 vorgestellten Gleichungen für Zelluloseeinblasdämmstoffe, flexible Holzfaserplatten und Holzfaserplatten zugrunde. Für das weiterentwickelte Rechenverfahren wurden ebenfalls diese Gleichungen herangezogen. Anstatt die Korrekturzeiten für voranliegende Gipsfaserplatten und Gipsplatten des Typ F nach Tabelle 7-6 zu verwenden, wurden hier die Korrekturzeiten bei voranliegenden Gipsplatten nach Gleichung (8) bis (16) aus Abschnitt 2.3 gemäß dem Entwurf der EN 1995-1-2 errechnet. Zusätzlich wurde beim weiterentwickelten Rechenverfahren das Versagen der Schichten vor einer Dämmung inklusive der Dämmung nach Gleichung (6) aus Abschnitt 2.3 untersucht. Die errechneten Ergebnisse werden mit den Versuchsbeobachtungen und Temperatur-Zeit-Kurven aller verfügbaren und auswertbaren Prüfprotokolle aus Großbrandversuchen der Datenbank verglichen. Dabei werden auch Versuche mit Zellulosematten und Holzfasereinblasdämmstoffen betrachtet.

Für die bestimmten Schutzzeiten der untersuchten Dämmstoffe sind deutliche Unterschiede durch die Anwendung der beiden Rechenmodelle zu erkennen (vgl. Abbildung 7.2, Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4).

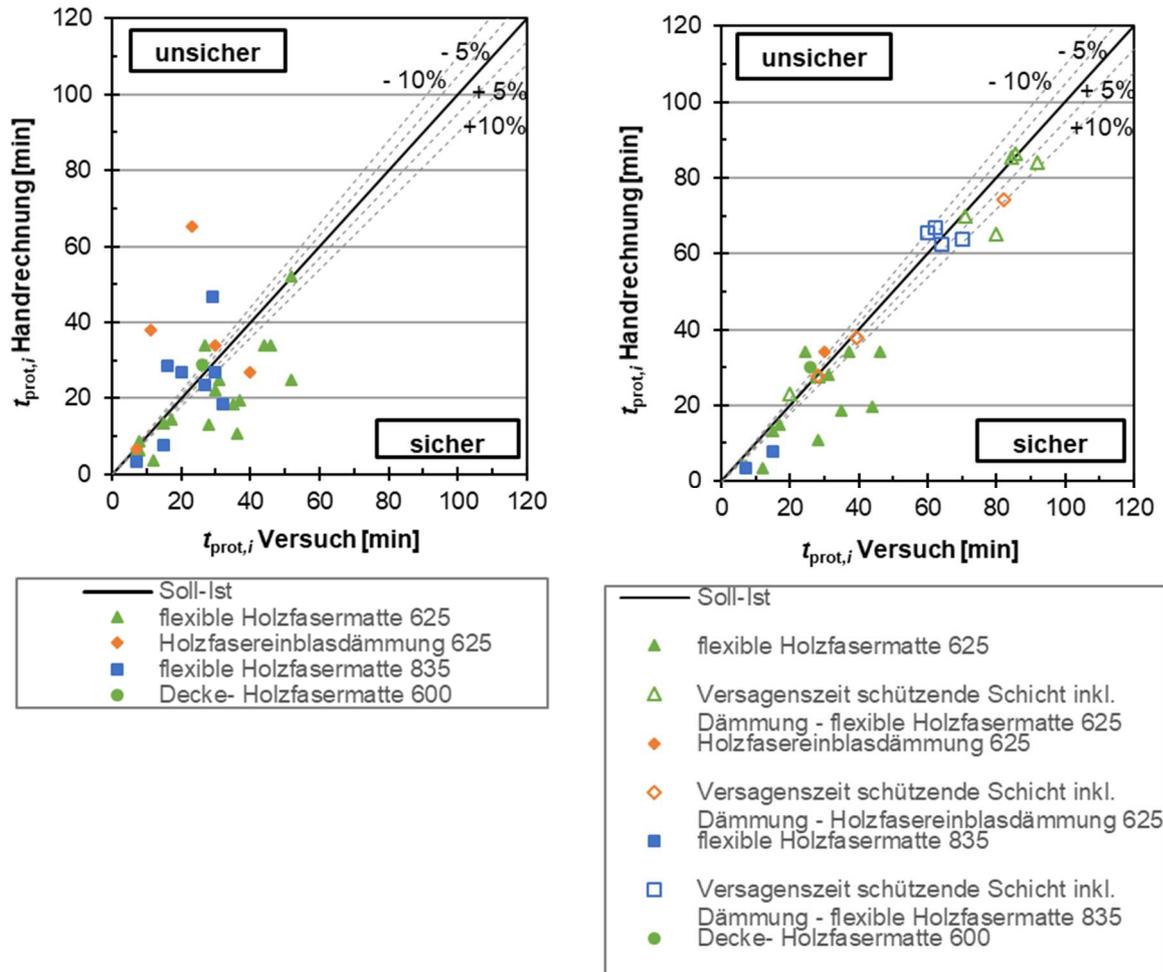


Abbildung 7.2: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der flexiblen Holzfaserdämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahren gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

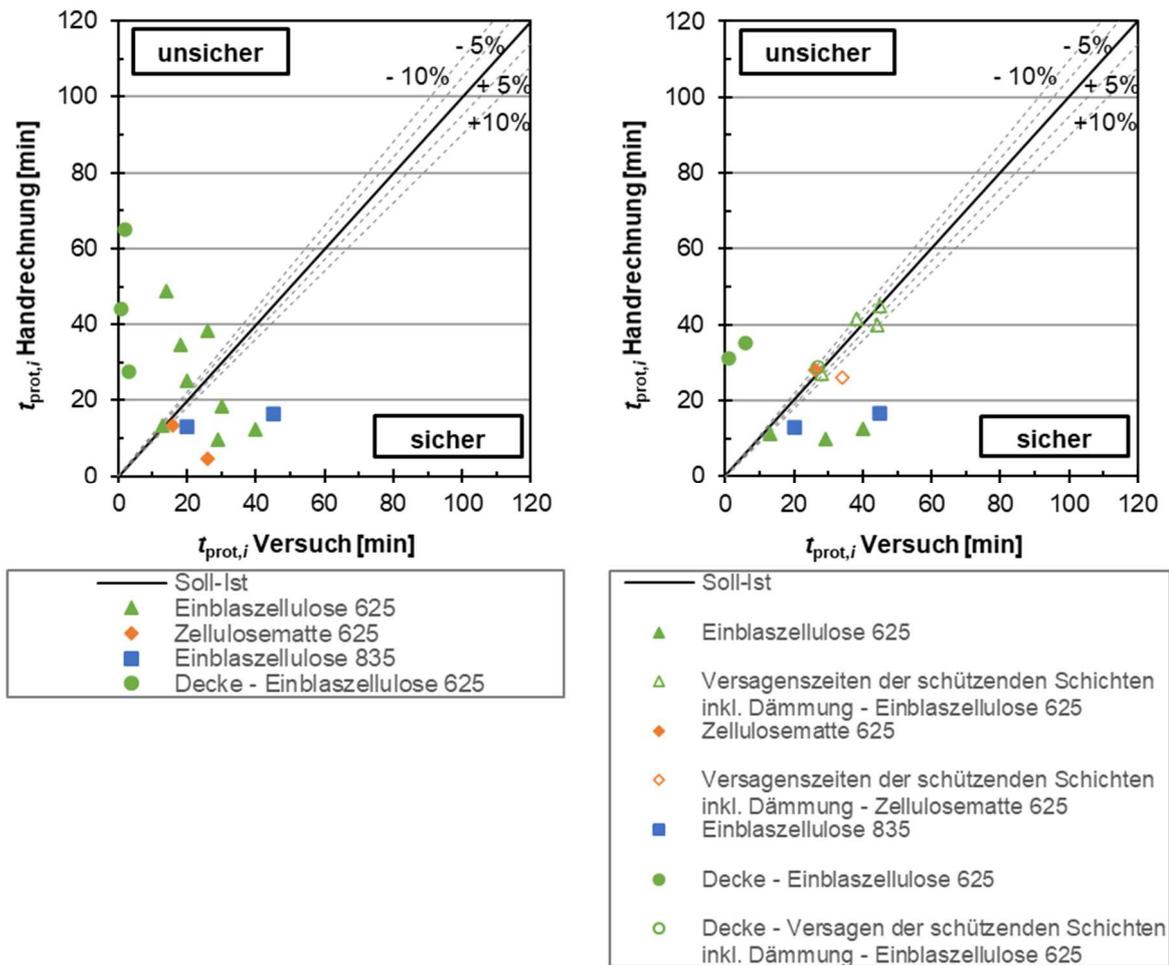


Abbildung 7.3: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

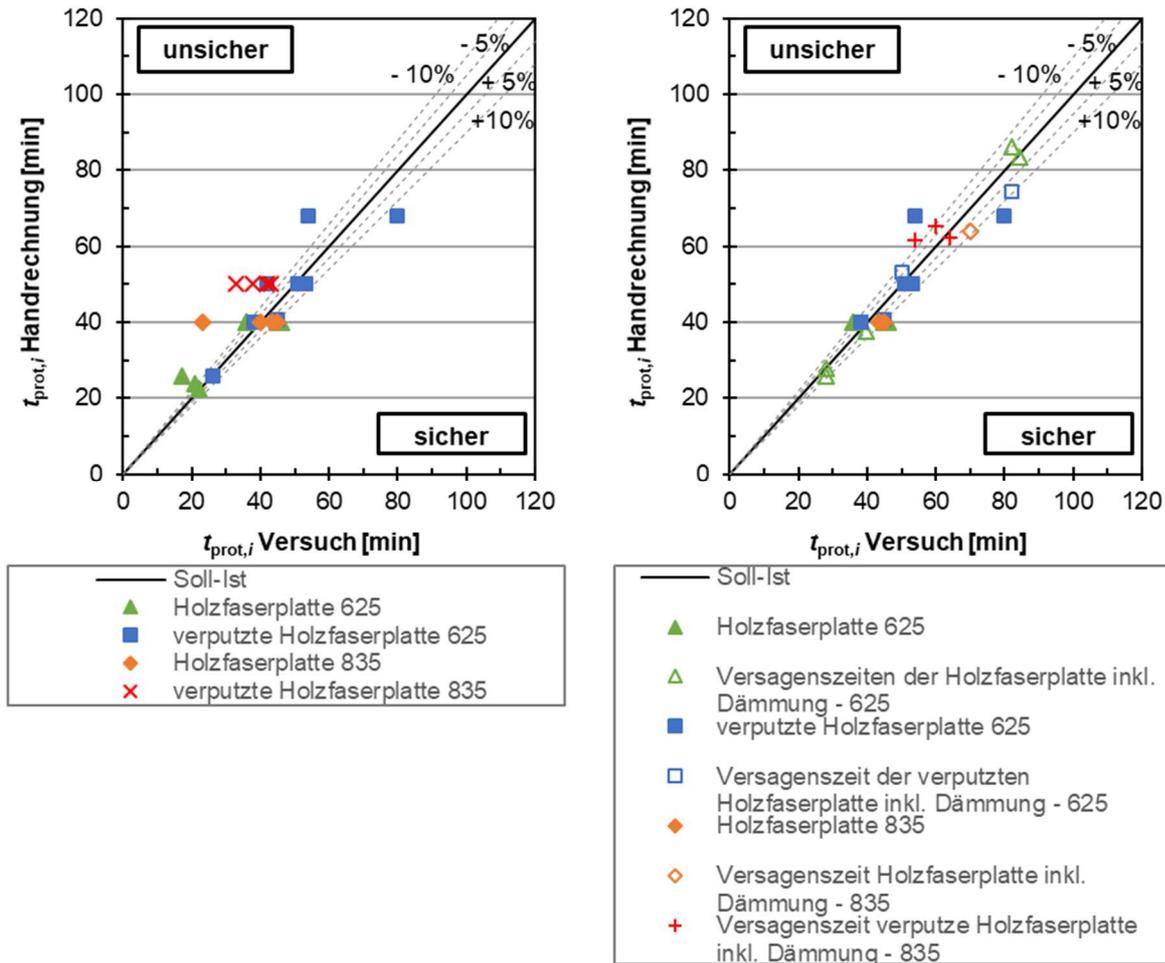


Abbildung 7.4: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Holzfaserplatten aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

Die Gegenüberstellungen zeigen, dass die ermittelten Gleichungen im Rechenmodell nach Schleifer oftmals zu einer errechneten Schutzzeit der untersuchten Dämmung führen, die auf der unsicheren Seite (oberhalb der Soll-Ist-Gerade) liegt. Eine Berücksichtigung des Versagens der schützenden Schichten inklusive der Dämmung sowie die veränderten Korrekturzeiten bei Vorliegen von Gipsplatten als schützende Schichten nach dem weiterentwickelten Rechenverfahren führen zu deutlich veränderten Schutzzeiten, die mehrheitlich auf der sicheren Seite liegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch für Zelluloseeinblasdämmstoffe die Einordnung in das *Protection Level 2* mit einer Rückzugsgeschwindigkeit von 14 mm/min angenommen wurde. Eine Einordnung in das *Protection Level 1* würde auf Basis von Gleichung (5) oder unter Berücksichtigung der Gleichung (6) mit einer Rückzugsgeschwindigkeit von 3 mm/min nicht den in Versuchen beobachteten Zeitpunkten eines vorzeitigen Versagens der schützenden Schichten inklusive Dämmung entsprechen, sondern ein deutlich verspätetes Abfallen der Dämmung abbilden. Dies hätte in allen betrachteten Fällen zur Folge, dass die

Summe der errechneten Schutzzeiten aus schützenden Schichten und Dämmung gemäß Gleichung (5) angesetzt werden müsste, anstelle der Zeitdauer bis zum Herabfallen der Dämmung. Die Ergebnisse für die errechnete Schutzzeit der Zellulosedämmung und die Isolationszeit des zugehörigen Elements würden folglich deutlich auf der unsicheren Seite liegen.

Die größere Streuung in den Versuchsergebnissen für Zellulose ist auf unterschiedliche Einblasqualitäten zurückzuführen.

Bei Decken wird das Versagen des Dämmstoffes, das durch den Quotienten aus Dämmstoffdicke zur Rückzugsgeschwindigkeit ausgedrückt wird, mit einer einheitlichen Rückzugsgeschwindigkeit von 14 mm/min nicht ausreichend berücksichtigt (vgl. Abbildung 7.2). Zusätzlich kann infrage gestellt werden, ob unter Einwirkung des Eigengewichts die gesamte Dämmstoffdicke zur Berechnung des Versagens herangezogen werden sollte. Alternativ könnte in Abhängigkeit des Achsabstandes sowie des Eigengewichtes des Dämmstoffes eine Mindesteinspannhöhe entlang der Längsseite des Holzrahmens maßgebend werden. Bei sehr kurzer Vorerwärmung der Dämmung in einer Decke, z.B. durch eine Lage OSB, führt das errechnete Versagen der schützenden Schicht inklusive des errechneten Versagens der Dämmung unter Berücksichtigung der gesamten Dämmstoffdicke sowie der pauschalen Rückzugsgeschwindigkeit von 14 mm/min zu ähnlichen Schutzzeiten wie im Versuch. Falls jedoch eine lange Vorerwärmungsdauer vorliegt, beispielsweise durch mehrere Gipsplatten als schützende Schichten, die verhältnismäßig spät versagen, fällt die Dämmung knapp nach dem Abfallen der Gipsplatten herab. Der Quotient aus der Höhe der Dämmung zur Rückzugsgeschwindigkeit ist für einen solchen Fall nahezu null.

