

SABINE SCHEIDEL

Nachweisführung für  
Holzrahmenkonstruktionen  
mit einer Feuerwiderstandsdauer  
von 90 Minuten anhand  
Finite-Elemente-Simulationen

Schriftenreihe des  
Fachgebiets Bauphysik  
Energetische Gebäudeoptimierung  
Herausgeber Prof. Dr. Oliver Kornadt  
Band 07

---

Dissertation  
Bauingenieurwesen  
Januar 2024

R  
TU  
P Rheinland-Pfälzische  
Technische Universität  
Kaiserslautern  
Landau

# Nachweisführung für Holzrahmenkonstruktionen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten anhand Finite-Elemente-Simulationen

---

Beim Fachbereich Bauingenieurwesen der Rheinland-Pfälzischen Technischen  
Universität Kaiserslautern-Landau zur Verleihung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von

**Sabine Scheidel, M.Eng., M.A.**

05.01.2024



Dekan: Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer

1. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt
2. Berichterstatterin: apl. Prof. Dr. rer. nat. Svenja Carrigan

Tag der mündlichen Prüfung: 19.03.2024

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnd.ddb.de>

Herausgeber: Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung  
Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt  
  
Postfach 3049  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
67663 Kaiserslautern

Verlag: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Druck: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
Dezernat 5 Technik  
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Die Herausgeberin, Sabine Scheidel, Winnweiler 2024

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

ISSN: 2363-8206

ISBN: 978-3-95974-222-1

Dem Feuer sind die Regeln zur Verhütung des Feuers egal.

*~ Pavel Kosorin ~*

Ich widme diese Arbeit meinen beiden Töchtern Aurelia und Emma, um ihnen Mut zu machen, an ihren Träumen und Wünschen festzuhalten und sich auch durch schwierige Phasen des Lebens nicht entmutigen zu lassen.



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Baulicher Brandschutz der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau. Für die Möglichkeit, die Anstellung und auch die Promotion am Lehrstuhl wahrnehmen zu können, bedanke ich mich ganz besonders bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt. Ebenso für seine Betreuung dieser Arbeit und der aufgebrauchten Zeit, um Fragen und Probleme mit mir zu diskutieren und neue Lösungswege zu entwickeln, was wesentlich zum Gelingen beitrug.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen aus den Fachgebieten Baulicher Brandschutz und Bauphysik bedanken. Die vielen wertvollen fachlichen und persönlichen Gespräche halfen mir auf viele Weise auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Arbeit weiter. Weiterhin geht ein Dank an die Mitarbeiter der Labore, die maßgeblich an der Durchführung und auch dem Erfolg der Brandversuche beteiligt waren. Ebenso möchte ich unseren studentischen Hilfskräften für ihre großartige Unterstützung bei der Durchführung von Brandversuchen und der damit verbundenen Arbeit bei Vor- und Nachbereitung danken. In diesem Zuge seien auch die Studierenden erwähnt, die mit studentischen Arbeiten einen großen Beitrag zu dem erfolgreichen Abschluss des Projektes und dieser Arbeit leisteten.

Vielen Dank auch an all diejenigen, die sich die Mühe gemacht haben, diese Arbeit Korrektur zu lesen, was sicherlich nicht immer leicht war.

Zuletzt möchte ich meinen Freunden und ganz besonders meiner Familie danken. Meinen Eltern danke ich ganz besonders dafür, dass sie immer an mich glauben und mir immer mit ihrer Hilfe, egal in welchen Bereichen, zur Verfügung stehen. Meinem Mann Marco danke ich dafür, dass er mich auch bei dieser Herausforderung immer unterstützt hat und mir Mut gemacht hat, den Weg immer weiterzugehen.

## Kurzzusammenfassung

Im Bauwesen sind in vielen Bereichen Nachweise erforderlich, um die Leistungen von Bauteilen, Systemen oder des Gebäudes zu bescheinigen. So sind neben Standsicherheitsnachweisen auch Schallschutz-, Wärmeschutz- oder Brandschutznachweise gängige Forderungen in einem Genehmigungsverfahren. Brandschutznachweise können dabei in zwei unterschiedlichen Bereichen angefertigt werden. So können Brandrisiken, -gefahren oder -verläufe Bestandteil solcher Nachweise sein, aber auch Personenströme oder die allgemeine Erfüllung der Schutzziele durch die vorhandenen oder vorgesehenen Maßnahmen. Damit die Nachweisverfahren ein größtmögliches Maß an Genauigkeit bieten, müssen diese die Abläufe von Bränden und deren Wirkung auf die Bauteile und Baustoffe so genau wie möglich berücksichtigen. Jedes Nachweisverfahren ist daher mit den neuen Erkenntnissen über Brandverläufe und Temperaturentwicklungen zu validieren. Die Art der Nachweisführung ist dabei ebenso vielfältig wie der Gegenstand, für den diese erfolgt. Eine grundlegende Unterteilung der Nachweisführung im Brandschutzingenieurwesen erfolgt dabei in die argumentative, ingenieurmäßige Nachweisführung und die leistungsbezogene Nachweisführung, wie sie in der DIN 18009-1:2016-09 aufgeführt wird. Ist die erforderliche Leistung z.B. eines Bauteils durch die Einhaltung einer Technischen Baubestimmungen oder eines anderen Regelwerkes bescheinigt, wird dies als präskriptives Nachweisverfahren bezeichnet.

Nach derzeit geltenden Regelwerken ist die Anwendung von Bauteilen mit einer brandschutztechnischen, raumabschließenden Funktion in Holztafelbauweise nur bis zur Gebäudeklasse 4 geregelt. Die aktuellen Nachweismöglichkeiten durch additive Berechnungsverfahren, wie sie in der DIN EN 1995-1-2:2010 aufgeführt sind, schließen, wie auch die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise, eine Ausführung von Holztafelbauteilen in Gebäudeklasse 5 Objekten nicht mit ein. Daher sind aktualisierte Nachweismethoden erforderlich, die die Feuerwiderstandsdauer eines Holzrahmenbauteils mit großer Genauigkeit bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von min. 90 Minuten aufzeigen können. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit das Nachweisverfahren der *schichtweisen Bauteilsimulation* entwickelt. Dieses beschreibt FEM-basierte, thermisch-transiente Simulationen, die über die grafische Benutzeroberfläche des Simulationsprogrammes ausgeführt werden können, ohne weitere Eingaben in der Programmiersprache des Simulationsprogrammes vorsehen zu müssen. Dabei werden die erforderlichen Schutz- und Isolationszeiten jeder Bauteilschicht einzeln ermittelt und anschließend unter Berücksichtigung einer Vorerwärmung durch vorangegangene Schichten

aufaddiert. Validiert wurde das Verfahren anhand durchgeführter Brandversuche sowohl im Klein- als auch im Großbrandofen. Die Genauigkeiten des neuen Simulationsverfahren übertreffen dabei die der untersuchten Berechnungsverfahren deutlich. Zur sicheren Anwendung wird am Ende dieser Arbeit ein Leitfaden zur Durchführung der *schichtweisen Bauteilsimulation* aufgeführt.

## Abstract

In many areas in the construction industry, verifications are required to certify building components, systems or buildings. Apart from stability certificates as common requirements in an approval procedure, sound insulation, thermal insulation or fire protection certificates exist. The latter can be drawn up as fire risks, hazards or progressions. Other possible requirements are the flows of people or the general fulfilment of the protection goals by the existing or planned measures. To ensure that the detection methods offer the greatest possible degree of accuracy, they must take into account the processes of fires and their effect on the components and building materials as accurately as possible. Every verification method is therefore validated with the new findings on fire progression and temperature developments. The type of verification is just as diverse as the object for which it is carried out. A basic subdivision of the verification in fire protection engineering is laid out in the argumentative engineering verification and the performance-related verification as listed in DIN 18009-1:2016-09. If the required performance of a building component e.g. is certified by compliance with technical building regulation or another set of rules, this is referred to as prescriptive verification procedure.