Da derzeit weder ausreichend auswertbare Versuchsergebnisse zur Ermittlung der eigentlichen Versagenszeit der Dämmung in Decken noch der Rückzugsgeschwindigkeit von Dämmstoffen in Abhängigkeit der Vorerwärmungsdauer vorliegen, soll angenommen werden, dass der Quotient aus der Höhe der Dämmung zur Rückzugsgeschwindigkeit für Decken null sei. Auf Grundlage dieser Annahme liegen alle Deckenversuche auf der Soll-Ist Gerade oder auf der sicheren Seite (vgl. Abbildung 7.5).

Die betrachteten Versuche mit Holzfasereinblaszellulose sowie Zellulosematten wurden mit den ermittelten Gleichungen unter Berücksichtigung des erweiterten Rechenmodells ebenfalls sehr gut abgebildet.

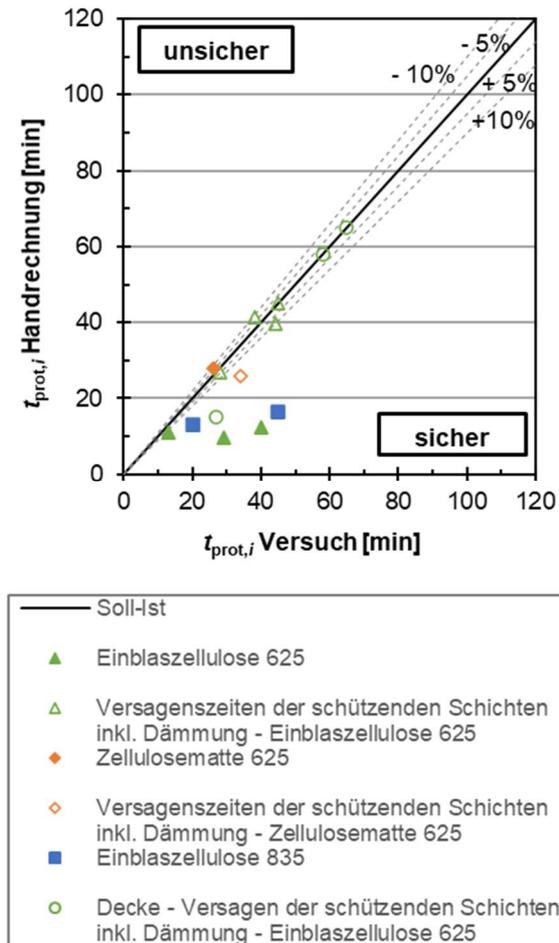


Abbildung 7.5: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten unter Berücksichtigung eines sofortigen Herausfallens der Dämmung in Decken nach Versagen der Schutzbekleidung

Auch die berechnete Isolationszeit des gesamten Bauteils nach dem Schleifer-Berechnungsmodell führt bei Bauteilen mit Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen häufig zu unsicheren Ergebnissen. Im Gegenzug liefert das weiterentwickelte Rechenverfahren eine hinreichende Übereinstimmung der errechneten Isolationszeit mit der Isolationszeit aus den Versuchen (vgl. Abbildung 7.6, Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8). Unter Berücksichtigung der Annahme, dass der Quotient aus der Höhe der Dämmung zur Rückzugsgeschwindigkeit für Decken mit Zellulose- und Holzfaserdämmungen null sei, sind auch alle auswertbaren Deckenversuche auf der sicheren Seite.

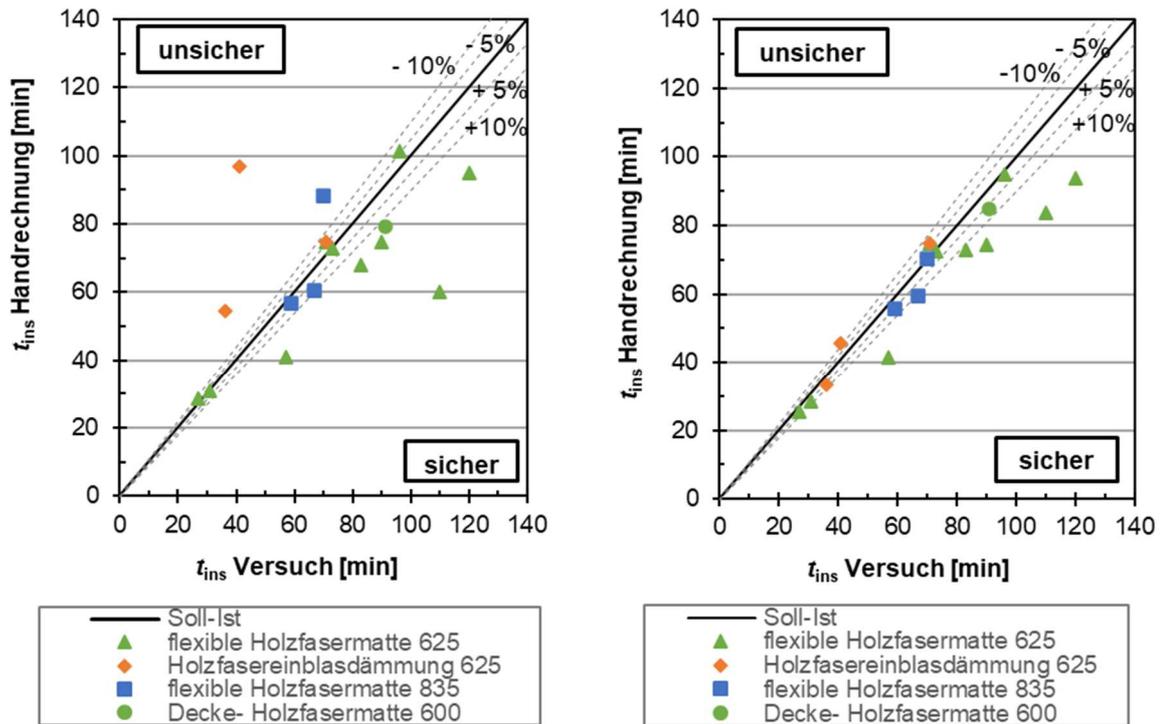


Abbildung 7.6: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten (=  $t_{ins}$ ) aus Konstruktionen mit Holzfaserdämmstoffen aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

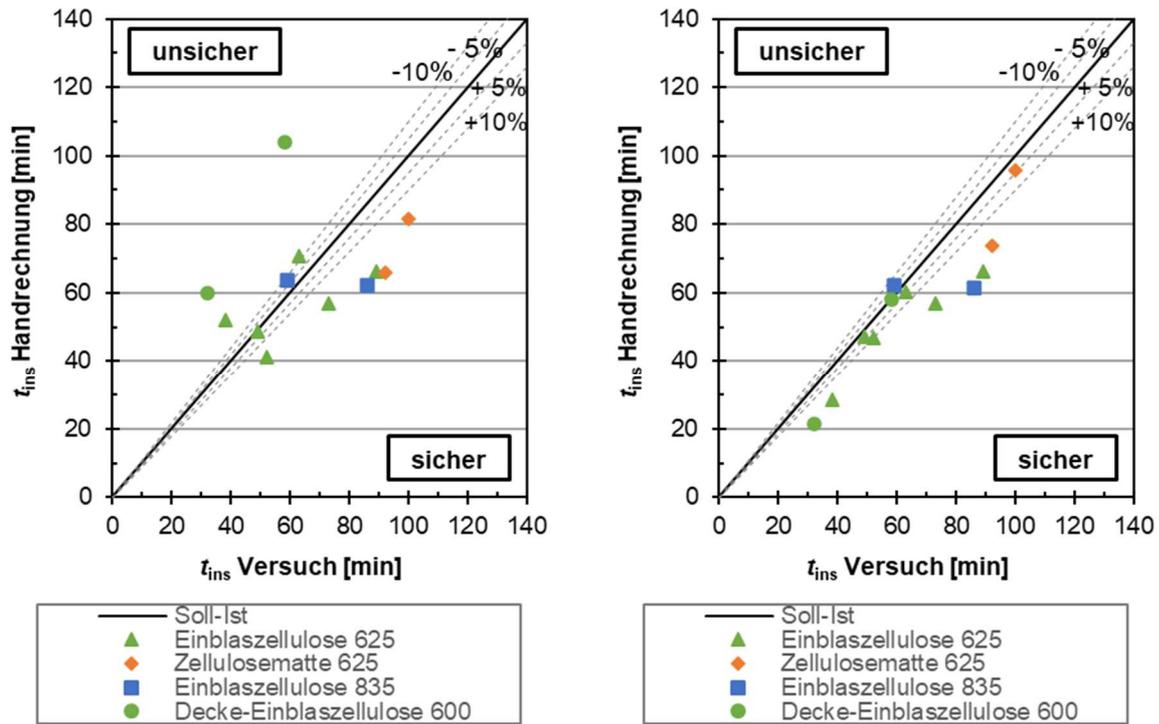


Abbildung 7.7: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $=t_{ins}$ ) aus Konstruktionen mit Zellosedämmstoffen aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

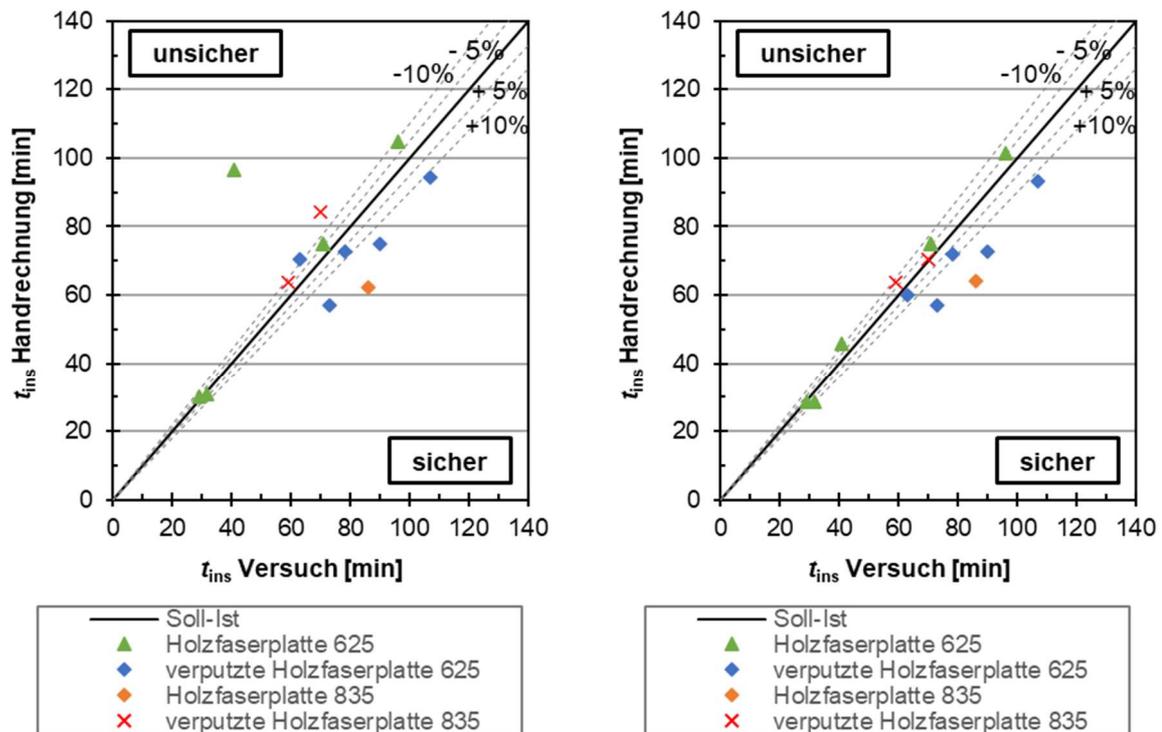


Abbildung 7.8: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $=t_{ins}$  Isolationszeit) aus Konstruktionen mit Holzfaserplatten aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66])

Vergleichend werden für Konstruktionen mit Zellulosedämmstoffen und flexible Holzfasermatten, die durch Gipskarton- und Gipsfaserplatten geschützt werden, die Schutzzeiten der Dämmstoffe sowie die Isolationszeiten des gesamten Schichtenaufbaus entsprechend des Entwurfs des Final Draft der EN 1995-1-2 [69], jedoch mit den in Abschnitt 7.1 vorgestellten Gleichungen für Zellulosedämmstoffe und flexible Holzfasermatten, erneut errechnet. Die abweichende Berechnung der Schutzzeiten der Gipskarton- oder Gipsfaserplatten unter Berücksichtigung einer reduzierten Gesamtdicke für mehrlagige Gipskarton- oder Gipsfaserschichten sowie die veränderten Gleichungen zur Bestimmung der Versagenszeiten der Gipsplatten im Vergleich zu den Berechnungen basierend auf den 2 nd Draft und ohne Berücksichtigung der reduzierten Gesamtdicke führen zu abweichenden Ergebnissen in der Schutzzeit der Dämmstoffe sowie der Isolationszeit des gesamten Schichtenaufbaus (vgl. Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10).