Current valid regulations have only regulated the use of timber components for separation function panels under fire exposure up to building class 4. The additive calculation method which is listed in DIN EN 1992-1-2:2010 as well as the model guideline on fire protection requirements for building components and exterior wall cladding in timber construction (MHolzBauR) doesn't include a design of timber panel building components in building class 5 objects. Therefore, updated verification methods are required to show the fire resistance duration of a timber frame component with great accuracy up to a fire resistance duration of up to 90 minutes. For this purpose, the verification method of *layer-by-layer component simulation* has been developed within the scope of this work. It describes a FEM-based thermal transient simulation that can be carried out via the graphical user interface of the simulation programme without having to provide further input in the programming language of the simulation programme. The required protection and insulation times of each component layer are determined individually and then added up, taking into account the pre-heating by previous layers. The method was validated by fire tests in small and large furnaces. The accuracy of the new simulation method clearly exceeds that of the calculation methods examined. For safe application, a guideline for the implementation of the *layer-by-layer component simulation* is given at the end of this paper.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	II
Kurzzusammenfassung .....	III
Abstract.....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
Glossar/Definitionen.....	XI
Symbole .....	XV
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Ziele .....	2
1.3 Methodik.....	3
2 Wissenschaftliche Bedeutung von Nachweisverfahren.....	4
2.1 Brandschutzingenieurmethoden.....	4
2.2 Leistungsbezogene Nachweisführung.....	5
2.3 Bedeutung der Nachweisverfahren für die Wissenschaft.....	6
3 Grundlagen des Brandschutzes im Bauordnungsrecht.....	8
3.1 Musterbauordnung.....	8
3.2 Holzbaurichtlinie .....	13
3.3 Additive Berechnungsverfahren.....	15
4 Holztafelbau und Brandschutz .....	25
4.1 Warum Holzbau?.....	25
4.2 Einblick in die Holztafelbauweise .....	28
4.3 Holz unter Brandbeanspruchung – thermodynamische Grundlagen .....	30
4.4 Gefahren und Risiken von Gefachbränden .....	47

5	Experimentelle Materialuntersuchungen zu Schutz- und Isolationszeiten anhand von Kleinbrandversuchen.....	49
5.1	Schutzzeiten.....	49
5.2	Isolationszeiten.....	49
5.3	Experimentelle Untersuchungen zum Branddurchgang im Bereich der Gefache .....	50
5.4	Auswertung der experimentellen Versuchsreihe mit Brandbeanspruchung.....	60
5.5	Berechnung der Schutz- und Isolationszeiten .....	66
5.6	Finite-Elemente-Simulationen zur Ermittlung geeigneter Materialparameter.....	74
5.7	Fazit der Materialuntersuchungen.....	83
6	Entwicklung eines FE-Modells zur Simulation der Feuerwiderstandsdauer raumabschließender Holzrahmenbauteile .....	84
6.1	Probleme „einfacher“ FEM-Simulationen .....	84
6.2	Schrittweise FEM-Simulationsverfahren.....	85
6.3	Ermittlung von Feuerwiderstandsdauern von 90 Minuten anhand entwickeltem Simulationsverfahren .....	101
7	Numerische Nachweisverfahren von Feuerwiderständen mehrschichtiger Holztafelbauteilen.....	107
7.1	Möglichkeiten der Numerischen Nachweisverfahren.....	107
7.2	Vor- und Nachteile der schichtweisen Bauteilsimulation.....	108
7.3	Anwendbarkeit und Anwendungsgrenzen des erarbeiteten Verfahrens .....	110
8	Zusammenfassung.....	112
8.1	Fazit.....	112
8.2	Ausblick.....	114
	Literatur .....	116
	Abbildungsverzeichnis.....	126
	Tabellenverzeichnis.....	129

Inhaltsverzeichnis

Anhang A: Materialkennwerte Simulationen.....	131
Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren .....	146
Anhang C: Leitfaden zur Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation.....	159
Aufbau des Simulationsmodells .....	159
Durchführung der Bemessung anhand schrittweiser Bauteilsimulation.....	162
Anhang D: Excel-Sheet zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion.....	166
Lebenslauf.....	170
Veröffentlichungen .....	171
Eidesstattliche Erklärung .....	173

## Abkürzungsverzeichnis

### A

ANSYS	ANalysis SYstem Swanson
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft des Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesens des Vereinigten Wirtschaftsgebiets

### C

CAM	Component Additive Method, Entwickelt von Vanessa Schleifer an der ETH in Zürich
CFD	Computational Fluid Dynamics

### D

DSH	Dreischichtholzplatten
-----	------------------------

### E

ETK	Einheitstemperaturbrandkurve/Einheitstemperaturzeitkurve [°C]
-----	---

### F

FEM	Finite-Elemente-Methode
-----	-------------------------

### G

GFP	Gipsfaserplatte
GKB	Gipskartonplatte oder auch Gipskarton-Bauplatte
GKF	Gipskarton-Feuerschutzplatte
GUI	graphical user interface (dt.: graphische Benutzeroberfläche)

### M

MBO	Musterbauordnung
M-HFHolzR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise



## Abkürzungsverzeichnis

MHolzBauR      Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise

### **R**

RPTU            Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

### **S**

SFM            Separating Function Method

## **Glossar/Definitionen**

### Anwendbarkeitsnachweis

Anwendbarkeitsnachweise werden für Bauarten ausgestellt. Hierunter zählen die „allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)“, die „vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG)“, und das „allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis (abP)“ für die entsprechende Bauart.

### Backdraft

Als „Backdraft“ wird die schlagartige Durchzündung der in einem mit Sauerstoff unterversorgtem, aufgeheiztem Brandraum befindlichen Rauchgase und Gegenstände durch das Öffnen der Umfassungsbauteile (z.B. Tür oder Fenster) bezeichnet.

### Baustoffklasse

Baustoffe werden anhand ihrer brennbaren Eigenschaften in Klassen eingeteilt. Diese werden auf nationaler Ebene durch die DIN 4102-1 und auf europäischer Ebene durch die DIN EN 13501-1 definiert. Jeder Baustoff kann in eine der Baustoffklassen eingeteilt werden. Unterschieden wird im bauordnungsrechtlichen Sinne zwischen nichtbrennbaren, schwerentflammbaren, normalentflammbaren und leichtentflammbaren Baustoffen. Die Normungen kennen weitere Unterteilungen.

### Brandlast

Brennbare Materialien in einem Raum, die sich bei einem Brand entzünden können, werden als Brandlast bezeichnet. Dabei wird unterschieden zwischen mobiler Brandlast (Gegenstände, Möbel, etc.) und immobiler Brandlast (Bauteile).

### Darrrohdichte

Die Darrrohdichte bezeichnet die Rohdichte eines Stoffes (z.B. Holz) in darrtrockenem Zustand. Als darrtrocken wird ein Stoff angesehen, wenn die ursprünglich darin enthaltene Feuchtigkeit vollständig vertrocknet ist.

### Durchzündung

Die Durchzündung bezeichnet eine Kategorie der Brandphänomene, bei denen es aufgrund der bei einem Brand abgegebenen Wärme und des Sauerstoffentzuges zu einem plötzlichen Übergang in die Vollbrandphase des Brandraumes kommt. Hierbei wird unterschieden zwischen einem Flashover, einem Rollover und einem Backdraft.

## Emissionsgrad

Der Emissionsgrad beschreibt das Strahlungsverhältnis zwischen einem „schwarzen“ und einem „grauen“ Strahler. Als „Strahler“ werden Körper bezeichnet, deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegen und die daher Wärmestrahlung absondern. „Schwarze Körper“ absorbieren dabei die gesamte, auf ihn auftreffende Strahlung (Emissionsgrad = 1). „Weiße Körper“ reflektieren die auf ihn auftreffende Strahlung zu 100% (Emissionsgrad = 0). Für graue Körper liegt der Emissionsgrad zwischen 0 und 1.

## Enthalpie

Die Enthalpie (H), bezeichnet die Summe aus innerer Energie (U) und dem Produkt aus Druck (p) und Volumen (V) in der Einheit [J].

## Feuerübersprung (Flashover)

Als „Feuerübersprung“ oder auch „Flashover“ wird die schlagartige Entzündung der, in einem Brandraum befindlichen Brandlast durch thermische Aufheizung bezeichnet. Ein direkter Kontakt mit dem Brand ist nicht erforderlich.

## Finite-Elemente-Methode

Mit Finite-Elemente-Methode wird eine numerische Untersuchung eines Bereiches mit einer endlichen (finiten) Anzahl an Elementen bezeichnet.

## Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV-TB)

In der vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) herausgegebenen Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen werden die Vorgaben der Musterbauordnung konkretisiert und mit den Technischen Baubestimmungen wie z.B. der DIN 4102 oder DIN EN 13501 verknüpft. Dadurch können die bauaufsichtlich eingeführten Begrifflichkeiten an die Klassifizierungen der Technischen Baubestimmungen geknüpft werden. Die MVV TB ist in jedem Bundesland eingeführt und somit rechtskräftig. Eine Liste der eingeführten Technischen Baubestimmungen der Bundesländer ist im Anhang der jeweiligen Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen des Bundeslandes gegeben.

## Pyrolyse

Die Pyrolyse, umgangssprachlich Verkohlung, bezeichnet den Zersetzungsprozess von Stoffen (hier Holz) unter Einwirkung von hohen Temperaturen

## Rähm

Als „Rähm“ wird bei der Holzrahmen- oder auch Holztafelbauweise der obere, horizontal verlaufende Holzbalken bezeichnet, der mit dem unteren Abschluss, der Schwelle, und den dazwischenliegenden, senkrechten Stützen, die Rahmenkonstruktion bildet.

## Rollover

Bei einem Rollover sammeln sich die in einem Brandraum entstehenden Rauchgase an der Decke, wodurch eine heiße Rauchgasschicht und eine kalte Luftschicht entstehen. Die brennbaren Bestandteile der Rauchgasschicht können aufgrund der extremen Temperatur bei Kontakt mit Sauerstoff beginnen zu brennen. Dies kann dazu führen, dass sich die Rauchgase wie eine Feuerwalze entzünden und den Deckenbereich in Brand setzen.

## Schutzzeit

Die Schutzzeit gibt die Dauer an, in der die Temperatur auf der brandabgewandten Seite eines Materials bei einer Brandbeanspruchung um 250K im Mittel oder 270K punktuell ansteigt und somit eine einsetzende Pyrolyse der dahinterliegenden Holzbauteile ausgeschlossen werden kann.

## Schwelen

Unter Schwelen wird eine unvollständige Verbrennung aufgrund fehlenden Sauerstoffs unter einer geringen Verbrennungstemperatur verstanden.

## Schwelle

Als „Schwelle“ bezeichnet man bei Holzrahmen- bzw. Holztafelkonstruktionen den unteren Abschluss eines Holzrahmen-/Holztafelelementes.

## Verwendbarkeitsnachweis

Verwendbarkeitsnachweise werden für Bauprodukte ausgestellt. Hierunter zählen die „allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)“, das „allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis (abP)“ und die „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“.

## Wärmeeindringkoeffizient

Der Wärmeeindringkoeffizient ( $b$ ) ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ), der Dichte ( $\rho$ ) und der spezifischen Wärmekapazität ( $c$ ) eines Materials und wird in der Einheit  $J/Km^2\sqrt{s}$  angegeben. Der Wert gibt eine Aussage darüber, wie schnell die Wärme von der Oberfläche des Stoffes nach innen weitergeleitet wird. Stoffe mit einem geringen Wärmeeindringkoeffizienten werden als warm empfunden. Stoffe mit hohen Wärmeeindringkoeffizienten dagegen als kalt.

### Wärmestrom

Mit Wärmestrom ( $\Phi$ ) wird die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit übertragene wird [W] bezeichnet.

### Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübertragungskoeffizient bezeichnet die pro Sekunde und Quadratmeter übertragene Wärmemenge bei einer Temperaturdifferenz von 1 K.

## Symbole

### Lateinische Symbole

$c$	Wärmekapazität [J/kgK]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]
$k_j$	Fugenbeiwert [o.D.]
$k_{pos}$	Positionsbeiwert; berücksichtigt die Lage der betrachteten Schicht innerhalb des Bauteils [o.D.]
$k_{pos,exp}$	Positionsbeiwert; berücksichtigt die Schutzwirkung vorheriger Bauteilschichten auf betrachtete Bauteilschicht [o.D.]
$k_{pos,unexp}$	Positionsbeiwert; berücksichtigt die Wärmedämmwirkung folgender Bauteilschichten auf betrachtete Bauteilschicht [o.D.]
$\Delta t_i$	zeitliche Differenz zur Berücksichtigung der verzögerten Abfallzeit vorheriger Bauteilschichten zur betrachteten Bauteilschicht [min]
$T$	Temperatur [°C]
$t$	Zeit (Dauer) [min]
$t_{ins}$	Isolationszeit; Zeitpunkt der Temperaturerhöhung auf der brandabgewandten Bauteilseite um 140 K/180 K vom Beginn des Brandes ab [min]
$t_{ins,0}$	Grundisolationszeit; Isolationszeit ohne Berücksichtigung erforderlicher Beiwerte [min]
$t_{ins,i}$	Isolationszeit der äußersten, brandabgewandten Bauteilschicht (Schicht i) [min]
$t_{prot}$	Schutzzeit; Zeitpunkt der Temperaturerhöhung auf der brandabgewandten Bauteilschicht um 250 K/270 K [min]
$t_{prot,0}$	Grundschutzzeit; Schutzzeit ohne Berücksichtigung erforderlicher Beiwerte [min]
$t_{prot,i-1}$	Schutzzeiten der betrachteten Bauteilschichten i-1, ohne Berücksichtigung der äußersten brandabgewandten Bauteilschicht [min]
$t_{prot,n}$	Schutzzeit der betrachteten Schicht n [min]

## Symbole

$t_{req}$	Geforderte Feuerwiderstandsdauer des Bauteils zur Sicherstellung der raumabschließenden Funktion [min]
$t_n$	Zeit letzter Schicht unbekannter Anzahl [min]
$t_{n-1}$	Zeit vorletzter Schicht unbekannter Anzahl [min]
$U$	Innere Energie [J]
$Q$	Wärmeenergie [J]
$W$	Arbeitsenergie, innere Wärmequellen [J/sm <sup>3</sup> ], [W/m <sup>3</sup> ]
$x, y, z$	Ortsangaben der Koordinatenachse [o.D.]

## Griechische Symbole

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient/Absorbtionsgrad [o.D.]
$\Delta$	Differenz [o.D.]
$\varepsilon$	Emissionsgrad/Emissionskoeffizient [o.D.]
$\vartheta$	Temperatur [K], [°C]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$\rho$	Rohdichte, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Sigma$	Summe [o.D.]
$\omega$	Holzfeuchte [%]

# 1 Einleitung

Die positiven Eigenschaften eines Holzbaus tragen in beiden Bereichen dazu bei, dass die Nachfrage bei Bauherren sowohl im Wohnhausbereich als auch bei Nichtwohngebäuden nach einer Bauweise in Holz seit einigen Jahre stetig ansteigt. Der Wunsch vieler nach einer umweltbewussten und nachhaltigen Lebensweise zeigt sich somit auch im Bauen und wird auch weiterhin zunehmen. Dies erfordert einen bedachten Umgang mit dem Rohstoff Holz. Zum einen muss das Gleichgewicht zwischen dem Baumbestand, der für die Baustoffproduktion und Herstellung anderer Materialien abgeholzt wird, und der Anzahl der neu angepflanzten Bäume ausgewogen sein, um negative Auswirkungen auf die Umwelt zu verhindern. Zum anderen muss bei Baustoffen aus Holz berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um ein brennbares Material handelt. Dies wird häufig als Ausschlusskriterium zur Verwendung von Holz als Hauptbaustoff bei Neubauten mit mehreren Geschossen oder einer Sondernutzung genannt. Um die Eignung dennoch aufzuzeigen sind unterschiedliche Nachweise möglich, mit denen die geforderte Leistung bescheinigt werden kann.

Die Erstellung solcher Nachweise ist oftmals sehr zeitintensiv und basiert auf unterschiedlichen Ingenieurmethoden und Nachweisverfahren, die ein breites Spektrum an Möglichkeiten bieten. So können neben den argumentativen Methoden z.B. auch Berechnungsverfahren oder auch Simulationen zur Nachweisführung genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Erbringung eines Nachweises zur brandschutztechnischen Qualität durch Brandversuche, welche durch hohen Kosten- und Zeitaufwand jedoch nicht immer zielführend sind, weshalb meistens auf bekannte Berechnungsverfahren und numerische Verfahren durch Simulationen zurückgegriffen wird. Jedes Nachweisverfahren muss hierbei den Brandverlauf und die Einwirkung der Brandtemperatur auf das Bauteil berücksichtigen, um die Auswirkungen auf die Kriterien wie Tragfähigkeit und Raumabschlussfunktion bestmöglich abzubilden damit der erforderliche Genauigkeitsgrad des Nachweisverfahrens erreicht werden kann.

## 1.1 Problemstellung

Die Bauvorschriften, bestehend aus der Musterbauordnung und ggf. erforderlicher Sonderbauvorschriften, beschreiben die Leistungen eines Bauteils. Können diese genannten, präskriptiven Anforderungen nicht erfüllt werden, kann mit Hilfe der sogenannten Brandschutzingenieurmethoden der Nachweis über die erbrachte Leistung eines Bauteils erfolgen. Soll die Bestimmung der Feuerwiderstandsqualität eines Holztafelbauteils mit raumabschließender Funktion auf Basis eines leistungsorientierten Nachweises geführt werden, erfolgt dies anhand der Technischer Regeln DIN EN 1995-1-2:2010 [1]. Der



sogenannte Eurocode 5-1-2 [1] bildet hier die Grundlage der Bemessung unter Brandbeanspruchung. Im Anhang E dieser Norm wird ein Berechnungsverfahren aufgezeigt, das sich speziell mit dem Raumabschluss von Holztafelbauteilen befasst. Die Verwendung von Holzwerkstoffen und Dämmstoffen ist hier jedoch nur mit einer eingeschränkten Materialauswahl möglich. Ein Grund, weshalb das Verfahren immer stärker in der Kritik steht und in der Überarbeitung der Norm geändert werden soll [2]. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass eine Nachweisführung nach diesem Verfahren nur für einen Feuerwiderstand von 60 Minuten vorgenommen werden kann, welcher für viele Gebäude oder auch spezielle Bauteile nicht ausreichend ist [2].