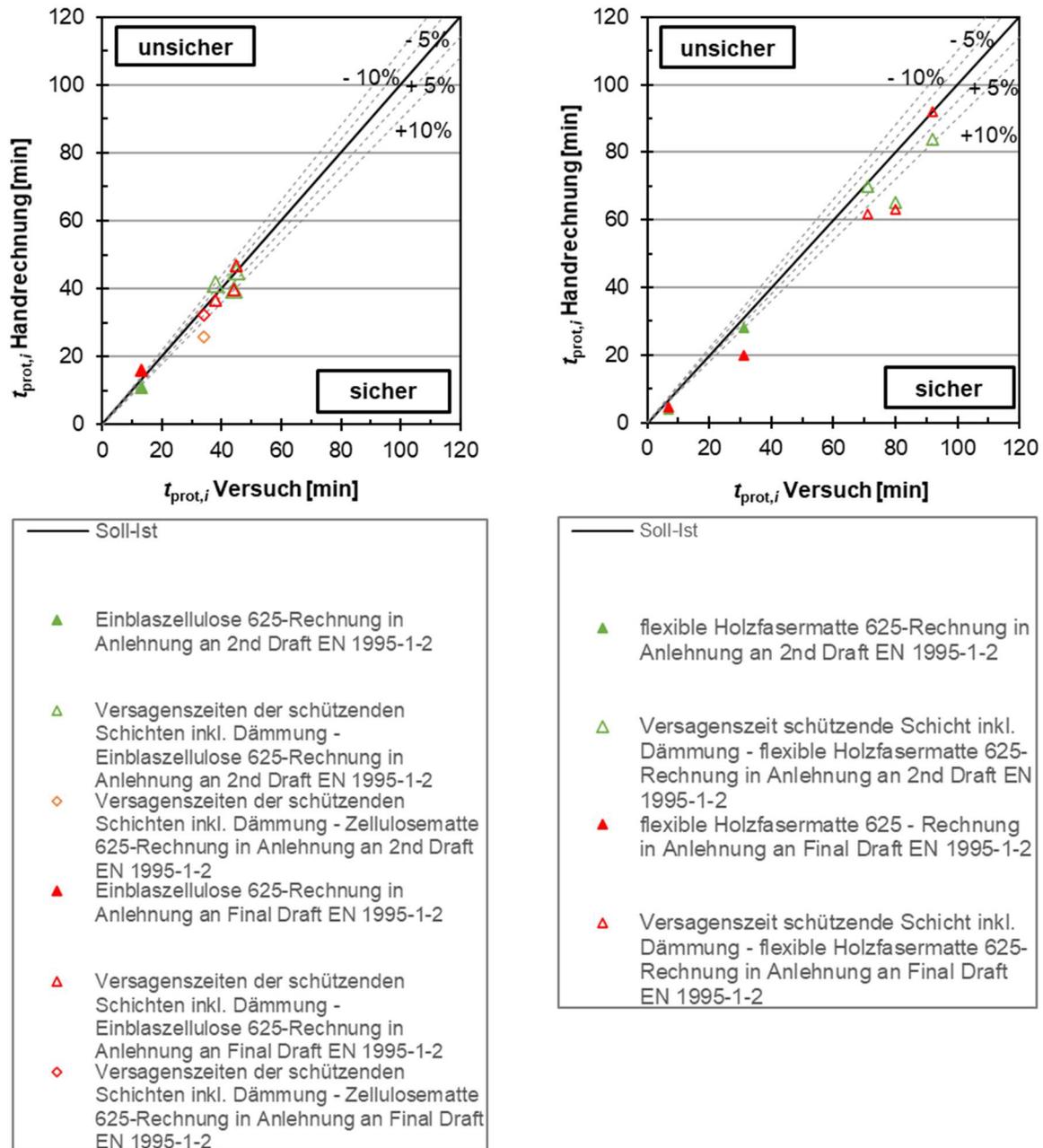


Abbildung 7.9: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung (links) bzw. der flexiblen Holzfaserplatte (rechts), die durch Gipskarton- oder Gipsfaserplatten geschützt werden, aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den 2nd Draft der EN 1995-1-2 bzw. mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den Final Draft der EN 1995-1-2

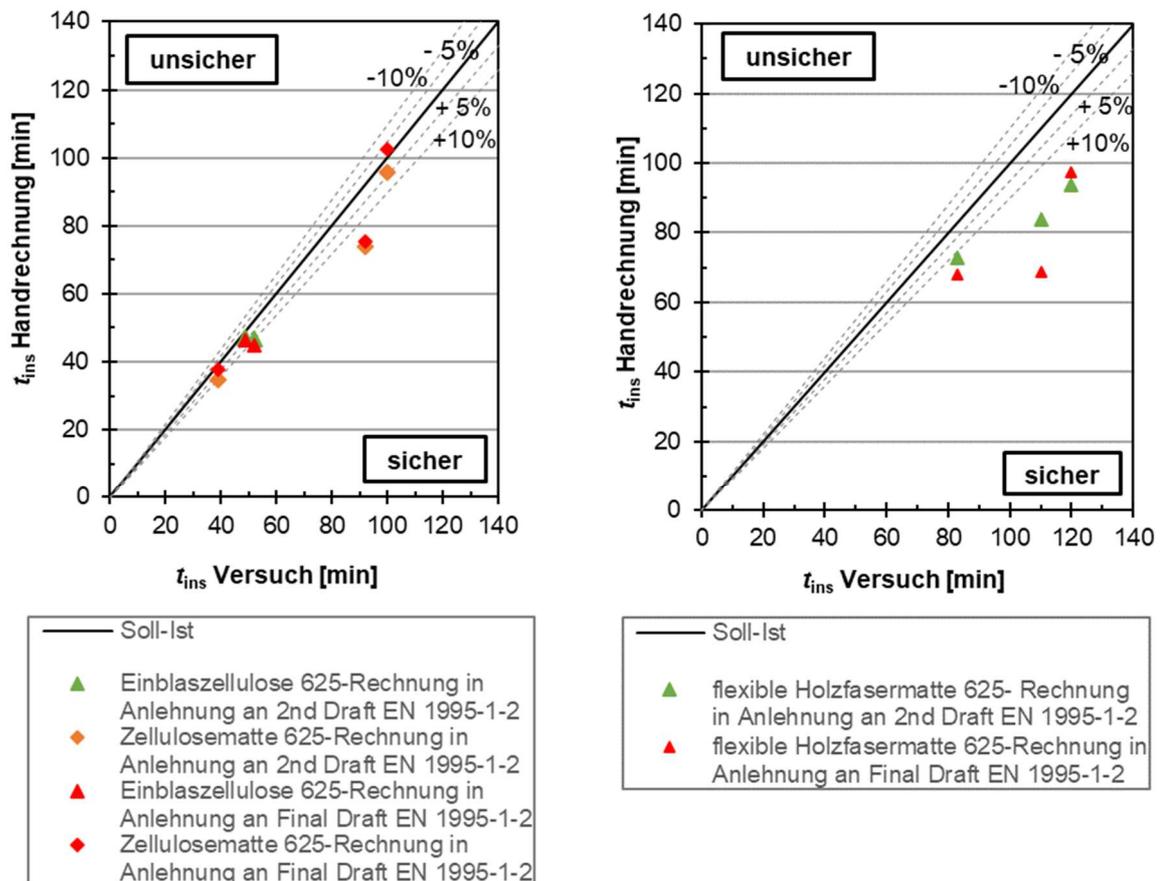


Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $=t_{ins}$  Isolationszeit) aus Konstruktionen mit Zellulosedämmung (links) bzw. flexiblen Holzfasermatten (rechts), die durch Gipskarton- oder Gipsfaserplatten geschützt werden, aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den 2nd Draft der EN 1995-1-2 bzw. mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den Final Draft der EN 1995-1-2

Die errechneten Schutzzeiten der untersuchten Dämmungen (vgl. Abbildung 7.9) sowie die Isolationszeiten der zugehörigen Gesamtkonstruktion (vgl. Abbildung 7.10) auf Basis der eingesetzten Gleichungen für Gipskarton- und Gipsfaserplatten nach dem Final Draft des Entwurfs der EN 1995-1-2 [69] liegen mehrheitlich auf der sicheren Seite oder weichen nur geringfügig (um maximal 10%) von der Soll-Ist-Gerade ab. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Berechnungen in Anlehnung an den 2nd Draft der EN 1995-1-2 [66], jedoch ohne Berücksichtigung einer reduzierten Gesamtdicke für mehrlagige Gipskarton- oder Gipsfaser-schichten, weichen die Schutzzeiten von Zellulosedämmstoffen zwischen 0 und 5 Minuten und die Schutzzeiten von Holzfaserdämmstoffen zwischen 2 und 8 Minuten von den Ergebnissen entsprechend den Berechnungen nach dem Final Draft der EN 1995-1-2 ab. Für die Isolationszeiten von Elementen mit Zellulosedämmstoffen liegen die Abweichungen der Ergebnisse zwischen den Berechnungen im Bereich von 2 bis 7 Minuten und für Elemente mit Holzfaserdämmstoffen im Bereich von 4 bis 15 Minuten. Der deutlich größte Unterschied von 15 Minuten

zwischen den beiden Berechnungen für die errechneten Isolationszeiten eines Elementes mit Holzfaserdämmung ist darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung in Anlehnung an den 2 nd Draft der EN 1995-1-2 keine Angaben zur Versagenszeit von zwei 18 mm dicken Gipsplatten des Typs A vorlagen und daher die Versagenszeiten entsprechend zweilagiger Gipsfaserplatten gewählt wurden. Im Gegensatz dazu wurde bei der Berechnung in Anlehnung an den Final Draft des Entwurfs der EN 1995-1-2 ein deutlich früheres Versagen entsprechend der zugehörigen Gleichung für zweilagige Gipsplatten des Typ A eingesetzt und demnach eine geringe Isolationszeit des gesamten Schichtenaufbaus errechnet.

Alle weiteren Unterschiede in Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 zwischen den Ergebnissen aus beiden Berechnungen sind auf veränderte Gleichungen für die Versagenszeiten der Gipskarton- und Gipsfaserplatten sowie auf veränderte Schutzzeiten der Gipskarton- und Gipsfaserplatten unter Berücksichtigung einer reduzierten Gesamtdicke für mehrlagige Schichten zurückzuführen. Da der Entwurf des Final Draft der EN 1995-1-2 bislang nicht abschließend beurteilt wurde, sind weitere Änderungen bei der Berechnung der Versagenszeiten sowie der Grundschutzzeiten von Gipskarton- und Gipsfaserplatten möglich.

Die hinreichende Übereinstimmung der Schutzzeiten sowie der Isolationszeiten von Bauteilen mit Zellulose- oder Holzfaserdämmstoffen aus Brandversuchen mit den errechneten Werten führt zur Validierung des weiterentwickelten Rechenmodells und der generierten Gleichungen. Dadurch ist es gelungen die untersuchten Dämmstoffe in das additive Berechnungsverfahren zu integrieren und den rechnerischen Nachweis zur raumabschließenden Funktion zu ermöglichen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Der Holztafelbau bietet den Vorteil, optimierte Wand- und Deckenkonstruktionen im Hinblick auf die verschiedenen bauphysikalischen Randbedingungen wie Wärme-, Schall- und Feuchteschutz durch die große Kombinationsmöglichkeit von Bekleidungswerkstoffen und Dämmstoffen zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich werden in Abhängigkeit der jeweilig geltenden Bauordnung Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer dieser Bauteile gestellt. Dabei bezieht sich die Feuerwiderstandsfähigkeit bei tragenden und aussteifenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall (Kriterium R). Bei raumabschließenden Bauteilen handelt es sich bei der Feuerwiderstandsfähigkeit um deren Widerstand gegen die Ausbreitung von Feuer und Rauch auf andere Brandabschnitte (Kriterien EI).

Um diese Konstruktionsvielfalt auch in Bezug auf die Bemessung der Feuerwiderstandsdauer beibehalten zu können, entwickelte Schleifer [120] ein additives Berechnungsmodell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzkonstruktionen. Mithilfe des Modells können etliche Materialien uneingeschränkt miteinander kombiniert werden. Biogene Dämm- und Bekleidungsstoffe wurden in diesem Modell bislang jedoch nicht berücksichtigt, obwohl deren Nachfrage deutlich ansteigt.

In der vorliegenden Arbeit wurde das von Schleifer entwickelte Berechnungsmodell um Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe sowie um Holzfaserplatten als Bekleidungswerkstoff erweitert.

Die Grundlage bildete dabei die Ermittlung der temperaturabhängigen Materialparameter. Um die brennbaren Materialien unter erhöhten Temperaturen untersuchen zu können, wurden verschiedene Verfahren wie die instationäre THD-Methode, stationäre Plattengeräte und die thermisch-gravimetrische Analyse herangezogen. Innerhalb der THD-Methode sowie bei den Plattengeräten wurden die temperaturabhängigen Materialparameter bis zur materialspezifischen Entzündungstemperatur ermittelt. Die Ergebnisse wurden einander gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Plausibilität bewertet. Darauf aufbauend wurden effektive Materialkennwerte weit über die Entzündungstemperatur hinaus durch die systematische Anpassung von numerischen Simulationskurven an tatsächliche Temperatur-Zeit-Kurven aus durchgeführten Brandversuchen entwickelt. Dadurch werden verschiedene Reaktionen im Material, wie beispielsweise die Entweichung von Wasser und die Pyrolyse, berücksichtigt. Auf Basis weiterführender numerischer Simulationen und der durchgeführten Brandversuche wurden die gesuchten Grundschutzzeiten, Grundisolationszeit und die Positionsbeiwerte für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe ermittelt. Durch eine Vielzahl an Großbrandversuchen, die innerhalb einer Datenbank gesammelt wurden, wurden die entwickelten Gleichungen validiert. Unter Berücksichtigung der thermisch induzierten Schrumpfung der Dämmmaterialien wurde das Verfahren um den Aspekt des vorzeitigen Versagens der Dämmung erweitert. Dabei wurden auch die Versagenszeiten von Holzfaserplatten als schützende Schichten relevant, die auf Grundlage der Großbrandversuche ausgewertet wurden. Durch die Gegenüberstellungen des tatsächlichen Versagens der schützenden Schichten inklusive der Dämmschicht mit der Summe

der berechneten Schutzzeiten bis einschließlich der Dämmschicht kann auch ein vorzeitiges Herausfallen von Dämmstoffen berücksichtigt werden.

## 8.2 **Ausblick**

Die raumabschließende Funktion von Holzbauteilen mit Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen sowie Bekleidungsstoffen aus Holzfasern kann durch die entwickelten Gleichungen und die Erweiterung des Berechnungsmodells nach Schleifer um die Versagenszeiten der untersuchten Materialien erweitert werden. Die Brandeinwirkung des zugrundeliegenden Modells basiert auf der Einheits-Temperaturkurve (ETK) nach DIN EN 1991-1-2 [54]. Das Berechnungsmodell ist nicht für den Nachweis unter Naturbrandbeanspruchung bestimmt. Darüber hinaus ist das Berechnungsmodell für eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten anwendbar, da für Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe eine gute Übereinstimmung der errechneten Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Brandversuchen bis zu 120 Minuten erzielt wurden.

Die Beschreibung der experimentellen Analyse der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Rohdichte sowie die Darlegung des Vorgehens zur Bestimmung der effektiven Materialkennwerte liefern die Grundlage zur Aufnahme weiterer, auch brennbarer, Materialien zum Berechnungsmodell. Weiterhin dient diese Vorgehensweise auch bei der Ermittlung effektiver Materialparameter unter Naturbrandbeanspruchung. Hierfür müssen bei Gipsplatten beispielsweise zusätzlich Rissbildungen in der Abkühlphase berücksichtigt werden.

Um eine angedeutete Rohdichteabhängigkeit der Versagenszeiten von unterschiedlich dicken Holzfaserplatten untersuchen zu können, sind weitere Großbrandversuche unabdingbar. Für eine wirtschaftlichere Bemessung besteht außerdem zusätzlicher Forschungsbedarf in Form von Brandversuchen bei der Ermittlung der Rückzugsgeschwindigkeiten der untersuchten Dämmstoffe in Abhängigkeit der Vorerwärmungsdauer unter Verwendung unterschiedlicher schützender Schichten. Außerdem kann die Berechnung der Versagenszeit der Dämmung durch die Berücksichtigung der Einbaulage sowie der Einspannlänge (entspricht dem Achsabstand zwischen den tragenden Holzbauteilen) der Dämmung weiter optimiert werden.

Eine detaillierte Untersuchung des Fugeneinflusses von Holzfaserplatten sowie eine separate Ermittlung des Einflusses der Putzschichten auf die Schutz- sowie Isolationszeit und der Versagenszeit bieten zusätzliche Möglichkeiten die Bemessung wirtschaftlicher zu gestalten.

## 9 Literatur

### Literatur

- [1] AGEPAN® SYSTEM c/o Sonae Arauco Deutschland AG. 2020. *Technisches Datenblatt Agepan DWD 600*. [https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-dwd-600\\_2132-2121.html?t=1](https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-dwd-600_2132-2121.html?t=1). Accessed 11 February 2020.
- [2] AGEPAN® SYSTEM c/o Sonae Arauco Deutschland AG. 2020. *Technisches Datenblatt Agepan Flex*. [https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-flex\\_1721-2121.html?t=1](https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-flex_1721-2121.html?t=1). Accessed 11 February 2020.
- [3] AGEPAN® SYSTEM c/o Sonae Arauco Deutschland AG. 2020. *Technisches Datenblatt Agepan THD N+F*. [https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-n+f\\_1845-2121.html?t=1](https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-n+f_1845-2121.html?t=1). Accessed 11 February 2020.
- [4] AGEPAN® SYSTEM c/o Sonae Arauco Deutschland AG. 2020. *Technisches Datenblatt Agepan THD Putz 050*. [https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-putz-050\\_2118-2121.html?t=1](https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-putz-050_2118-2121.html?t=1). Accessed 11 February 2020.
- [5] AGEPAN® SYSTEM c/o Sonae Arauco Deutschland AG. 2020. *Technisches Datenblatt Agepan THD Static*. [https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-static\\_1715-2121.html?t=1](https://www.sonaearauco.com/de/agepan-system/agepan-thd-static_1715-2121.html?t=1). Accessed 11 February 2020.
- [6] Andersen, F. B. and Mikkelsen, J. 2000. Thermal Conductivity Measurements of Cathode Insulation Materials. *Light Metals*, 429–435.
- [7] Baehr, H. D. and Stephan, K. 2016. *Wärme- und Stoffübertragung*. Lehrbuch. Springer Berlin, Berlin, Erscheinungsort nicht ermittelbar.
- [8] Bäker, M. 2015. A New Method to Determine Material Parameters from Machining Simulations Using Inverse Identification. *Procedia CIRP* 31, 399–404.
- [9] Baur, E., Harsch, G., and Moneke, M. 2019. *Werkstoff-Führer Kunststoffe. Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte*. Hanser, München.
- [10] Bauzentrum München. 2017. *Leitfaden Dämmstoffe 3.0*. [https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Klimaschutz\\_und\\_Energie/Energieeffizientes\\_Bauen/Downloads.html](https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Klimaschutz_und_Energie/Energieeffizientes_Bauen/Downloads.html).
- [11] bba Bau-Beratung-Architektur. 2008. *Holzfasern- und Zellulosedämmung. Schutz im Winter und Sommer*. [https://www.wiso-net.de/document/BBA\\_\\_eaf4ee49f5249eb7a4e91b9b42f184f720476bfc](https://www.wiso-net.de/document/BBA__eaf4ee49f5249eb7a4e91b9b42f184f720476bfc).
- [12] Bénichou, N. and Sultan, M. A. Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. In *Fire and Materials*, 165–179.
- [13] Berge, A., Adl-Zarrabi, B., and Hagentoft, C.-E. 2013. Determination of specific heat capacity by transient plane source. *Frontiers of Architectural Research* 2, 4, 476–482.
- [14] Beschluss der Bauministerkonferenz. 2019. *Musterbauordnung. MBO-2002*.

- [15] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2019. *Technisches Datenblatt best wood FLEX 50*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_FLEX\\_50.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD_FLEX_50.pdf). Accessed 2020-12.
- [16] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2019. *Technisches Datenblatt best wood WALL 180*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_\\_WALL\\_180.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD__WALL_180.pdf). Accessed 2020-12.
- [17] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2019. *Technisches Datenblatte best wood WALL 140*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_WALL\\_140.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD_WALL_140.pdf). Accessed 2020-12.
- [18] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2020. *Technisches Datenbaltt best wood MULTITHERM 110*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_MULTITHERM\\_110.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD_MULTITHERM_110.pdf). Accessed 2020-12.
- [19] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2020. *Technisches Datenbaltt best wood MULTITHERM 140*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_MULTITHERM\\_140.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD_MULTITHERM_140.pdf). Accessed 2020-12.
- [20] best wood SCHNEIDER® GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt best wood FIBRE*. [https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf\\_DE/Holzfaser/Technische\\_Datenblaetter/DE\\_TD\\_FIBRE.pdf](https://www.schneider-holz.com/fileadmin/redaktion/pdf_DE/Holzfaser/Technische_Datenblaetter/DE_TD_FIBRE.pdf). Accessed 2020-12.
- [21] Böckh. 2017. *Wärmeübertragung*. Springer Berlin Heidelberg.
- [22] Carslaw, H. and Jaeger, J. C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford.
- [23] Cederkrantz, D. 2017. *Sample Analyses Report*.
- [24] Clancy, P. 2001. Advances in modelling heat transfer through wood framed walls in fire. *Fire Mater.* 25, 6, 241–254.
- [25] Collier, P. 1996. A model for predicting the fire-resisting performance of small-scale cavity walls in realistic fires. *Fire Technol* 32, 2, 120–136.
- [26] Collier, P. and Buchanan, A. H. 2002. Fire resistance of lightweight timber framed walls. *Fire Technology* 38, 2, 125–145.
- [27] Cooper, L. Y. 1997. *The thermal response of gypsum-panel/steel stud wall systems exposed to fire - Environments - a simulation for use in zone-type fire models*. NISTIR 6027. National Institute of Standards and Technology.
- [28] CWA Cellulose Werk Angelbachtal GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt Climacell "Pure"*. [https://www.climacell.de/pdf/pure/Datenblatt\\_A4\\_pure.pdf](https://www.climacell.de/pdf/pure/Datenblatt_A4_pure.pdf). Accessed 2020-12.

- [29] CWA Cellulose Werk Angelbachtal GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt Climacell "S"*. [https://www.climacell.de/pdf/s/Datenblatt\\_A4\\_s.pdf](https://www.climacell.de/pdf/s/Datenblatt_A4_s.pdf). Accessed 2020-12.
- [30] Davis, W. R. 1985. The Parallel Hot-Wire Method for the Determination of the Thermal Conductivities of Ceramic Fibre Refractories. *High Temperatures- High Pressures*, Vol 17, 31–33.
- [31] DIN 18947. 2018. *Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Beuth-Verlag, DIN 18947.
- [32] DIN 18948. 2018. *Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Beuth-Verlag, DIN 18948.
- [33] DIN 4102-1. 1998. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen*. Beuth-Verlag, DIN 4102-1.
- [34] DIN 4102-4. 2016. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. Beuth-Verlag, DIN 4102-4.
- [35] DIN 51006. 1990. *Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) -Grundlagen*. Beuth-Verlag, DIN 51006.
- [36] DIN 51007. 2019. *Thermische Analyse (TA) – Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) – Allgemeine Grundlagen*. Beuth-Verlag, DIN 51007.
- [37] DIN EN 1094-1. 2008. *Feuerfeste Erzeugnisse für Wärmedämmzwecke. Teil 1: Terminologie, Klassifizierung und Prüfverfahren für Erzeugnisse*. Beuth-Verlag, DIN EN 1094-1.
- [38] DIN EN 12664. 2010. *Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand*. Beuth Verlag, DIN EN 12664.
- [39] DIN EN 12667. 2001. *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand*. Beuth-Verlag, DIN EN 12667.
- [40] DIN EN 12667. 2010. *Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand*. Beuth Verlag, DIN EN 12667.
- [41] DIN EN 13162. 2015. *Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation*. Beuth-Verlag, DIN EN 13162.

- [42] DIN EN 13171. 2015. *Wärmedämmstoffe für Gebäude –Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation*. Beuth-Verlag, DIN EN 13171.
- [43] DIN EN 13353. 2011. *Massivholzplatten (SWP) – Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 13353.
- [44] DIN EN 13501-1. 2019. *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Beuth-Verlag, DIN EN 13501-1.
- [45] DIN EN 13501-2. 2010. *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Beuth-Verlag, DIN EN 13501-2.
- [46] DIN EN 1363-1. 2020. *Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 1363-1.
- [47] DIN EN 13914-2. 2016. *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Innenputze*. Beuth-Verlag, DIN EN 13914-2.
- [48] DIN EN 13914-2 Berichtigung 1. 2017. *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Innenputze*. Beuth-Verlag, DIN EN 13914-2 Berichtigung 1.
- [49] DIN EN 13986. 2015. *Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung*. Beuth-Verlag, DIN EN 13986.
- [50] DIN EN 14592. 2012. *Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 14592.
- [51] DIN EN 15101-1. 2019. *Wärmedämmstoffe für Gebäude – An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Zellulosefüllstoff (LFCI) – Teil 1: Spezifikation für die Produkte vor dem Einbau*. Beuth-Verlag, DIN EN 15101-1.
- [52] DIN EN 15283-2. 2009. *Faserverstärkte Gipsplatten – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 2: Gipsfaserplatten*. Beuth-Verlag, DIN EN 15283-2.
- [53] DIN EN 16733. 2016. *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Bestimmung der Neigung eines Bauprodukts zum kontinuierlichen Schwelen*. Beuth-Verlag, DIN EN 16733.
- [54] DIN EN 1991-1-2. 2010. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 1991-1-2.
- [55] DIN EN 1995-1-2. 2010. *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Beuth-Verlag, DIN EN 1995-1-2.
- [56] DIN EN 300. 2006. *Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) – Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 300.

- [57] DIN EN 312. 2010. *Spanplatten – Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 312.
- [58] DIN EN 520. 2009. *Gipsplatten – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Beuth-Verlag, DIN EN 520.
- [59] DIN EN 622-4. 2019. *Faserplatten – Anforderungen – Teil 4: Anforderungen an poröse Platten*. Beuth-Verlag, DIN EN 622-4.
- [60] DIN EN 636. 2015. *Sperrholz – Anforderungen*. Beuth-Verlag, DIN EN 636.
- [61] DIN EN 993-14. *Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse. Teil 14: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem*. Beuth-Verlag, DIN EN 993-14.
- [62] DIN EN 993-15. 2005. *Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse. Teil 15: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Heißdraht- (Parallel-) Verfahren*. Beuth-Verlag, DIN EN 993-15.
- [63] DIN EN ISO 22007-2. 2015. *Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit – Teil 2: Transientes Flächenquellenverfahren (Hot-Disk-Verfahren)*. Beuth-Verlag, DIN EN ISO 22007-2.
- [64] DIN EN ISO 8497. 1996. *Wärmeschutz. Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften im stationären Zustand*. Beuth Verlag, DIN EN ISO 8497.
- [65] DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L., Walton W. D., Custer, R., Hall, J. R., and Watts J.M. 2006. *SFPE handbook of fire protection engineering*. NFPA, National Fire Protection Association [u.a.], Quincy, Mass.
- [66] Draft 2 EN 1995-1-2. 2020. *Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General – Structural fire design*. cen, EN 1995-1-2.
- [67] Dumez, P., Provost, G., and Lecrivain, L. La mesure de la conductivité thermique à très haute températures par la méthode du cylindre. *Bulletin de la Societe Francaise Ceramique* 1965, 69, 89–98.
- [68] Eckard Macherauch, H.-W. Z. 2014. *Praktikum in Werkstoffkunde. 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Springer Vieweg.
- [69] Final Draft EN 1995-1-2. 2021. *Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: Structural fire design*. cen, EN 1995-1-2.
- [70] FNR. 2014. *Marktübersicht. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/broschuere\\_daemmstoffe-web\\_v02.pdf?utm\\_source=baulinks&utm\\_campaign=baulinks](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/broschuere_daemmstoffe-web_v02.pdf?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks). Accessed 14 January 2020.
- [71] FNR. 2019. *Marktübersicht. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch\\_Daemmstoffe\\_2019\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_Daemmstoffe_2019_web.pdf).
- [72] FNR. 2021. *Absatzvolumen von Dämmstoffen in Deutschland 2019*. pressemitteilung/marktanteil-von-nawaro-daemmstoffen-waechst.

- [73] Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München. 2018. *Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667:2001 Prüfbericht Nr.: L2-11/18*.
- [74] Frangi, A. 2001. *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken*, ETH Zürich.
- [75] Fuller, J. J., Leichti, R. J., and White, R. H. 1992. Temperature distribution in a nailed gypsum-stud joint exposed to fire. *Fire Mater.* 16, 2, 95–99.
- [76] Gavin H. P. 2019. *The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems*. <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>. Accessed 22 May 2020.
- [77] Gerlich, J. T., Collier, P. C. R., and Buchanan, A. H. 1996. Design of Light Steel-framed Walls for Fire Resistance. *Fire and Materials* 20, 2, 79–96.
- [78] Ghazi Wakili, K., Hugi, E., Wullschleger, L., and Frank, T. H. 2007. Gypsum Board in Fire — Modeling and Experimental Validation. *Journal of Fire Sciences* 25, 3, 267–282.
- [79] GUTEX Holzfaserplattenwerk. 2020. *Technisches Merkblatt Gutex Thermofibre*. [https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische\\_Merkblaetter/GUTEX\\_DE\\_TM\\_Thermofibre\\_2019-05.pdf](https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische_Merkblaetter/GUTEX_DE_TM_Thermofibre_2019-05.pdf). Accessed 11 February 2020.
- [80] GUTEX Holzfaserplattenwerk. 2020. *Technisches Merkblatt Gutex Thermoflex*. [https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische\\_Merkblaetter/GUTEX\\_DE\\_TM\\_Thermoflex\\_2019-08.pdf](https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische_Merkblaetter/GUTEX_DE_TM_Thermoflex_2019-08.pdf). Accessed 11 February 2020.
- [81] GUTEX Holzfaserplattenwerk. 2020. *Technisches Merkblatt Gutex Thermosafe homogen*. [https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische\\_Merkblaetter/GUTEX\\_DE\\_TM\\_Thermosafe-homogen\\_2019-04.pdf](https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische_Merkblaetter/GUTEX_DE_TM_Thermosafe-homogen_2019-04.pdf). Accessed 11 February 2020.
- [82] GUTEX Holzfaserplattenwerk. 2020. *Technisches Merkblatt Gutex Thermowall-NF-gf-L*. [https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische\\_Merkblaetter/GUTEX\\_DE\\_TM\\_Thermowall-NF-gf-L\\_2019-05.pdf](https://gutex.de/fileadmin/uploads/Downloads/Technische_Merkblaetter/GUTEX_DE_TM_Thermowall-NF-gf-L_2019-05.pdf). Accessed 11 February 2020.
- [83] Hagemann, L. and Peters, E. Thermal Conductivity- Comparison of Methods ASTM-Method - Hot Wire Method and its Variations. *Interceram* 1982, 31, 131–135.
- [84] Hammerschmidt, U., Hameury, J., Strnad, R., Turzó-Andras, E., and Wu, J. 2015. Critical Review of Industrial Techniques for Thermal-Conductivity Measurements of Thermal Insulation Materials. *Int J Thermophys* 36, 7, 1530–1544.
- [85] Harmathy, T. Z. 1983. *Properties of Building Materials at Elevated Temperatures*. *DBR Paper No. 1080, NRCC 20956*.
- [86] Hemminger, W. F. and Cammenga, H. K. 1989. *Methoden der thermischen Analyse*. Anleitungen für die chemische Laboratoriumspraxis 24. Springer, Berlin.