Eine Alternative bilden numerische Nachweisverfahren wie sie z.B. mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt werden kann. Bei dieser kann durch Simulationen der Nachweis erbracht werden, wie sich die Temperatursausbreitung innerhalb eines Bauteils verhält, wenn auf dieses eine Brandbeanspruchung einwirkt. Die Simulationen benötigen im Vergleich zu einem Brandversuch einen deutlich geringeren personellen und zeitlichen Aufwand und sind zudem auch kostengünstiger. Die Einarbeitung in diese Programme ist jedoch meist komplex und zeitaufwendig. Dabei muss stets auch darauf geachtet werden, die Anwendungsgrenzen solcher Programme zu berücksichtigen und Eingabefehler auszuschließen. Vor allem bei letzterem besteht die Gefahr, dass Fehler nicht oder erst spät erkannt werden. Ein ausgeprägtes Verständnis des Anwenders der Prozesse eines Brandfalls und ein gewisses Maß an Erfahrung sind dabei essenziell damit die vorliegenden Ergebnisse ihrerseits korrekt interpretiert und auf Plausibilität geprüft werden können.

Bei einer Betrachtung der raumabschließenden Funktion eines Holztafelbauteils mittels numerischer Verfahren sind zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer nicht nur verschiedene Materialparameter zur Berücksichtigung der thermischen Materialeigenschaften relevant, sondern auch Stabilitätsverlust durch Abbrand und Abfallzeiten einzelner Bauteilschichten. Hierfür sind vor allem die Brandeinwirkung und Temperatur ausschlaggebend. Die Einbindung dieser Parameter geht jedoch häufig über eine einfache Eingabe in der Benutzeroberfläche der Programme hinaus. Daher sind zusätzliche manuelle Programmierungen erforderlich, die ein deutlich tiefgreifenderes Wissen in die Programmiersprache erfordern.

## **1.2 Ziele**

Das Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen eines Brandes bei mehrschichtigen Holztafelbauteilen nachzuweisen und so auch den Ablauf des Bauteilversagens in Bezug auf die raumabschließende Funktion genauer zu bestimmen. Besondere Aufmerksamkeit wurde

hierbei auf das Versagen von einzelnen Bauteilschichten und der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Bauteiltemperatur in der betrachteten Schicht gelegt. Der daraus ersichtliche Zusammenhang von Versagen der Bauteilschicht zur Temperaturentwicklung innerhalb des Bauteils ist für den Holztafelbauteils von besonderer Bedeutung. Der Ablauf des Brandes, die Versagenszeitpunkte der Bauteilschichten, die Temperatur innerhalb der Schichten sowie auf der äußersten, brandabgewandten Schicht sind maßgeblich bei der Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer und raumabschließenden Funktion von mehrschichtigen Bauteilen. Hierbei wurde der Einfluss des Schichtversagens als entscheidendes Kriterium genau untersucht.

Weiter soll die in dieser Arbeit beschriebene Systematik zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Holztafelbauteilen die Verwendung numerischer Modelle präzisieren, indem das Versagen der einzelnen Bauteilschichten bereits mit der Nutzung der grafischen Benutzeroberfläche des Simulationsprogrammes berücksichtigt werden kann und dadurch eine anwenderfreundliche Lösung zum Nachweis der Bauteilqualität bietet. Dabei dürfen die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Ergebnisses dieser Methode nicht herabgesetzt werden. Es sollen gleichwertige Ergebnisse zu den vollumfänglichen, manuell ergänzten numerischen Nachweisen erzielt, dabei aber Fehlerquellen minimiert werden.

### **1.3 Methodik**

Um einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Nachweisverfahren zu geben, sind diese in Kapitel 2 aufgeführt und beschrieben. Im Anschluss beschreiben die Kapitel 3 und 4 die Grundlagen zu den Themen Brandverhalten von Holz, bauordnungsrechtliche Vorgaben und aktuelle Möglichkeiten zur Nachweisführung durch additive Berechnungsverfahren. Im darauffolgenden Kapitel 5 werden die Daten aus den Kleinbrandversuchen zu den Schutz- und Isolationszeiten unterschiedlicher Materialien beschrieben sowie mit den Ergebnissen aus den additiven Berechnungsverfahren und numerischen Simulationen verglichen. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt eine eingehende Untersuchung der numerischen Simulation mit Benennung der Problemfelder bei der Durchführung „einfacher“ FEM-Simulation im Kapitel 6. Hier wird auch die in dieser Arbeit entwickelte schichtweise FEM-Simulation vorgestellt und an Beispielen dargestellt. Bevor die Arbeit mit einem Fazit und einem Ausblick im Kapitel 8 abschließt, zeigt das Kapitel 7 eine mögliche Vorgehensweise zur Durchführung eines numerischen Nachweisverfahrens auf. Einen ausführlichen Leitfaden zum Vorgehen und der Anwendung der beschriebenen schichtweisen Bauteilsimulation ist im Anhang enthalten.

## 2 Wissenschaftliche Bedeutung von Nachweisverfahren

Im Bauwesen werden aus vielerlei Hinsicht Nachweise gefordert. So müssen z.B. Standsicherheit, Wärme-, Schall- und Brandschutzqualitäten von einem Bauteil bescheinigt werden, um diese bauordnungsrechtlich zulässig für den Einbau in Gebäuden vorzusehen. Es werden jedoch nicht nur Nachweise für Bauteile gefordert, sondern auch für ganze Gebäude. Hier können u.a. die Räumungsmöglichkeiten oder die Verhinderung einer Brand- und Rauchausbreitung im Gebäude genannt werden.

Die Bescheinigung einer geforderten oder erwünschten Qualität eines Bauteils oder eines Gebäudesystems ist nicht nur bei einem konkreten Bauvorhaben von Bedeutung. Auch in der Wissenschaft werden Nachweisverfahren genutzt, um die Qualität eines Produktes, Bauteils oder Systems zu belegen. Hierfür stehen viele unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Die im Folgenden vorgestellten Nachweisverfahren sind auf die Brandschutzmaßnahmen und Brandschutzanforderungen bezogen.

### 2.1 Brandschutzingenieurmethoden

Soll in einem Gebäude die Einhaltung der definierten Schutzziele überprüft werden, so kann die Nachweisführung hierzu über die DIN 18009-1:2016 [3] für Brandschutzingenieurmethoden erfolgen. Diese bietet Anwendungsbereiche für die Personenrettung wie auch für ingenieurtechnische Sicherheitsnachweise zur Beurteilung einer Brandschutzplanung und für die Bewertung von Brandgefahren [3]. Bevor ein Nachweis nach Brandschutzingenieurmethoden erfolgt, wird bei der Betrachtung einer Gebäudeplanung überprüft, ob für diese präskriptive Anforderungen bestehen und ob hiervon wesentliche Abweichungen festzustellen sind [3]. Existieren keine Vorschriften oder treten wesentliche Abweichungen hiervon auf, ist eine Nachweisführung nach Brandschutzingenieurmethoden erforderlich. Diese gliedern sich in die Möglichkeit einer argumentativen und einer leistungsbezogenen Nachweisführung.

Mit einer argumentativen Nachweisführung können von präskriptiven Vorgaben abweichende Anforderungen und deren Auswirkungen auf das Erreichen der Schutzziele dargestellt und Kompensationsmaßnahmen genannt und begründet werden. Diese müssen in einem zuverlässig abschätzbaren Maße aufzeigen, dass mit Hilfe der Ausgleichsmaßnahmen die Schutzziele erreicht und somit die Brandschutzplanung wirksam ist [3]. Das Verfahren basiert auf Argumentationen, die mit wissenschaftlichen Erkenntnissen zu belegen sind [3].

Die leistungsbezogene Nachweisführung soll dagegen durch rechnerisches Vorgehen aufweisen, dass die Einwirkdauer eines Brandes geringer ist als die Widerstandsdauer des

betrachteten Bauteils. Dieses Verfahren wird auch Soll-Ist-Vergleich genannt [3]. Dabei ist neben der Einhaltung einer höheren Widerstandsdauer gegenüber der Einwirkdauer auch der Nachweis über ausreichende Sicherheitsannahmen erforderlich [3]. Eine leistungsbezogene Nachweisführung kann neben Berechnungen auch auf anderen Wegen durchgeführt werden. Hierzu bietet [4] einen ausführlichen Überblick. In Abschnitt 2.2 werden die unterschiedlichen Möglichkeiten einer Nachweisführung kurz vorgestellt.

## 2.2 Leistungsbezogene Nachweisführung

Wird die zielführende Brandschutzplanung eines Gebäudes durch leistungsbezogene Nachweise belegt, so bieten sich hier ebenso viele Möglichkeiten der Nachweisführung wie Themenbereiche, für die eine solche Methode zur Verfügung steht. Ein leistungsbezogener Nachweis kann z.B. für einen Brandverlauf, die Personensicherheit oder auch die Bauteilqualifikation erbracht werden. Dabei können auch die Ergebnisse aus den jeweiligen Nachweisen als Eingangswerte für weitere Untersuchungen dienen.

Erfolgt eine Beurteilung des Brandverlaufes zur Nachweisführung der Temperaturentwicklung bei einem Brand, kann das Ergebnis als Grundlage für den Nachweis der tragenden und/oder raumabschließenden Qualifikation der Bauteile verwendet werden. Ebenso ist es möglich, dass die Ergebnisse aus den Nachweisen zur Brand- und Rauchausbreitung als Eingangsparameter zur Betrachtung der Personensicherheit bei den Räumungsuntersuchungen dienen. Folgend werden mögliche Bereiche aufgeführt, für die eine leistungsbezogene Nachweisführung erbracht werden kann:

### Brandverlauf

---

Temperaturverlauf	Eingangsparameter u.a. für: Bauteilqualitäten, Sicherheit der Personen, Räumungsmaßnahmen
Rauchentwicklung/-ausbreitung	Eingangsparameter u.a. für: Räumungsmaßnahmen, Sicherheit der Personen, Raumableitungsmaßnahmen
Brandentwicklung/-ausbreitung	Eingangsparameter u.a. für: Bauteilqualitäten, Räumungsmaßnahmen

### Personensicherheit

---

Räumungsmaßnahmen

Sicherheit der Person

### Bauteilqualifikation

---

Feuerwiderstand der tragenden Funktion	Eingangsparameter u.a. für: Sicherheit der Personen, Räumungsmaßnahmen
--	--

Feuerwiderstand der raumabschließenden Funktion	Eingangsparameter u.a. für: Räumungsmaßnahmen, Sicherheit der Personen
---	--

Diese Auflistung ist nicht als abschließend anzusehen.

Für die Durchführung der Nachweise stehen dem Anwender unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. So kann je nach Anwendungsgebiet auf mathematische oder experimentelle Lösungsverfahren zurückgegriffen werden [4]. Unter mathematischen Lösungswegen werden Rechenverfahren verstanden, die in Detailtiefe und Komplexität stark differieren können. Hier sind einfache Handrechenverfahren ebenso zu finden wie auch Systeme, die fundamentale Gesetzmäßigkeiten mitberücksichtigen. Diese sind jedoch häufig so komplex, dass zur Lösung numerische Modelle herangezogen werden müssen [4]. Die experimentellen Modelle spalten sich in Modelle mit skaliertem (verkleinertem) Maßstab sowie in welche im Maßstab 1:1, bei denen die Brandeinwirkungen in einem verkleinertem Maßstab vorgesehen werden [4]. Auch bei experimentellen Nachweisverfahren können numerische Modelle als Alternative eingesetzt werden. Dabei können Brandeinwirkungen innerhalb eines Bauteils durch Finite-Elemente-Methoden (FEM) oder Strömungssimulationen zur Nachweisführung einer Brand- und Rauchausbreitung anhand Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelle untersucht werden.

## **2.3 Bedeutung der Nachweisverfahren für die Wissenschaft**

Wissenschaftliche Untersuchungen und Nachweisverfahren stehen beim Brandschutzingenieurwesen unmittelbar im Zusammenhang. In einer Vielzahl von Arbeiten werden unterschiedliche Nachweisverfahren genutzt, um eine Thematik untersuchen zu können. Gleichermaßen basieren diese Nachweisverfahren auf wissenschaftlichen Untersuchungen und werden durch diese stetig kontrolliert und verbessert. Neue

Erkenntnisse aus Untersuchungen müssen auch in den Nachweisverfahren eingearbeitet werden, um die Methoden weiterhin sicher anwenden zu können.

### **3 Grundlagen des Brandschutzes im Bauordnungsrecht**

Alle baulichen Anlagen in Deutschland unterliegen den Vorgaben des jeweils geltenden Bauordnungsrechts. Dies beschreibt sowohl Vorgaben zur Lage auf dem Grundstück und Abständen zu anderen baulichen Anlagen als auch allgemeine Vorgaben zu Aufenthaltsbereichen, Brandschutz oder Baugenehmigungsverfahren und verantwortlichen Personen am Bau. Bis in die 50er-Jahre des 20. Jahrhunderts konnte jedes Bundesland Bauvorschriften frei formulieren. Daraus entstand eine unübersichtliche und teils komplizierte Grundlage der Rechtsvorschriften im Bausektor. Dies machte den Wiederaufbau nach den Kriegsjahren deutlich schwieriger [5]. Daher wurde von den zuständigen Bauministern der Bundesländer ein Zusammenschluss unter dem Namen ARGEBAU (Arbeitsgemeinschaft des Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesens des Vereinigten Wirtschaftsgebiets [6]) gegründet, der sich mit der Erstellung einer Rechtsgrundlage befasste, die das Bauordnungsrecht deutschlandweit vereinheitlichen sollte. Auch heute ist die Arbeitsgemeinschaft unter dem Namen „Bauministerkonferenz“ weiterhin tätig und befasst sich stetig mit der Aktualisierung der Musterbauordnung (MBO).

1959 wurde die MBO erstmalig eingeführt, bei der sich alle Bundesländer dazu verpflichteten, diese in geltendes Recht im jeweiligen Bundesland umzusetzen [6]. Die MBO bildet die Grundlage jeder geltenden Landesbauordnung in Deutschland. Dabei kann die MBO direkt in geltendes Recht überführt werden oder es können länderspezifische Anpassungen erfolgen. Eine dritte Möglichkeit der Bundesländer, die Landesbauordnung zu erstellen, ist diese auf Basis der Musterbauordnung selbst zu verfassen.

#### **3.1 Musterbauordnung**

Der zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit aktuelle Stand der MBO ist auf den 22./23.09.2022 datiert [7]. Die Musterbauordnung, als auch die eingeführten Landesbauordnungen, betrachten dabei den Wohnungsbau bis zur Hochhausgrenze abschließend.

##### **3.1.1 Begriffserklärung**

In der MBO werden wesentliche Begrifflichkeiten klar definiert. So werden einheitliche Bezeichnungen festgelegt, die sich in allen Landesbauordnungen wiederfinden. Dadurch können Missverständnisse zwischen den am Bau Beteiligten vermieden werden.

## Gebäude und Gebäudeklassen

Als „Gebäude“ selbst werden bauliche Anlagen definiert, die von Menschen betreten werden können und Schutz für Menschen, Tiere oder Sachen bieten [7]. Diese müssen selbstständig nutzbar und überdeckt sein, wie in §2 (2) MBO beschrieben. Als „bauliche Anlage“ wird eine aus Bauprodukten hergestellte Anlage verstanden, die fest mit dem Erdboden verbunden ist. Dies kann auch aufgrund der eigenen Schwere der Anlage der Fall sein [7].

Ein weiterer wesentlicher Begriff ist der der „Gebäudeklasse“. Jedes Bauwerk kann in eine der fünf definierten Gebäudeklassen eingeteilt werden. Diese unterscheiden sich vor allem in der Höhe des Fußbodens (OKF) des obersten Geschosses, in dem Aufenthaltsräume möglich wären, aber auch in der Größe der Nutzungseinheiten [7]. Als Aufenthaltsräume werden dabei Räume bezeichnet, die nicht nur dem vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen [7]. Die Begriffsdefinition zu den Gebäudeklassen erfolgt in §2 (3) MBO. In Abbildung 1 ist die Einteilung der Gebäudeklassen nach [7] aufgeführt.

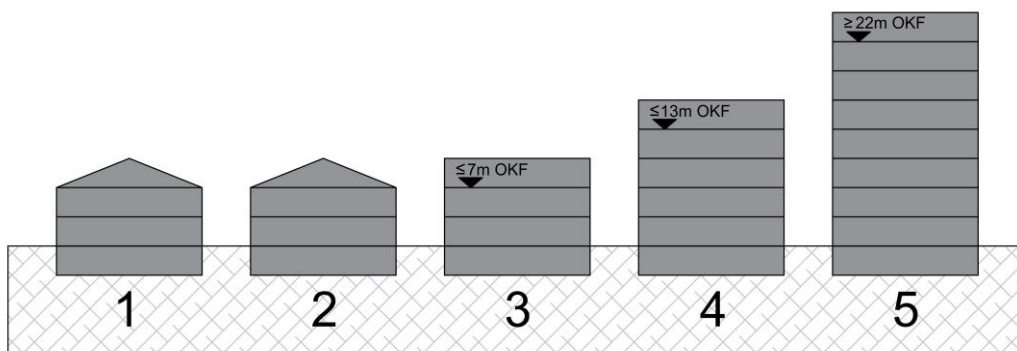


ABBILDUNG 1: EINTEILUNG DER GEBÄUDEKLASSEN, EIGENE ABBILDUNG MIT INHALTEN NACH [7]

Hochhäuser stellen keine eigenständige Gebäudeklasse dar. Diese werden der Gebäudeklasse 5 zugeteilt, sind aber durch ihre besondere Höhe von  $\geq 22\text{ m}$  Fußbodenhöhe des obersten Geschosses, in dem Aufenthaltsräume angeordnet werden können, als Sonderbau zu betrachten [7].