- [87] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. 2020. *GESTIS-Stoffdatenbank: Borsäure, Calciumsalz. Stoffgruppenschlüssel 124110, ZVG Nr: 125057*. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu). Accessed 2020-12.
- [88] Inthermo GmbH. 2020. *Leistungserklärung INTHERMO HFD-Exterior Compact*. <https://www.inthermo.de/nc/produkte/wdvs-holzrahmenbau/daemmung/produkte/7/3.html>.
- [89] ISO 5660-1. 2002. *Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen- Wärmefreisetzung, Rauchentwicklung und Masseverlustrate – Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone- Kalorimeter-Verfahren)*, ISO 5660-1.
- [90] ISOCELL GmbH. *Technische Daten WOODYCELL*. [https://www.isocell.com/pdf/products/de/Produktdatenblatt%20Woodycell\\_DE.pdf](https://www.isocell.com/pdf/products/de/Produktdatenblatt%20Woodycell_DE.pdf).
- [91] ISOCELL GmbH. 2020. *Technische Daten ISOCELL- Zellulosefaser*. [https://www.isocell.com/pdf/products/de/Produktdatenblatt%20Zellulose\\_DE.pdf](https://www.isocell.com/pdf/products/de/Produktdatenblatt%20Zellulose_DE.pdf). Accessed 2020-12.
- [92] isofloc AG. 2020. *Technische Daten isofloc LM*. <https://isofloc.ch/assets/assets/TDB-isofloc-LM-BUE-de.pdf>. Accessed 2020-12.
- [93] isofloc AG. 2020. *Übersicht Technische Daten isofloc woodflex*. <https://isofloc.ch/assets/Uploads/TDB-isoflocWoodflex-de.pdf>.
- [94] isofloc AG. 2020. *Übersicht Technische Daten woodfiber*. <https://isofloc.ch/assets/assets/Datenblatt-isofloc-woodfiber2.pdf>.
- [95] Jackson, A. J., Adams, J., and Millar, R. C. 1978. Thermal Conductivity Measurements on High-Temperature Fibrous Insulations by the Hot-Wire Method. In *Thermal Transmission Measurements of Insulation*, R. P. Tye, Ed. American Society for Testing & Materials, West Conshohocken, 154-154-18. DOI=10.1520/STP35742S.
- [96] Just, A. 2010. *Structural Fire Design of Timber Frame Assemblies Insulated by Glass Wool and Covered by Gypsum Plasterboards*. PhD thesis, Tallinn University of Technology.
- [97] Just, A., Schmid, J., and König, J. 2010. *Gypsum plasterboards used as fire protection- Analysis of a database* 29. Technical Research Institute of Sweden.
- [98] Källsner, B. and König, J. 2000. Thermal and mechanical properties of timber and some other materials used in light timber frame construction. *International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W 18, Timber Structures* Delft, Netherlands.
- [99] Kampmeier, B. 2008. *Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2008. Institut für

Baustoffe, Massivbau und Brandschutz 206. Techn. Univ. Inst. für Baustoffe  
Massivbau und Brandschutz, Braunschweig.

- [100] Kodur, V. K. R., Sultan, M. A., and Denham, E. M. A. 1996. *Temperature Measurements in Full-Scale Wood Stud Shear Walls*. DOI=10.4224/20337840.
- [101] Kodur, V. K. R., Sultan, M. A., Latour, J. C., Leroux, P., and Monette, R. C. 2013. *Experimental studies on the fire resistance of load-bearing steel stud walls*. DOI=10.4224/21268483.
- [102] Kolb, T., Zobel, A., and Northe, Christian, Schwenke Tasja. 2019. Glimmverhalten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. *Holztechnologie*, 4, 9–16.
- [103] König, J., Oksanen, T., and Towler, K. 2000. *A review of Component Additive Methods used for the determination of fire resistance of separating light timber frame constructions*. CIB-W18/33-16-2. International Council for Research and Innovation in Building and Construction Working Commission W18 - Timber Structures, Delft.
- [104] König, J. and Walleij, L. 2000. *Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires. Part 2: A Design Model for Standard Fire Exposure*. Report.
- [105] Künzel, H. M. 1994. *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [106] Küppers, J. 2020. *Grundlagenuntersuchungen zum Brandverhalten von WDVS mit nachwachsenden Rohstoffen*, Universitätsbibliothek Braunschweig.
- [107] Langeheinecke, K., Jany, P., and Sapper, E. 2004. *Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium ; mit 46 Tabellen*. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg, Wiesbaden.
- [108] Mäger, K. N., Just, A., and Frangi, A. 2018. *Improvements to the Component Additive Method*.
- [109] Mäger, K. N., Just, A., Frangi, A., and Brandon, d. Protection by fire rated claddings in the Component Additive Method. In *INTER International Network on Timber Engineering Research*.
- [110] Maglić, K. D., Cezairliyan, A., and Peletsky, V. E., Eds. 1992. *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods. Volume 2 Recommended Measurement Techniques and Practices*. Springer US, Boston, MA, s.l.
- [111] Maku T. 1954. *Studies on heat conduction in wood*.
- [112] Mayerl, J. and Urban, D. 2018. *Angewandte Regressionsanalyse. Theorie, Technik und Anwendung*. Springer VS, Wiesbaden.

- [113] Mehaffey, J. R., Cuerrier P., and Carisse G. A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Walls Exposed to Fire. In *Fire and Materials*, 297–305.
- [114] Meyn, W. 2008. *Experimentelle und numerische Analyse des thermischen sowie Grundlagen des strukturmechanischen Verhaltens von Holzrahmenwänden bei thermischer instationärer Einwirkung unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens*. Dissertation, Universität Leipzig.
- [115] Norén, J. 1994. *Addition Methode - Calculation of fire resistance for separating wood frame walls*. Rapport I 9312070. Trätek, Stockholm.
- [116] Ökologisches Baustoffinformationszentrum WECOBIS. 2020. *Dämmstoffe*. <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe.html>.
- [117] Peter Seppeler Gesellschaft m.b.H. 2020. *Produktdatenblatt THERMOFLOC B*. <https://www.thermofloc.de/de/downloads?path=/de/Produktdatenblaetter/Einblasdaemmstoff>. Accessed 2020-12.
- [118] Peter Seppeler Gesellschaft m.b.H. 2020. *Produktdatenblatt THERMOFLOC F*. <https://www.thermofloc.de/de/downloads?path=/de/Produktdatenblaetter/Einblasdaemmstoff>. Accessed 2020-12.
- [119] Povel, D. 2002. *Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- [120] Schleifer, V. 2009. *Zum Verhalten von raumabschließenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*. Dissertation, ETH Zürich.
- [121] Sjöberg, J., Zhang, Q., Ljung, L., Benveniste, A., Delyon, B., Glorennec, P.-Y., Hjalmarsson, H., and Juditsky, A. 1995. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview. *Automatica* 31, 12, 1691–1724.
- [122] SOPREMA GmbH. 2018. *PAVAFLEX Flexibler Holzfaserdämmstoff für das Gefach*. <https://www.pavatex.de/produkte/holzfaser-daemmung/wand.html>.
- [123] SOPREMA GmbH. 2018. *PAVAWALL-GF Holzfaserdämmplatte für Wärmedämmverbundsysteme*. <https://www.pavatex.de/produkte/holzfaser-daemmung/wand.html>.
- [124] SOPREMA GmbH. 2018. *Produktdaten ISOLAIR Diffusionsoffene Unterdeckplatte / Multifunktionsplatte*. <https://www.pavatex.de/produkte/holzfaser-daemmung/wand.html>. Accessed 2020-01.
- [125] SOPREMA GmbH. 2018. *Produktdaten PAVATHERM Leistungsstarke Holzfaserdämmplatte*. Accessed 2020-01.
- [126] SOPREMA GmbH. 2020. *PAVAWALL-GF Dämmplatte für Wärmedämmverbundsystem*. [https://www.pavatex.de/fileadmin/produkt/Produktinformationen/Pavatex/Produktdatenblatt\\_PAVAWALL-GF.pdf](https://www.pavatex.de/fileadmin/produkt/Produktinformationen/Pavatex/Produktdatenblatt_PAVAWALL-GF.pdf). Accessed 2020-12.

- [127] STEICO SE. 2020. *Datenblatt STEICO flex 036*. [https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product\\_information/flex\\_036/STEICOflex\\_036\\_DE\\_i.pdf](https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product_information/flex_036/STEICOflex_036_DE_i.pdf). Accessed 2020-12.
- [128] STEICO SE. 2020. *Datenblatt STEICO flex 038*. [https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product\\_information/flex/STEICOflex\\_038\\_de\\_i.pdf](https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product_information/flex/STEICOflex_038_de_i.pdf). Accessed 2020-12.
- [129] STEICO SE. 2020. *Datenblatt Steico therm*. [https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product\\_information/therm/STEICOtherm\\_de\\_i.pdf](https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product_information/therm/STEICOtherm_de_i.pdf). Accessed 2020-12.
- [130] STEICO SE. 2020. *Datenblatt STEICO zell*. [https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product\\_information/zell/STEICOzell\\_de\\_i.pdf](https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Product_information/zell/STEICOzell_de_i.pdf). Accessed 2020-12.
- [131] Stephan, P., Kabelac, S., Kind, M., Mewes, D., Schaber, K., and Wetzel, T., Eds. 2019. *VDI-Wärmeatlas. Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. VDI Springer Reference. Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [132] Sultan, M. A. 1996. A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire. *Fire Technol* 32, 3, 239–259.
- [133] Sultan, M. A. 2008. Fire Resistance of Wood Joist Floor Assemblies. *Fire Technol* 44, 4, 383–417.
- [134] Sultan, M. A. and Loughheed, G. D. 2002. *Results of fire resistance tests on full-scale gypsum board wall assemblies*. DOI=10.4224/20378755.
- [135] Sultan, M. A., Séguin, Y. P., and Leroux, P. 1998. *Results of Fire Resistance Tests on Full-Scale Floor Assemblies*. DOI=10.4224/20331574.
- [136] Takeda, H. and Mehaffey, J. R. 1998. WALL2D: A model for predicting heat transfer through wood-stud walls exposed to fire. *Fire Mater.* 22, 4, 133–140.
- [137] Teibinger, M., Matzinger, I., and Donauer P.-F. 2004. *Brandrisiken beim Einsatz brennbarer Dämmstoffe im Holzbau*. Endbericht.
- [138] Thomas, G. 2002. Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire Mater.* 26, 1, 37–45.
- [139] Thomas G. C., Buchanan, A. H., Carr A. J., Fleischmann C. M., and Moss P. J. Light timber-framed walls exposed to compartment fires. In *Journal of Fire Protection Engineering*, 25–35.
- [140] Tiso, M. 2017. *Effective Cross section method for timber frame assemblies - definition of coefficients and zero strength layers*. STSM report COST FP 1404, Schweiz.

- [141] Tiso, M. 2018. *The contribution of cavity insulations to the load-bearing capacity of timber frame assemblies exposed to fire*. Doctoral thesis / Tallinn University of Technology 42/2018. TTÜ Press, Tallinn.
- [142] TU Ilmenau. *Theoretische Grundlagen. Mechanismen der Wärmeübertragung*. <http://thedy22.maschinenbau.tu-ilmenau.de/wwwtd/m2twin/images/grund.pdf>.
- [143] UdiDÄMMSYSTEME GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt UdiFLEX*. [https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI\\_UdiFLEX\\_01.pdf](https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI_UdiFLEX_01.pdf). Accessed 2020-12.
- [144] UdiDÄMMSYSTEME GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt UdiSPEED*. [https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI\\_UdiSPEED\\_01.pdf](https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI_UdiSPEED_01.pdf). Accessed 2020-12.
- [145] UdiDÄMMSYSTEME GmbH. 2020. *Technisches Datenblatt UdiUNGER-DIFFUTHERM NF*. [https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI\\_UdiUNGER-DIFFUTHERM\\_NF.pdf](https://www.udidaemmsysteme.de/wp-content/uploads/2020/05/TI_UdiUNGER-DIFFUTHERM_NF.pdf). Accessed 2020-12.
- [146] Uhl, A.-L. 2017. *Bestimmung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen mit Hilfe des Guarded-Hot-Plate-Verfahrens*. Studienarbeit, Technische Universität München.
- [147] Uni Magdeburg. *Instationäre Wärmeleitung*. [http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel\\_7\\_Waerme-\\_und\\_Stoffuebertragung.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel_7_Waerme-_und_Stoffuebertragung.pdf).
- [148] vdnr. 2020. *Holzfaserdämmstoffe*. [https://www.holzfaser.org/holzfaserdaemmstoffe/mn\\_2](https://www.holzfaser.org/holzfaserdaemmstoffe/mn_2).
- [149] Werther, N. 2016. *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren*. Dissertation, Technische Universität München.
- [150] Wiberg, N. *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. De Gruyter.
- [151] Wickström, U. 2007. *Adiabatic surface temperatures for calculating heat transfer to fire exposed structures*.
- [152] Winter, S., Werther, N., Hofmann, V., Kammerer, E., and Rauch, M. 2018. *Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen*. Forschungsbericht gefördert durch Forschungsinitiative Zukunft Bau, Technische Universität München.
- [153] Wulff, R. 2009. *Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen - Untersuchung zu Ursachen für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren*. Dissertation.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: beispielhafter Aufbau eines Wandelementes im Holztafelbau.....	1 -
Abbildung 1.2: Kritische Temperaturerhöhung $\Delta T_{\text{krit}}$ auf der brandabgekehrten Seite einer Schicht eines Wand- oder Deckenelementes gemäß dem Berechnungsmodell nach Schleifer [120].....	2 -
Abbildung 2.1: Wege des Wärmedurchgangs durch eine Holzkonstruktion [55] [120].....	8 -
Abbildung 2.2: Schützende und isolierende Schichten innerhalb des Bauteils gemäß Schleifer [120].....	8 -
Abbildung 2.3: Abfallen von Schichten bei der Ermittlung der Schutzzeiten gemäß Schleifer [120].....	9 -
Abbildung 3.1: Volumenelement mit Wärmestrom in x-Richtung basierend auf Langeheinecke et al. [107].....	17 -
Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsprofil und Temperaturprofil längs einer überströmten Wand basierend auf Langeheinecke et al. und Uni Magdeburg [107, 147].....	20 -
Abbildung 3.3: Grenzschichtmodell an überströmter Platte bei erzwungener Konvektion basierend auf Uni Magdeburg [147].....	22 -
Abbildung 3.4: Zur Berechnung der Einstrahlzahl .....	26 -
Abbildung 4.1: Absatzvolumen der Dämmstoffe in Deutschland im Jahr 2019 basierend auf Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) [72].....	31 -
Abbildung 4.2: Einsatz von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen in Holztafelkonstruktionen.....	37 -
Abbildung 5.1: Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines Ein- und Zweiplattengerätes angelehnt an DIN EN 12667:2001 [39] (nachgestellt mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V.).....	42 -
Abbildung 5.2: Darstellung einer Thermowaage zur gravimetrischen Analyse nach Hemminger et al. [86].....	46 -
Abbildung 5.3: Darstellung eines Dilatometer nach Hemminger et al. [86].....	48 -
Abbildung 5.4: Aufbau des verwendeten Einplattengeräts zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [146] .....	49 -