## Bauprodukte und Bauarten

Unter „Bauprodukten“ werden Produkte, Baustoffe, Bauteile, Anlagen und Bausätze verstanden, die dauerhaft in einer baulichen Anlage verbaut werden sollen oder aus denen vorgefertigte Anlagen hergestellt werden, die wiederum fest mit dem Erdboden verbunden werden sollen [7].

Eine Bauart zeichnet sich durch das Zusammenfügen von Bauprodukten zu einer baulichen Anlage aus [7]. Bauarten können unterschieden werden in massive Bauarten wie z.B.



Mauerwerksbau oder Betonbau oder in Holz- oder Stahlbauweisen. Auch der Trockenbau stellt eine weitverbreitete Bauart dar, die in vielen Fällen die brandschutztechnischen Anforderungen an ein Bauteil umfänglich erfüllen kann.

### Feuerwiderstandsqualitäten

Anforderungen an Bauteile werden in vielerlei Hinsicht gestellt. So sind Maßnahmen zu den Schallschutzanforderungen zu berücksichtigen und die Vorgaben an die Tragwerksplanung einzuhalten. Der Brandschutz ist ein weiterer Bereich, der Anforderungen aus Sicherheitsgründen an ein Bauteil und ein Bauwerk stellt. Für die Bauteilqualitäten, die aus brandschutztechnischer Sicht gefordert werden, definiert die MBO unter §26 [7] drei Feuerwiderstandsqualitäten: feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig. Weitere Anforderungen, was den Feuerwiderstand und das Brandverhalten der Baustoffe betrifft, müssen explizit in den entsprechenden Vorschriften aufgeführt werden. Vorgaben hierzu werden auf nationaler Ebene in der DIN 4102 Teil 1 [8] und Teil 2 [9] aufgeführt oder auf europäischer Ebene in der DIN EN 13501 Teil 1 [10] und Teil 2 [11]. Die [8] und [10] beschreiben dabei das Brandverhalten von Baustoffen bzw. Bauprodukten. Hier wird unterschieden in nichtbrennbare und brennbare Baustoffe. Eine weitere Unterteilung erfolgt im Bereich der brennbaren Baustoffe. Hier wird in die bauordnungsrechtlichen Kategorien „schwerentflammbar“, „normalentflammbar“ und „leichtentflammbar“ unterteilt. Die Kriterien zur Einteilung in die jeweiligen Kategorien erfolgen entsprechend nach [8] oder [10]. Die folgende Tabelle 1 zeigt hier die Unterscheidung der Klassifizierung nach [8] und [10]. Baustoffe, die die Anforderung „normalentflammbar“ nicht mindestens erfüllen und somit in die Kategorie „leichtentflammbar“ einzuteilen sind, dürfen als Baustoff nicht verwendet werden. Die MBO [7] sieht hier allerdings die Ausnahme vor, dass eine Verwendung möglich ist, wenn die Baustoffe in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht mehr als leichtentzündlich gelten.

Neben den Angaben der Baustoffklassen (A, B, C, D, E, F) werden in [10] Angaben zur Rauchentwicklung (s1 – s3) und der Eigenschaft des brennenden Abfallens oder Abtropfens (d0 – d2) aufgeführt.

TABELLE 1: EINTEILUNG DES BRANDVERHALTEN NACH [7], [8] UND [10], AUSGENOMMEN BODENBELÄGE UND ROHRISOLIERUNGEN

Bauordnungsrecht [7]	DIN 4102 Teil 1 [8]	DIN EN 13501 Teil 1 [10]
nichtbrennbar	A1	A1
	A2	A2-s1, d0

Bauordnungsrecht [7]	DIN 4102 Teil 1 [8]	DIN EN 13501 Teil 1 [10]
schwerentflammbar	B1	A2-s2, d0; A2-s3, d0; A2-s1, d1; A2-s2, d1; A2-s3, d1; A2-s1, d2; A2-s2, d2; A2-s3, d2 B-s1, d0; B-s2, d0; B-s3, d0; B-s1, d1; B-s2, d1; B-s3, d1; B-s1, d2; B-s2, d2; B-s3, d2; C-s1, d0; C-s2, d0; C-s3, d0; C-s1, d1; C-s2, d1; C-s3, d1; C-s1, d2; C-s2, d2; C-s3, d2
normalentflammbar	B2	D-s1, d0; D-s2, d0; D-s3, d0; D-s1, d1; D-s2, d1; D-s3, d1; D-s1, d2; D-s2, d2; D-s3, d2;  E; E-d2
leichtentflammbar	B3	F

Der Feuerwiderstand wird in [9] und [11] beschrieben. Dabei werden in [9] die Feuerwiderstandsklassen für Bauteile mit „F“ gekennzeichnet und in die Qualitäten F30, F60, F90, F120 und F180 unterschieden. Dabei ist die Wertangabe als minimale Funktionsdauer in Minuten zu verstehen. Die [9] unterscheidet in diesem Zusammenhang nicht zwischen der Angabe der Qualität in einer tragenden oder raumabschließenden Funktion. Eine solche Unterscheidung wird in [11] getätigt. Hier wird im Wesentlichen unterschieden zwischen der tragenden Funktion (R = Résistance), raumabschließenden Funktion (E = Étanchéité) und isolierenden Funktion (I = Isolation). Ergänzt wird die zeitliche Qualität ebenso wie in [9] mit dem Zusatz 15, 30, 60, 90, 120 oder 180 für die mindestens erreichte Funktionsdauer in Minuten. Durch die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen [12] werden die genannten Normen an die baurechtlichen Grundlagen gebunden.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen nach [7] zur Bauteilqualität sind Bauteile, die ohne Einschränkung aus brennbaren Baustoffen bestehen dürfen und eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 30 Minuten aufweisen, als „feuerhemmend“ zu bezeichnen.

Können Bauteile einen Feuerwiderstand von 60 Minuten und mehr erbringen und werden diese bei Verwendung brennbarer Baustoffe in den tragenden und aussteifenden Teilen mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung und einer nichtbrennbaren Dämmung versehen, werden diese in die Qualität „hochfeuerhemmend“ eingeordnet [7].

Als „feuerbeständig“ werden Bauteile bezeichnet, die in den tragenden und aussteifenden Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und einen Feuerwiderstand von mindestens 90 Minuten aufweisen [7].

### 3.1.2 Generalklausel §3 MBO

In §3 MBO werden allgemeine Anforderungen zu baulichen Anlagen formuliert, die von jedem Bauwerk erfüllt werden müssen. Daher wird dieser Paragraph auch „Generalklausel“ genannt. Die Anforderungen beziehen sich auf die Einhaltung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung, damit insbesondere Leben, Gesundheit und die natürliche Lebensgrundlage durch Bauwerke nicht gefährdet werden dürfen. Dies gilt nicht nur für die Errichtung, sondern auch für die Anordnung, Änderung, Instandhaltung und den Rückbau sowie eine Nutzungsänderung [7].

Im Bereich Brandschutz ist zur Einhaltung dieser Generalklausel die Berücksichtigung der sogenannten Schutzziele vorgesehen. Diese sind in §14 MBO formuliert. Die Schutzziele weisen darauf hin, dass ein Gebäude so ausgeführt und betrieben sein muss, dass der Brandentstehung und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt, die Rettung von Menschen und Tieren sowie die Durchführung wirksamer Löschmaßnahmen ermöglicht wird [7]. Alle weiteren Vorgaben in [7] zu Bauteilen und Baustoffen und wie diese auszuführen sind, dienen der sicheren Einhaltung dieser beiden Paragraphen. Und auch weiterführende Vorschriften, wie z.B. Technische Baubestimmungen, haben den Zweck, die Einhaltung des §3 MBO zu gewährleisten.

### 3.1.3 „Sicherheit“ und akzeptiertes Restrisiko

Bei aller Sorgfalt, die in einer Planung, Ausführung und Nutzung eines Bauwerks stecken, kann ein Brandereignis nicht restlos ausgeschlossen werden. In einem Gerichtsurteil des OVG Nordrhein-Westfalen vom 11.12.1987 (10 A 363/86) wurde hierzu folgendes festgelegt:

*„Es entspricht der Lebenserfahrung, dass mit der Entstehung eines Brandes praktisch jederzeit gerechnet werden muss. Der Umstand, dass in vielen Gebäuden jahrzehntelang kein Brand ausbricht, beweist nicht, dass keine Gefahr besteht, sondern stellt für die Betroffenen einen Glücksfall dar, mit dessen Ende jederzeit gerechnet werden muss!“ [13]*

Dies zeigt, dass eine 100% ige Sicherheit auch mit den geforderten Maßnahmen nicht gewährleistet werden kann. Auch die in [4] zu lesende Formulierung, dass ein extrem unwahrscheinliches Szenario, ein so genanntes „worst-case“-Szenario als Bemessungsgrundlage nicht berücksichtigt wird, zeigt, dass der Brandschutz nicht auf alle Eventualitäten Rücksicht nehmen kann. Wichtiger ist es, einen Brandfall anzunehmen, dessen Eintretenswahrscheinlichkeit, wie in [4] beschrieben, als „hinreichend“ angenommen werden kann. Dieses Szenario wird „worst-credible“-Szenario bezeichnet. Die Maßnahmen, die gefordert werden um §3 MBO einzuhalten, orientieren sich für jedes Projekt an diesem „worst-credible“-Szenario. In einem konkreten Beispiel für den Brandschutz bedeutet dies, dass der Brandherd bei einer Beurteilung grundsätzlich nur an einer Stelle des Gebäudes angenommen werden muss. Die Situation, dass mehrere Brandherde gleichzeitig ausbrechen, ist zwar möglich, jedoch so unwahrscheinlich, dass dies außer Betracht gelassen wird. Brandschutzrelevante Maßnahmen so auszulegen, dass auch ein „worst-case“-Szenario damit abgedeckt werden könnte, überschreiten in der überwiegenden Mehrheit der Vorhaben die vertretbaren Aufwendungen im Vergleich zu der Auftretenswahrscheinlichkeit. Daraus ergibt sich für jedes Bauwerk ein Restrisiko, welches als gesellschaftlich „akzeptiertes Restrisiko“ bezeichnet wird.

### **3.2 Holzbaurichtlinie**

Um die Anforderungen, die an ein Gebäude gestellt werden, auch in einem Holzgebäude sicher umsetzen zu können, und somit §3 MBO einzuhalten, wurde im Oktober 2020 von der Bauministerkonferenz die „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise“ [14] (MHolzBauR) eingeführt. Diese löste die bis dahin geltende „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise“ (M-HFHolzR) [15] aus dem Jahr 2004 ab. Bedeutender Unterschied zwischen diesen beiden Richtlinien bildet die Aufnahme der Massivholzbauweise und die Anwendbarkeit dieser in Gebäuden der Gebäudeklasse 5. Die Anwendung der Holzrahmen- oder auch Holztafelbauweise ist in der aktuellen Form der Richtlinie auf die Gebäudeklasse 4 begrenzt [16]. Da sich diese Arbeit mit Bauteilen in Holztafelbauweise befasst, werden folgend die Anforderungen an die Massivholzbauweise nicht berücksichtigt.

Nach allgemeinen Anforderungen an tragende und aussteifende sowie raumabschließende Bauteile in Gebäudeklasse 4-Objekten ist nach [7] eine Ausführung in einer hochfeuerhemmenden Qualität gefordert. Um diese zu gewährleisten, beschreibt [7, 14] die Ausbildung der Bauteile als Holztafelbauteil als zulässig, wenn die Bauteile allseitig mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung versehen sind und die Hohlräume mit einem

nichtbrennbaren Dämmstoff ausgedämmt werden, welcher eine Temperaturbeständigkeit von 1.000°C nachweist.

Die Anforderungen nach [14] an die Bauteile in Holztafelbauweise begründen sich vor allem in dem Risiko, das von der brennbaren, tragenden und aussteifenden Konstruktion ausgeht und der Gefahr eines Hohlraumbrandes im Inneren des Bauteils. Daher ist vor allem dieses vor einer Brandeinwirkung zu schützen. Einen Einblick in den Aufbau eines Holztafelbauteils gibt Abbildung 3 auf Seite 29.

Durch die Bekleidung der Konstruktionsteile mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungsschicht nach [14] soll die Ausbreitung des Brandes in das Innere des Bauteils verhindert werden. Sichergestellt wird dies durch eine Bekleidung, die mindestens 60 Minuten eine Entzündung der tragenden und aussteifenden Konstruktion verhindert [14]. In Punkt 4.2 in [14] ist eine doppelte Bekleidung der Konstruktion mit jeweils 2 x 18mm Gipskarton-Feuerschutzplatten als wirksam aufgeführt. Auch andere Konstruktionsmöglichkeiten sind zulässig, wenn die Entzündung der Holzteile für eine ausreichend lange Zeit ausgeschlossen werden kann (Kapselkriterium  $K_{2,60}$  nach [11] wird erfüllt). Die Prüfung hat hierbei nach DIN EN 13381-2 [17] zu erfolgen. Auf die Ausbildung der Fugen muss ebenfalls geachtet werden, um einen Branddurchgang durch diese Stellen zu vermeiden. Als zweckmäßig beschreibt [14] einen Fugenversatz, die Ausbildung als Nut- und Federverbindung oder im Stufenfalz.

Die Anforderung an eine Nichtbrennbarkeit und Temperaturbeständigkeit von mindestens 1.000°C bei Dämmstoffen wird in der Regel von einer Steinwolldämmung erreicht. Der Nachweis hierfür ist über die DIN 4102-12 [14] zu erbringen. Die Dämmung soll u.a. dafür sorgen, dass die Holzbauteile und auch die brandabgewandte Bauteilbekleidung bei Versagen der brandzugewandten Bekleidung vor einer direkten Brandbeanspruchung geschützt werden. Bei den Konstruktionshölzern geht es dabei vor allem darum, einen seitlichen Abbrand der Hölzer möglichst lange zu vermeiden und so die Stabilität des Bauteils zu gewährleisten. Zugleich wird durch die intakte Dämmung der Wärmedurchgang durch das Bauteil gehemmt, was eine Brandausbreitung auf angrenzende Bereiche verhindert.

Um auch in den Bereichen, in denen eine Öffnung im Bauteil erforderlich wird, die Sicherheit einer Brandeindämmung zu erhalten, sind die Laibungen, die hierdurch entstehen, ebenfalls mit einem Rahmenholz und einer darauf aufgetragenen Brandschutzbekleidung auszuführen [14]. Verschlüsse von Öffnungen müssen einen entsprechenden Ver- oder Anwendbarkeitsnachweis oder die erforderlichen Anforderungen durch eine Leistungserklärung erbringen [14].

Werden die Holztafelbauteile nach den Vorgaben der [14] ausgeführt, so kann eine zulässige Anwendung als gegeben angenommen werden. Als eingeführte Technische Baubestimmung dient die [14] zur Regelung der in dieser aufgeführten Konstruktionen. Eine Ausbildung der Anschlüsse, wie in [14] beschrieben, muss nicht durch weitere Nachweise in der Anwendbarkeit bescheinigt werden.

Für Nachweise der Feuerwiderstandsdauer schreibt die [14] vor, diese durch eine, als Technische Baubestimmung bekannt gemachte Technische Regel, zu erbringen. Alternativ kann eine Nachweisführung auch gemäß §16a MBO erfolgen [14].

Thermische Grundlagen zum Brand bei Holzkonstruktionen werden in Kapitel 4.3 beschrieben.

### **3.3 Additive Berechnungsverfahren**

Raumabschließende Bauteile sind so herzustellen, dass diese die Ausbreitung von Feuer und Rauch über die baurechtlich geforderte Zeit eindämmen. Sie sind als brandschutztechnisch wirksame Bauteile entscheidend für eine Begrenzung der Brandausbreitung innerhalb eines Gebäudes. Eine Möglichkeit, den Nachweis über die geforderte Leistung des Bauteils zu erbringen, ist eine Ausführung anhand der eingeführten Technischen Baubestimmungen. Diese können den Aufbau detailliert beschreiben oder bieten eine Möglichkeit, einen Nachweis durch Ingenieurmethoden zu erbringen. Hierzu zählen auch die Handrechenverfahren. Die additiven Berechnungsverfahren sind in diese Gruppe einzuordnen. Sie sollen dem Anwender die Möglichkeit bieten, die Leistung eines Bauteils durch die verwendeten Bauprodukte und deren Materialparameter, wie Dicke und Dichte zu errechnen und so eine zuverlässige Nachweisführung zu erreichen. Durch dieses Verfahren können auch Bauteile berechnet werden, die nicht den Aufbauten von Technischen Baubestimmungen für die Konstruktion von Bauteilen entsprechen, ohne numerische Nachweise durchzuführen.

Die DIN EN 1995-1-2:2010 [1], auch als Eurocode 5-1-2 bekannt, gilt als eingeführte Technische Baubestimmung in [12]. Sie befasst sich mit der Bemessung und Konstruktion von Holzbauten im Brandfall und führt ein solches additives Berechnungsverfahren auf. Die Norm beschreibt sowohl deren Anwendung auf Gebäude in Holzbauweise als auch in einer Holzwerkstoffbauweise, wo der Holztafelbau klassischerweise einzuordnen ist.