Abbildung 5.5: Experimentell ermittelte Werte der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Temperatur für flexible Holzfaserdämmstoffe (Rohdichte ca. 50 kg/m <sup>3</sup> ).....	51 -
Abbildung 5.6: Berechnete Werte der spezifischen Wärmeleitfähigkeit für Holzfaserdämmstoffe aus dem THD- Verfahren sowie den Resultaten aus der TGA..	53 -
Abbildung 5.7: Gemessene Werte für flexible Holzfaserdämmung (Rohdichte ca. 50 kg/m <sup>3</sup> ) für das Verhältnis von Rohdichte zur Darrohdichte .....	54 -
Abbildung 5.8: TG- und DTG-Kurve für Holzfaserdämmstoffe.....	54 -
Abbildung 5.9: Experimentell ermittelte Werte der Wärmeleitfähigkeit bei steigender Temperatur für Zellulosedämmstoffe (Rohdichte ca. 50-63 kg/m <sup>3</sup> ).....	55 -
Abbildung 5.10: Berechnete Werte der spezifischen Wärmekapazität für Zellulosedämmstoffe aus dem THD Verfahren sowie den Resultaten aus der TGA..	56 -
Abbildung 5.11: Gemessene Werte für Zellulosedämmstoffe (Rohdichte ca. 50 kg/m <sup>3</sup> ) für das Verhältnis von Rohdichte zur Darrohdichte .....	57 -
Abbildung 5.12: TG- und DTG-Kurve für Zellulosedämmstoffe .....	57 -
Abbildung 5.13: Vergleich des gemessenen Verhältnisses von Rohdichte zur Darrohdichte für Holz [85, 120], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung .....	58 -
Abbildung 5.14: Vergleich der gemessenen spezifischen Wärmekapazität von Holz [65], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung.....	59 -
Abbildung 5.15: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeit von Holz [12], flexibler Holzfaserdämmung und Zellulosedämmung.....	60 -
Abbildung 5.16: Ausgangswerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der flexiblen Holzfaserdämmung.....	61 -
Abbildung 5.17: Ausgangswerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der Zellulosedämmung .....	62 -
Abbildung 5.18: Ausgangswerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung.....	63 -
Abbildung 5.19: Ausgangswerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung .....	64 -

<i>Abbildung 5.20: Vergleich der Brandversuche mit den Ausgangswerten der effektiven Kennwerte für 160 mm flexible Holzfaserdämmung (links) und 120 mm Zellulosedämmung (rechts).....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Abbildung 5.21: Direkter Wärmedurchgang durch das Bauteil .....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Abbildung 5.22: Hinterströmen heißer Gase über die Flanken .....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Abbildung 5.23: Auswirkung veränderter effektiver Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit bei 80°C auf die berechneten Temperatur-Zeitverläufe auf der feuerabgewandten Seite (Beispiel für 120 mm dicker Zellulosedämmstoff).....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Abbildung 5.24: Auswirkung veränderter effektiver Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit bei 680°C auf die berechneten Temperatur-Zeitverläufe auf der feuerabgewandten Seite (Beispiel 120 mm dicker Zellulosedämmstoff).....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Abbildung 5.25: Vergleich des Brandversuchs für 60 mm dicke flexible Holzfaserdämmstoffe (links) bzw. Zellulosedämmstoffe (rechts) mit entsprechender Simulation auf Basis der ermittelten effektiven Kennwerte für 160 mm dicke flexible Holzfaserdämmstoffe (links) und 120 mm dicke Zellulosedämmstoffe (rechts) .....</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Abbildung 5.26: Hinterströmen von Heißgasen durch verringerte Kontaktfläche der Dämmung zum Tragwerk ausgelöst durch Schrumpfen.....</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Abbildung 5.27: Gemessene Grundschutzzeiten der Holzfaserdämmung mit entscheidender Trendlinie.....</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Abbildung 5.28: Gemessene Grundschutzzeiten der Zellulosedämmung mit entscheidender Trendlinie.....</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Abbildung 5.29: Gegenüberstellung der rohdichtebezogenen Grundschutzzeiten für im Trockenverfahren (links) und im Nassverfahren (rechts) hergestellte Holzfaserdämmplatten.....</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Abbildung 5.30: Grundschutzzeiten von Holzfaserplatten mit entsprechenden Regressionsgerade in Bezug zum Herstellungsverfahren.....</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Abbildung 5.31: Vergleich der Grundschutzzeiten von 60 mm bzw. 100mm dicken Holzfaserplatten, die im Trocken- und Nassverfahren hergestellt wurden, mit den Temperatur-Zeit-Kurven aus entsprechenden Simulationen für 60 mm bzw. 100 mm dicke flexible Holzfaserplatten und Holzfaserplatten (Trockenverfahren: Protect Typ M dry, Nassverfahren: Protect Typ M).....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Abbildung 5.32: Simulierte Temperaturverläufe der flexiblen Holzfaserdämmstoffe für Dicken von 60 mm bis 240 mm und Vergleich der gemessenen Mittel- und</i>	

<i>Maximalwerte aus zugehörigen Brandversuchen für die Dämmstoffdicken von 60 mm und 160 mm mit den Ergebnissen aus der Simulation .....</i>	<i>74 -</i>
<i>Abbildung 5.33: Simulierte Temperaturverläufe der Zellulosedämmstoffe für Dicken von 60 mm bis 240 mm und Vergleich der gemessenen Mittel- und Maximalwerte aus zugehörigen Brandversuchen für die Dämmstoffdicken von 60 mm und 120 mm mit den Ergebnissen aus der Simulation.....</i>	<i>74 -</i>
<i>Abbildung 5.34: Simulierte Temperaturverläufe der Holzfaserplatten von 35 mm bis 100 mm .....</i>	<i>75 -</i>
<i>Abbildung 5.35: Gegenüberstellung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten von Holz, flexibler Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose .....</i>	<i>77 -</i>
<i>Abbildung 5.36: Gegenüberstellung der effektiven Wärmekapazitäten von Holz, flexibler und Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose .....</i>	<i>78 -</i>
<i>Abbildung 6.1: Gewähltes Finite-Elemente-Modell in ANSYS gemäß Schleifer [120].....</i>	<i>80 -</i>
<i>Abbildung 6.2: Modell und zugehörige Grenztemperaturen zur Bestimmung der Grundschutzzeiten gemäß Schleifer [120] .....</i>	<i>82 -</i>
<i>Abbildung 6.3: Einfluss der Vorerwärmung durch schützende Schichten gemäß Schleifer [120] .....</i>	<i>82 -</i>
<i>Abbildung 6.4: Einfluss dahinterliegender Dämmstoffe auf das untersuchte Material gemäß Schleifer [120].....</i>	<i>84 -</i>
<i>Abbildung 6.5: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose bzw. Holzfaser geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei 270°C abfallen gemäß Schleifer [120].....</i>	<i>84 -</i>
<i>Abbildung 6.6: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose bzw. Holzfaser geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei 600°C (Bild links) bzw. 400°C (Bild rechts) abfallen gemäß Schleifer [120].....</i>	<i>85 -</i>
<i>Abbildung 7.1: Berücksichtigung der Putzschicht bei Holzfaserdämmplatten.....</i>	<i>89 -</i>
<i>Abbildung 7.2: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der flexiblen Holzfaserdämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahren gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....</i>	<i>94 -</i>
<i>Abbildung 7.3: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren</i>	

gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....	95 -
Abbildung 7.4: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Holzfaserplatten aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....	96 -
Abbildung 7.5: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten unter Berücksichtigung eines sofortigen Herausfallens der Dämmung in Decken nach Versagen der Schutzbekleidung .....	98 -
Abbildung 7.6: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $= t_{ins}$ ) aus Konstruktionen mit Holzfaserdämmstoffen aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....	99 -
Abbildung 7.7: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $= t_{ins}$ ) aus Konstruktionen mit Zellulosedämmstoffen aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....	100 -
Abbildung 7.8: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $= t_{ins}$ Isolationszeit) aus Konstruktionen mit Holzfaserplatten aus den Versuchen mit der Summe der errechneten Schutzzeiten aller Schichten (links nach dem Rechenverfahren gemäß Schleifer [120] und rechts nach dem weiterentwickelten Rechenverfahrens gemäß DIN EN 1995-1-2 [66]) .....	101 -
Abbildung 7.9: Gegenüberstellung der Schutzzeiten der Zellulosedämmung (links) bzw. der flexiblen Holzfaserplatte (rechts), die durch Gipskarton- oder Gipsfaserplatten geschützt werden, aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den 2nd Draft der EN 1995-1-2 bzw. mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den Final Draft der EN 1995-1-2 .....	102 -
Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der Summe der Schutzzeiten aller Schichten ( $= t_{ins}$ Isolationszeit) aus Konstruktionen mit Zellulosedämmung (links) bzw. flexiblen Holzfaserplatten (rechts), die durch Gipskarton- oder Gipsfaserplatten geschützt werden, aus Versuchen mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den 2nd Draft der EN 1995-1-2 bzw. mit den errechneten Schutzzeiten in Anlehnung an den Final Draft der EN 1995-1-2 .....	103 -

## 11 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Bestimmung der reduzierten Gesamtdicke bei Verwendung mehrlagiger Gipsplatten</i> .....	11 -
<i>Tabelle 2-2: Einteilung typischer Dämmmaterialien in Protection Level</i> .....	12 -
<i>Tabelle 2-3: Faktor <math>k_2</math> zur Berücksichtigung der Wirkung der einzelnen Platte bzw. des fire protection systems</i> .....	14 -
<i>Tabelle 4-1: Zusammenstellung einiger Eigenschaften von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen [1–5, 15–20, 28, 29, 79–82, 88, 90–94, 117, 118, 122–130, 143–145]</i> .....	34 -
<i>Tabelle 4-2: Temperaturabhängige Prozesse von möglichen Bestandteilen aus Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen</i> .....	36 -
<i>Tabelle 5-1: Kennwerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der flexiblen Holzfaserdämmung</i> .....	62 -
<i>Tabelle 5-2: Kennwerte der effektiven spezifischen Wärmekapazität der Zellulosedämmung</i> .....	62 -
<i>Tabelle 5-3: Ausgangswertewerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung</i> .....	63 -
<i>Tabelle 5-4: Ausgangswertewerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung</i> .....	64 -
<i>Tabelle 5-5: Ermittelte effektive spezifische Wärmeleitfähigkeit für flexible Holzfaserdämmstoffe</i> .....	75 -
<i>Tabelle 5-6: Dickenabhängige spezifische Wärmeleitfähigkeit bei 700°C für flexible Holzfaserdämmstoffe</i> .....	75 -
<i>Tabelle 5-7: Ermittelte effektive spezifische Wärmeleitfähigkeit für Zellulosedämmstoffe</i> .....	75 -
<i>Tabelle 5-8: Dickenabhängige Wärmeleitfähigkeit bei 680°C für Zellulosedämmstoffe</i> .....	76 -
<i>Tabelle 5-9: Dickenabhängige Werte der Wärmeleitfähigkeit bei 700°C für Holzfaserplatten</i> .....	76 -
<i>Tabelle 5-10: Effektive Kennwerte für das Verhältnis der Rohdichte von flexiblen Holzfaserdämmstoffen</i> .....	76 -

*Tabelle 5-11: Effektive Kennwerte für das Verhältnis der Rohdichte von Zellulosedämmstoffen.....- 76 -*

*Tabelle 5-12: Gegenüberstellung der tabellarischen effektiven Wärmeleitfähigkeiten von Holz, flexibler und Holzfaserplatten sowie Zellulose.....- 77 -*

*Tabelle 5-13: Gegenüberstellung der tabellarischen effektiven Wärmekapazitäten von Holz, flexibler Holzfaserdämmung, Holzfaserplatten sowie Zellulose .....- 79 -*

*Tabelle 7-1: Ermittelte Grundschutzzeiten der untersuchten Dämmstoffe .....- 86 -*

*Tabelle 7-2: Grundisolationszeit der „isolierenden“ Holzfaserplatten.....- 86 -*

*Tabelle 7-3: Positionsbeiwerte für die beanspruchte Seite einer schützenden Schicht.....- 87 -*

*Tabelle 7-4: Positionsbeiwerte für die beanspruchte Seite einer Isolations-schicht .....- 87 -*

*Tabelle 7-5: Positionsbeiwerte für die unbeanspruchte Seite einer schützenden Schicht.- 87 -*

*Tabelle 7-6: Korrekturzeiten für Gipsplatten Typ F oder Gipsfaserplatten gemäß Schleifer .....- 88 -*

*Tabelle 7-7: Versagenszeiten von Holzfaserplatten .....- 90 -*

*Tabelle 7-8: Versagenszeiten der Holzfaserplatte in Abhängigkeit der Rohdichte.....- 91 -*

## Anhang A Tabellen

Tabelle A. 1: Verwendete temperaturabhängige Materialkennwerte für Steinwolle und Massivholzplatten

Steinwolle						Massivholzplatte					
Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte $D=30 \text{ kg/m}^3$		Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte $D=450 \text{ kg/m}^3$	
$T$ [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	$T$ [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T$ [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	$T$ [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,036	20	880	20	1,0*D	20	0,12	20	1790	20	1,06*D
100	0,047	100	1040	100	1,0*D	100	0,3	100	1790	100	1,06*D
200	-	200	1160	200	0,98*D	110	0,23	110	30796	110	1,03*D
400	0,392	400	1280	400	0,977*D	120	0,15	120	1790	120	1,00*D
600	0,653	600	1355	600	0,973*D	200	0,18	200	1790	200	1,00*D
800	1,002	800	1430	800	0,97*D	275	0,14	275	6173	275	0,62*D
925	1,306	925	1477	925	0,96*D	350	0,09	350	690	350	0,24*D
1200	1,959	1200	1580	1200	0,887*D	500	0,11	500	690	500	0,22*D
-	-	--	-	-	-	800	0,35	800	690	800	0,18*D
-	-	-	-	-	-	1200	2,0	1200	690	1200	0,12*D

Tabelle A. 2: Verwendete temperaturabhängige Materialkennwerte für Spanplatten und Gipsplatten (GKF)

Spanplatte						Gipsplatten					
Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte $D=580 \text{ kg/m}^3$		Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte $D=800 \text{ kg/m}^3$	
$T$ [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	$T$ [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T$ [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	$T$ [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	$T$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	20	1790	20	1,06*D	20	0,4	20	960	20	1,0*D
100	0,3	100	1790	100	1,06*D	70	0,4	70	960	70	1,0*D
110	0,23	110	30796	110	1,03*D	100	0,27	100	960	100	1,0*D
120	0,15	120	1790	120	1,00*D	130	0,13	130	14915	130	0,93*D
200	0,18	200	1790	200	1,00*D	140	0,13	140	25207	140	0,90*D
275	0,14	275	6173	275	0,62*D	150	0,13	150	21764	150	0,88*D
350	0,09	350	690	350	0,24*D	170	0,13	170	960	170	0,83*D
500	0,11	500	690	500	0,22*D	600	0,13	600	960	600	0,83*D
800	0,35	800	690	800	0,18*D	720	0,33	720	4359	720	0,79*D
1200	2,0	1200	690	1200	0,12*D	750	0,38	750	960	750	0,78*D
-	-	--	-	-	-	1000	0,8	1000	960	1000	0,78*D
-	-	-	-	-	-	1200	2,37	1200	960	1200	0,78*D

Tabelle A. 3: Verwendete temperaturabhängige Materialkennwerte für OSB-Platten und Glaswolle

OSB						Glaswolle					
Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte D=x kg/m <sup>3</sup>		Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärmekapazität		Rohdichte D=x kg/m <sup>3</sup>	
T [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	T [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	$\lambda$ [W/(m K)]	T [°C]	$c_p$ [J/(kg K)]	T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	20	1790	20	1,06*D	20	0,035	20	1200	20	1,0*D
100	0,3	100	1790	100	1,06*D	100	0,068	100	1340	100	0,98*D
110	0,23	110	30796	110	1,03*D	200	0,11	200	1380	200	0,96*D
120	0,15	120	1790	120	1,00*D	300	0,151	300	1382	300	0,94*D
200	0,18	200	1790	200	1,00*D	400	0,192	400	1384	400	0,94*D
275	0,14	275	6173	275	0,62*D	510	0,238	510	1386	510	0,94*D
350	0,09	350	690	350	0,24*D	660	0,3	660	1389	660	0,94*D
500	0,23	500	690	500	0,22*D	1200	100	1200	1400	1200	0,94*D
800	0,74	800	690	800	0,18*D						
1200	4,2	1200	690	1200	0,12*D						
-	-	--	-	-	-						
-	-	-	-	-	-						

## Anhang B Abbildungen

Weitere Kleinbrandversuche:



Abbildung A. 1: Versuchskörper V1 einer 60 mm dicken flexiblen Holzfaserdämmung geschützt mittels Metallzaun 6 Eck-Geflecht und hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

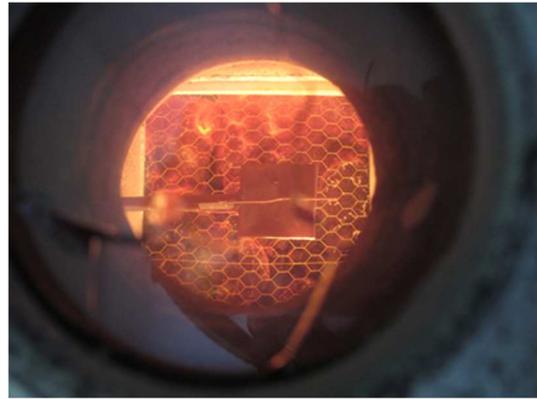


Abbildung A. 2: Versuchskörper V1 nach ca. 12 Minuten unter Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)



Abbildung A. 3: Versuchskörper V3 einer 60 mm dicken Zelluloseeinblasdämmung geschützt mittels Metallzaun 6 Eck-Geflecht und hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

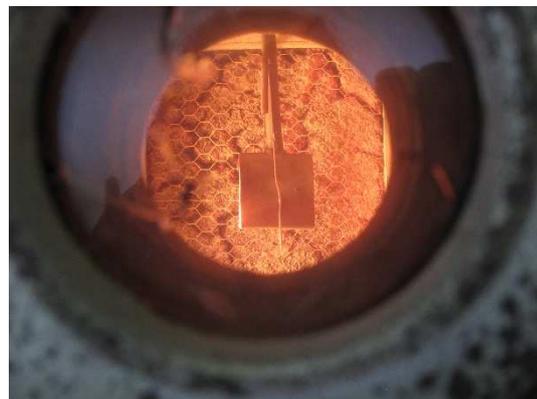


Abbildung A. 4: Versuchskörper V3 nach ca. 10 Minuten unter Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

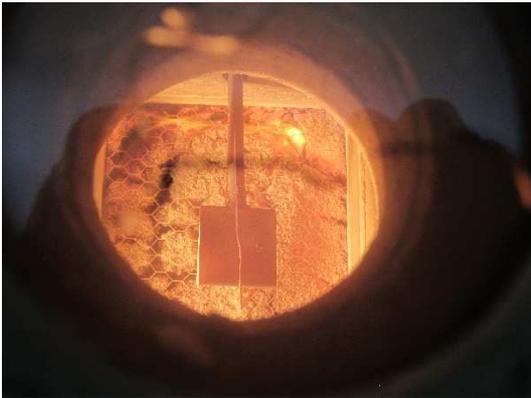


Abbildung A. 5: Versuchskörper V3 nach ca. 16 Minuten unter Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)



Abbildung A. 6: Versuchskörper V4 einer 60 mm dicken Holzfaserdämmplatte (Typ: Steico Protect Typ M) hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte



Abbildung A. 7: Versuchskörper V4 nach ca. 54 Minuten unter Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

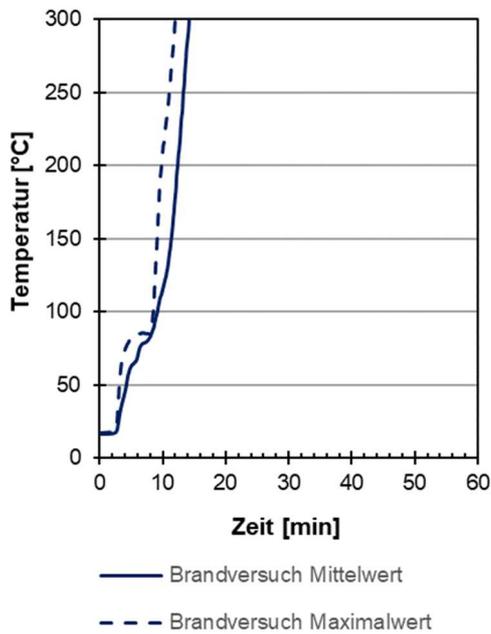


Abbildung A. 8: Temperatur-Zeit-Kurve V1 einer 60 mm dicken flexiblen Holzfaserdämmung hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

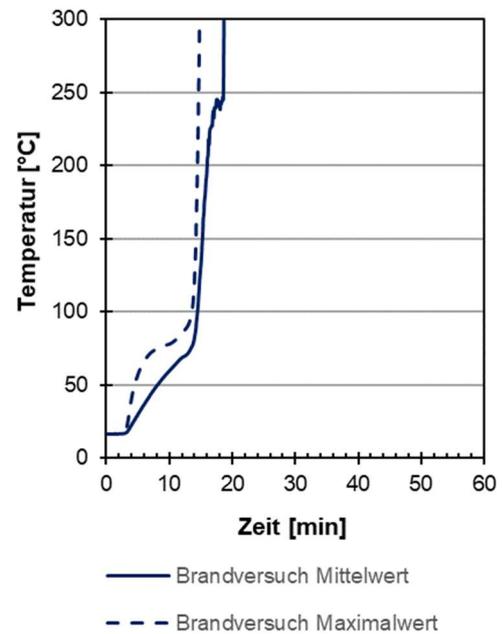


Abbildung A. 9: Temperatur-Zeit-Kurve V3 einer 60 mm dicken Zelluloseeinblasdämmung hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

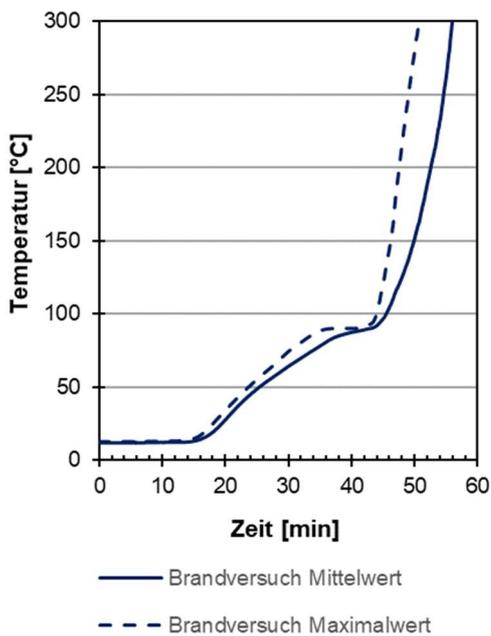


Abbildung A. 10: Temperatur-Zeit-Kurve V4 einer 60 mm dicken Holzfaserplatte (Typ: Steico Protect Typ M) hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

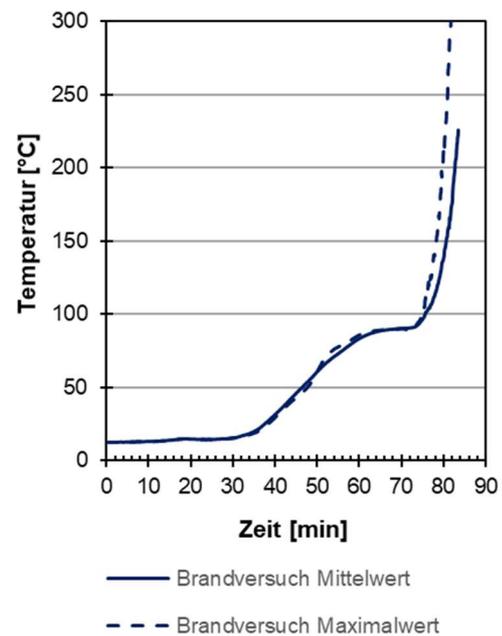


Abbildung A. 11: Temperatur-Zeit-Kurve V5 einer 100 mm dicken Holzfaserplatte (Typ: Steico Protect Typ M) hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

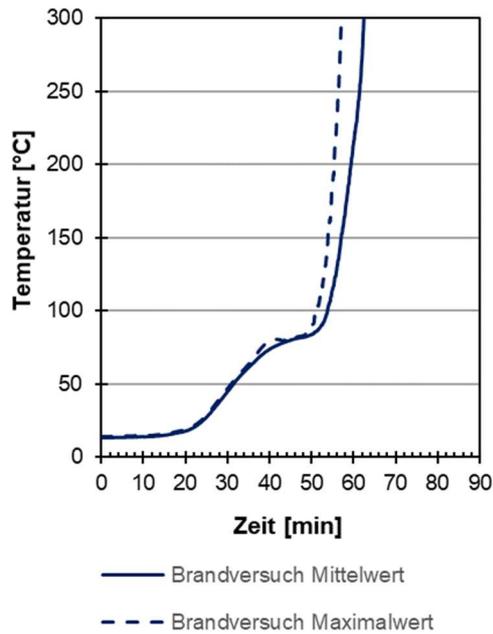


Abbildung A. 12: Temperatur-Zeit-Kurve V6 einer 100 mm dicken Holzfaserplatte (Typ: Steico Protect Typ M dry) hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte

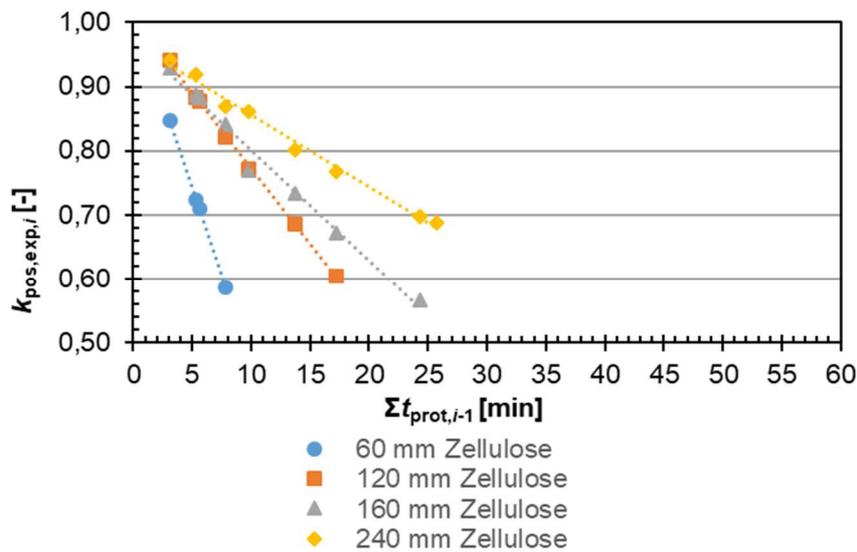


Abbildung A. 13: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für Zellulosedämmstoffe

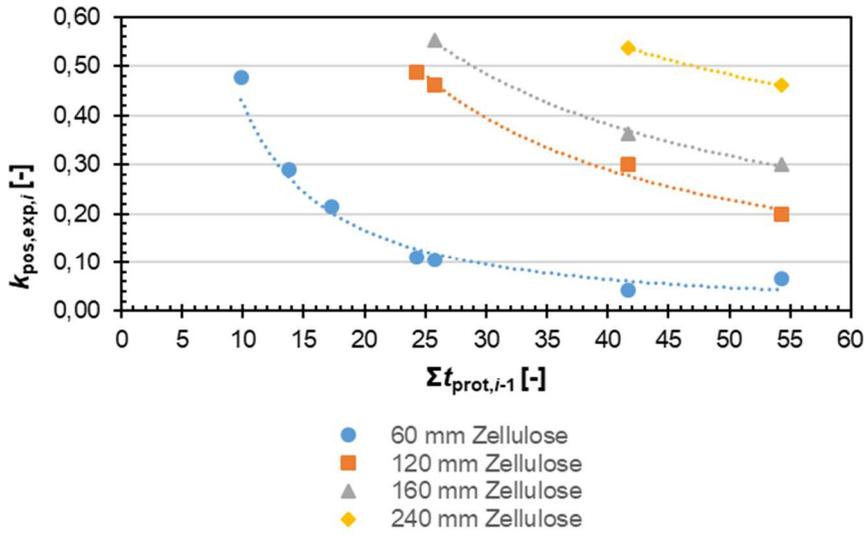


Abbildung A. 14: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für Zellulosedämmstoffe

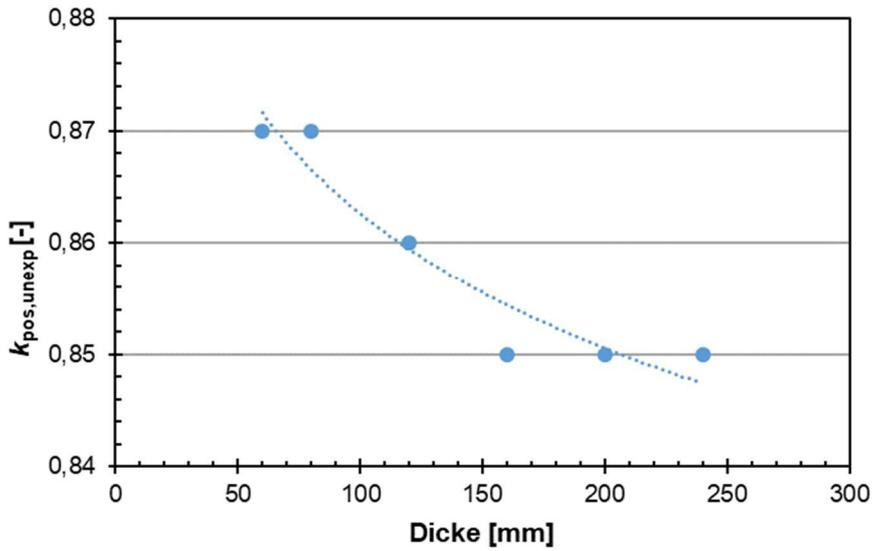


Abbildung A. 15: Positionsbeiwert für die brandabgewandte Seite  $k_{\text{pos,unexp},i}$  für Zellulosedämmstoffe

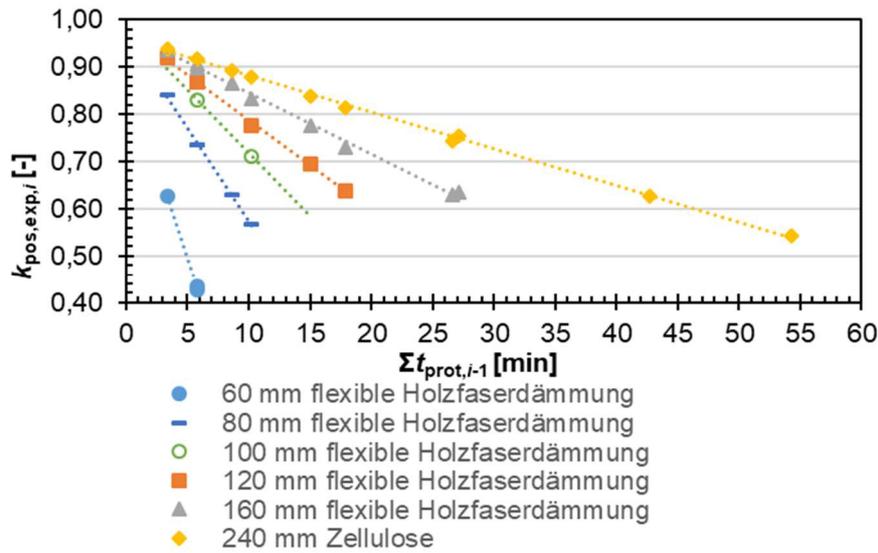


Abbildung A. 16: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für flexible Holzfaserdämmstoffe

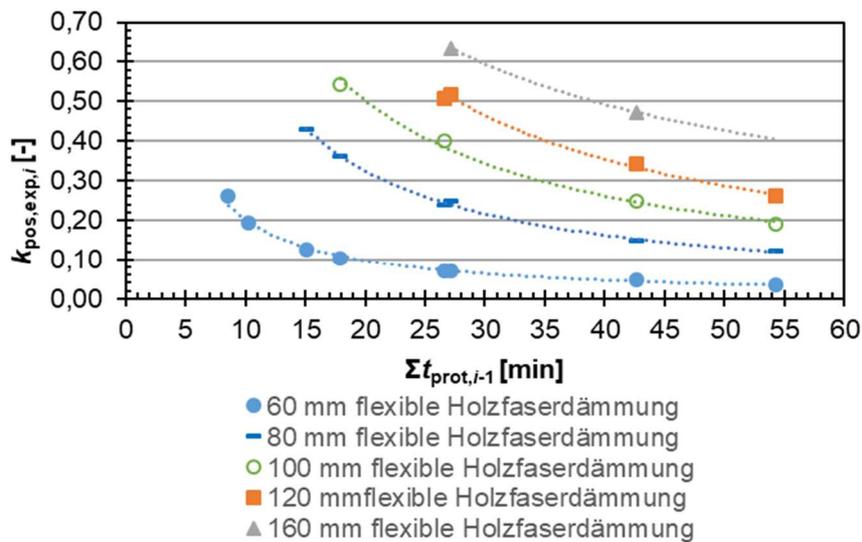


Abbildung A. 17: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für flexible Holzfaserdämmstoffe

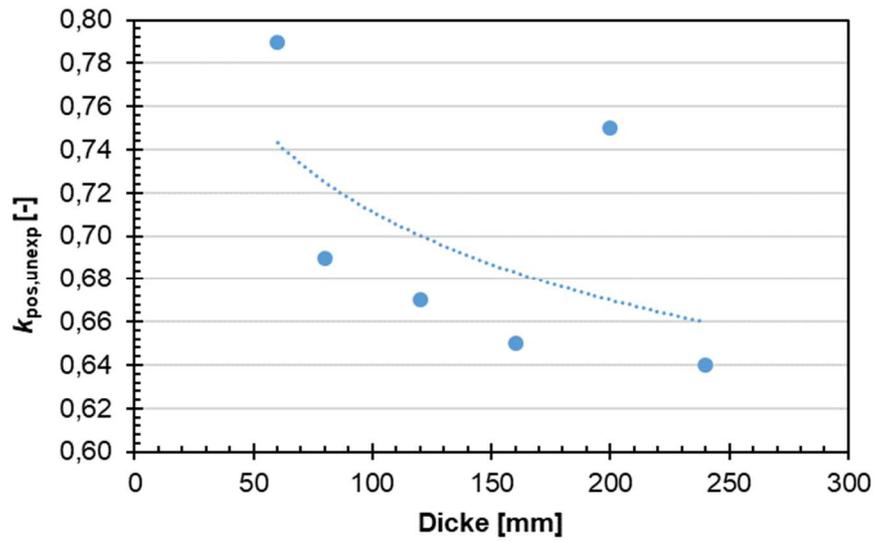


Abbildung A. 18: Positionsbeiwert für die brandabgewandte Seite  $k_{\text{pos,unexp},i}$  für flexible Holzfaserdämmstoffe

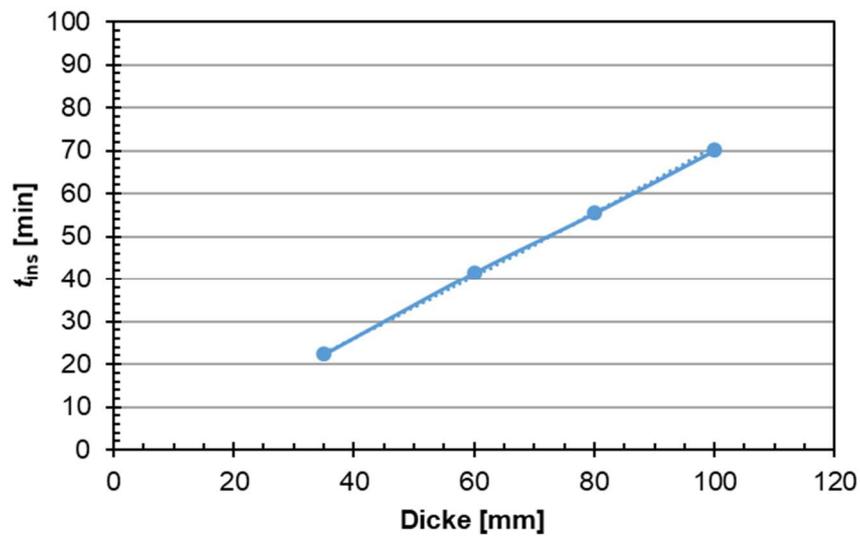


Abbildung A. 19: Grundisolationszeit  $t_{\text{ins}}$  der „isolierenden“ Holzfasерplatten

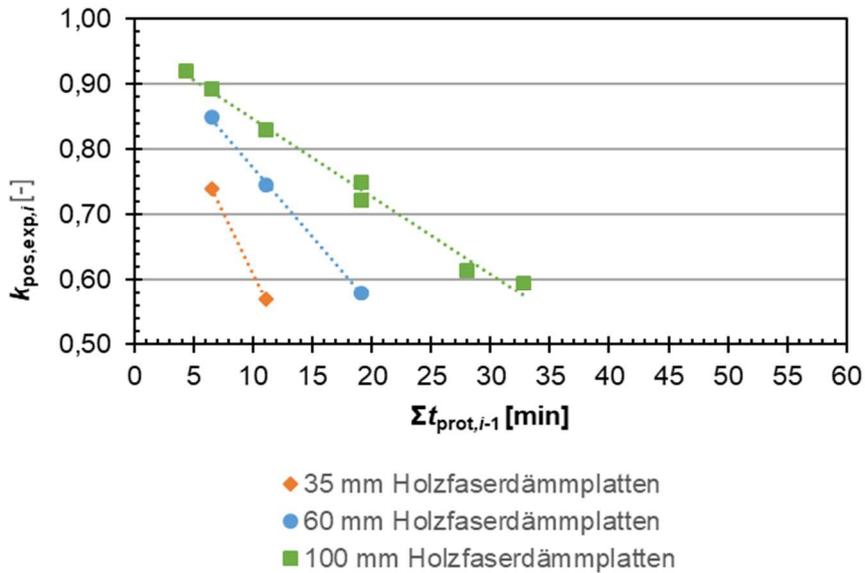


Abbildung A. 20: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für Holzfaserplatten als Isolationsschicht

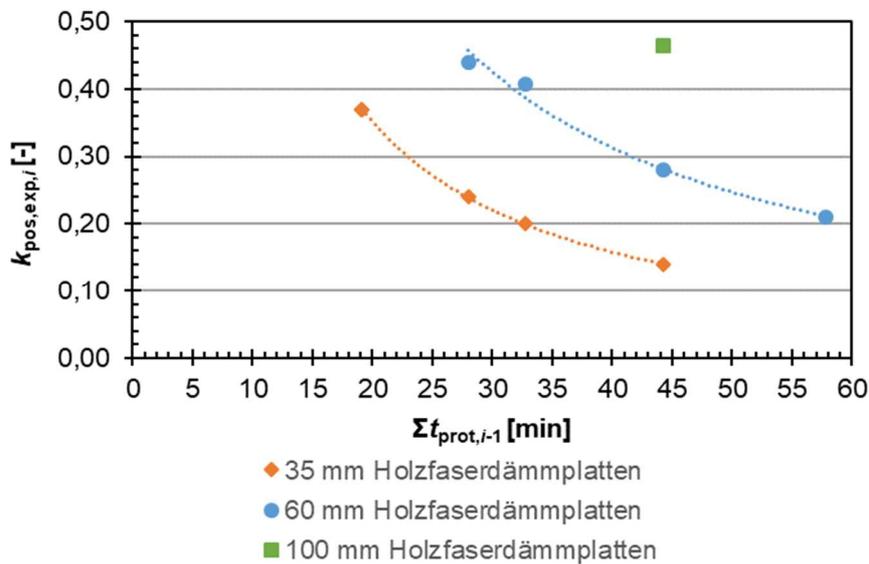


Abbildung A. 21: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{ins},0,i}}{2}$  für Holzfaserplatten als Isolationsschicht

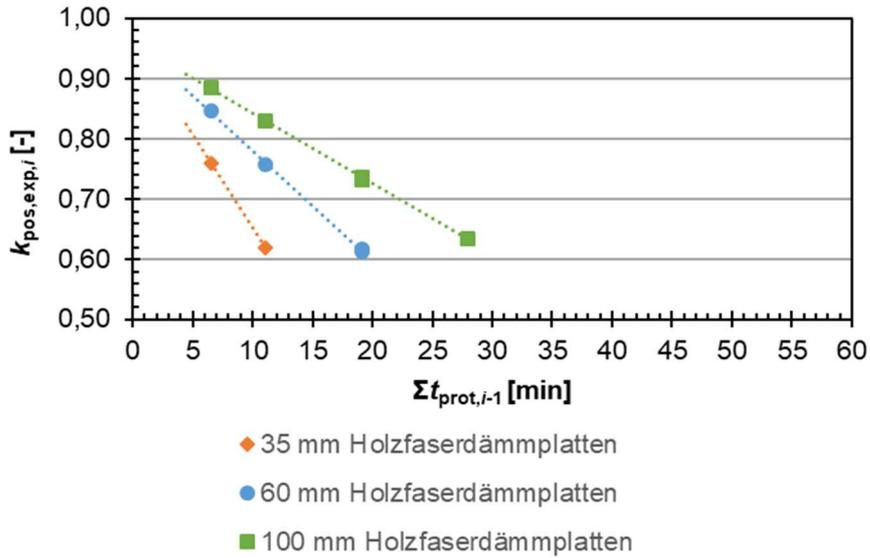


Abbildung A. 22: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für Holzfaserplatten als schützende Schicht

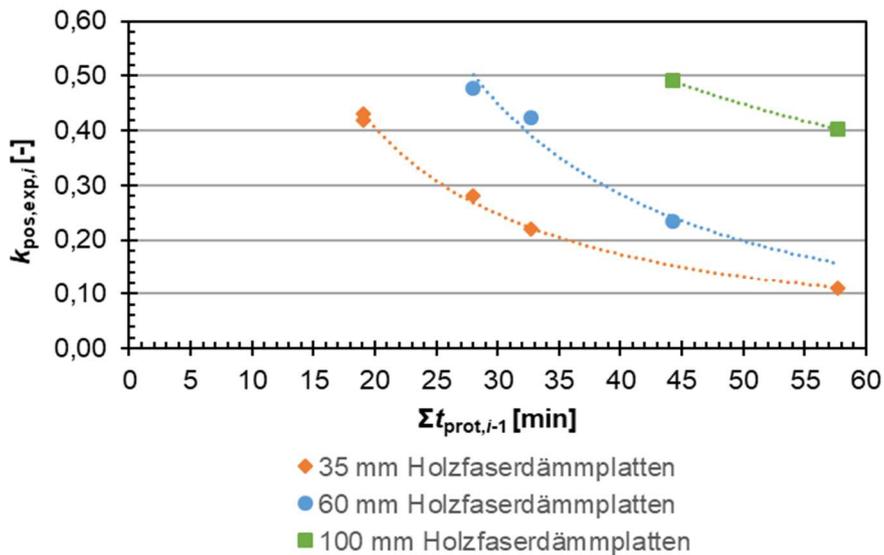


Abbildung A. 23: Positionsbeiwert für die brandbeanspruchte Seite  $k_{\text{pos,exp},i}$  für  $\Sigma t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2}$  für Holzfaserplatten als schützende Schicht

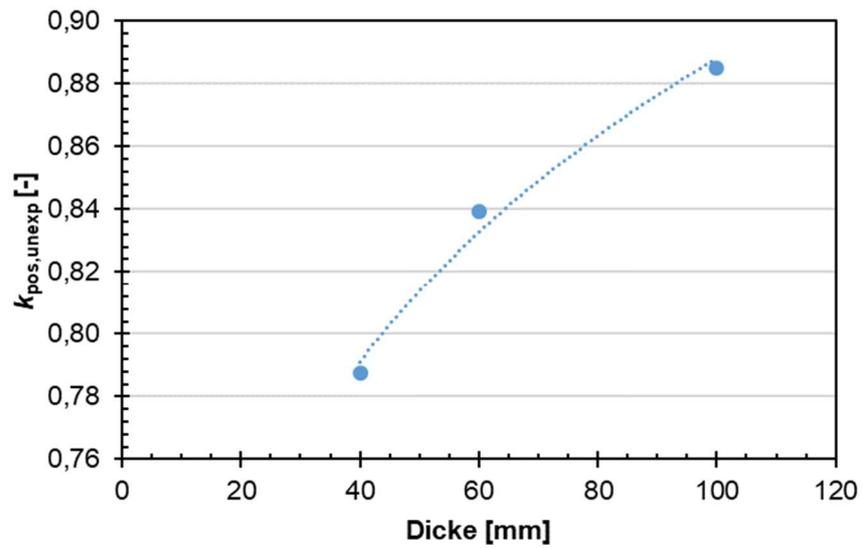


Abbildung A. 24: Positionsbeiwert für die brandabgewandte Seite  $k_{\text{pos,unexp},i}$  für Holzfaserverplatten