Grundvoraussetzung zur Anwendung der Norm [1] ist, dass die Konstruktionen einen Ausfall der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses über einen vorgegebenen Zeitraum hinweg nicht verlieren. Dabei wird gemäß [11] die Tragfähigkeit mit R (Résistance), der Raumabschluss mit

E (Étanchéité) und die Isolationswirkung, also die Begrenzung der auf der brandabgewandten Bauteilseite entstehende Wärmestrahlung, mit I (Isolation) bezeichnet. Die Prüfung der Bauteile dahingehend und die erforderlichen Leistungskriterien zur Klassifizierung sind in DIN EN 1363-1 [18] gegeben. Vor allem für die Nachweisführung des Raumabschlusses sind maximale Temperaturen als Grenzwert maßgeblich. Zwar kann die Rauchausbreitung mit dem sichtbaren Durchtritt ermittelt werden, jedoch muss bedacht werden, dass eine vollständige Rauchdichtheit nicht, oder nur sehr schwer, zu erwirken ist. Dazu kommt, dass der Raumabschluss nicht allein an dem Wert E bemessen werden kann. Hier ist zur Verhinderung einer Brandübertragung auf der brandabgewandten Bauteilseite durch Wärmestrahlung, und infolgedessen einer Brandentstehung ohne direkten Brandkontakt, die Temperatur, also das Isolationskriterium I, zu berücksichtigen. In [1] wird angegeben, dass eine Brandausbreitung auf der brandabgewandten Bauteilseite durch Wärmestrahlung ausgeschlossen werden kann, wenn die Temperatur auf der Oberfläche eine mittlere Temperaturerhöhung von 140 K und die maximale Temperaturerhöhung an jedem Punkt 180 K nicht überschreitet (Isolationskriterium). Somit sind die beiden letztgenannten Grenzwerte zum Nachweis der raumabschließenden Funktion mit den Kriterien E und I zu beachten.

Nach Abschnitt 5 der [1] gelten die additiven Bemessungsverfahren wie auch die Anforderungen und beschriebenen Bauteilausführungen nach [14] nur für den Nachweis einer raumabschließenden Funktion über die Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten. Das bedeutet, dass auch nach diesem Verfahren nur eine hochfeuerhemmende Qualität der Bauteile nachgewiesen werden kann. Eine Nachweisführung darüber hinaus, zur Bemessung der Bauteile für eine Feuerwiderstandsqualität von mindestens 90 Minuten, wie sie für Gebäude der Gebäudeklasse 5 gefordert wird, ist nicht zulässig.

Um diese Begrenzung auf eine Anwendung der Norm auf 90 oder auch 120 Minuten zu erweitern, befassen sich derzeit neben dem Projekt, auf dessen Grundlage diese Arbeit entstand, auch viele weitere Forschungen mit dieser Thematik [19–22]. Ziel dieser Projekte ist es, eine sicher anwendbare Systematik zur additiven Berechnung raumabschließender Holztafelbauteile zu entwickeln, die den Fortschritt des Holzbaus und damit auch die Anwendbarkeit in Gebäudeklasse 5-Objekten weiter vorantreibt.

### 3.3.1 Funktion und Aufbau additiver Berechnungsverfahren

Additive Berechnungsverfahren beurteilen die Feuerwiderstandsdauer jeder Schicht eines Holztafelbauteils und addieren diese zu einer gemeinsamen Feuerwiderstandsdauer des gesamten Bauteils. Dabei werden die Positionen der Bauteilschichten innerhalb der

Konstruktion durch Positionsbeiwerte mitberücksichtigt. Dieser Positionsbeiwert soll die Einflüsse von vorherigen Schichten beachten, die über eine gewisse Zeit hinweg die betrachtete Schicht vor einer direkten Brandeinwirkung schützt. Die [1] beschreibt das Verfahren in Anhang E und gibt hier Vorgaben zu Baustoffen, für die dieses angewendet werden kann ohne die Erfordernis, weitere Versuche durchzuführen. Hierzu zählen Bekleidungsmaterialien aus Holzwerkstoffen nach DIN 13986 und Gipswerkstoffen nach DIN EN 520 [1]. Unter letzteres fallen u.a. Gipsplatten der Typen A, F (oder auch Feuerschutzplatte) und H [23], die in [1] berücksichtigt werden. Um die konstruktionsbedingten Hohlräume in der Bauteilebene zu füllen, sind nach [1] nur die nichtbrennbaren Dämmstoffe Glaswolle und Steinwolle zulässig.

Neben den Positionen innerhalb des Bauteils ist für die Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer einer Schicht noch das Vorhandensein einer Fuge in der Schicht entscheidend. Die Fuge stellt konstruktionsbedingt eine Schwachstelle in der Bauteilschicht dar, durch die die hohen Temperaturen eines Brandes schneller in die inneren Schichten einwirken können. Dadurch steigt das Risiko, dass sich im Bereich von Fugen brennbare Dämmstoffe oder auch Holzbauteile schneller aktiv am Brand beteiligen, auch bevor die schützende, davorliegende Schicht vollständig versagt. In der Norm [1] wird dies durch einen Fugenbeiwert eingebunden, der ebenfalls die Art der Fugenausführung berücksichtigt.

Für die Materialien sind Angaben zu Dichte und Dicke erforderlich, um diese in den vorgegebenen Gleichungen materialspezifisch mit aufnehmen zu können. So werden die vorgegebenen Berechnungen auf das betrachtete Bauteil angepasst.

Ermittelt wird die Zeit, in der ein Raumabschluss nicht mehr sicher angenommen werden kann. Der Grenzwert liegt in [1] bei 140 K mittlerer Temperaturerhöhung und maximal 180 K Temperaturerhöhung an jedem Punkt des Bauteils. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der angegebenen Temperaturerhöhung wird in [1] „Isolationszeit“ genannt.

In den additiven Berechnungsverfahren, die aufbauend auf das Verfahren in [1] entwickelt wurden, wird neben dem Isolationskriterium noch das Schutzkriterium betrachtet. Die Einführung dieses Kennwertes erfolgte durch [24] mit der Entwicklung der sogenannten Component Additive Method (CAM). Das Ziel dieser Arbeit ist vor allem, die Materialien, die in dem additiven Berechnungsverfahren berücksichtigt werden können, zu aktualisieren und die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen. Das Verfahren nach Norm [1] gilt als zu konservativ und nicht praxistauglich [24–26]. In weiteren Forschungen, wie in [20, 21] geht es zudem um die Erweiterung der nachweisbaren Feuerwiderstandsdauer.



### 3.3.2 Grenzkriterien

Wie unter 3.3.1 erwähnt, wird nach [24] das Kriterium der Schutzzeit in das additive Berechnungsverfahren aufgenommen. Die Berechnungsverfahren, die auf [1] aufgebaut wurden, berücksichtigen somit nicht mehr nur die Isolationszeit als Versagenszeitpunkt. Dadurch können die unterschiedlichen Funktionen der einzelnen Schichten eines Holztafelbauteils auch in deren Wirkungsdauer in das Berechnungsverfahren mit eingebracht werden.

Die Schutzzeit drückt aus, wie lange eine vorliegende Schicht die Brandausbreitung auf die folgende, dahinterliegende Schicht verhindern kann, also eine schützende Wirkung ausführt. Dabei ist vor allem die Temperatur bedeutsam, die zum Beginn der Verkohlung eines Holzbauteils, in dem Fall die tragende und aussteifende Holzkonstruktion aus Stützen und Rahmen, führt. In [1] wird hierfür eine Verkohlungstemperatur von 300°C angenommen. In weiteren Quellen wie auch in [24] findet man hierzu vor allem den Wert von 270°C, ab welchem Holz in die Phase der Verkohlung übergeht. Diese 270°C werden in dem Berechnungsverfahren mit 20°C Bauteiltemperatur zu Brandbeginn und einer Temperaturerwärmung an der Oberfläche der betrachteten Schicht von 250 K im Mittel angenommen. Maximal darf an jeder Messstelle des Bauteils eine Temperaturerhöhung von 270 K nicht überschritten werden. Wird der Grenzwert auf der brandabgewandten Seite der betrachteten Schicht erreicht, kann eine Schutzwirkung vor der Verkohlung von Holz nicht mehr angenommen werden [24]. Diese maximalen Temperaturerhöhungen sind ebenfalls ausschlaggebend für die Klassifizierung der Brandschutzbekleidungen nach [11].

Im Gegensatz dazu bleibt auch bei [24] das Grenzkriterium der Isolationszeit bestehen. Dieses wird jedoch nur bei der letzten, brandabgewandten Bauteilschicht auf der Bauteilseite, welche zum angrenzenden Raum hin gelegen ist, berechnet. Hier bleiben die in [1] aufgeführten 140 K Temperaturerhöhung im Mittel und 180 K an jedem Punkt der betrachteten Oberfläche erhalten, um die Funktion des Raumabschlusses zum angrenzenden Raum hin zu gewährleisten. Die nachfolgende Tabelle 2 führt die genannten Kriterien nochmals zur besseren Übersicht auf.

TABELLE 2: ÜBERSICHT GRENZKRITERIEN

Schicht	Kriterium Schutzzeit	Kriterium Isolationszeit
brandbeanspruchte Schicht (Schicht <sub>1</sub> )	250 K im Mittel 270 K an jeder Messstelle	%

jede weitere, darauffolgende Schicht (Schicht <sub>2</sub> – Schicht <sub>n-1</sub> )	250 K im Mittel 270 K an jeder Messstelle	%
äußerste, brandabgewandte Schicht (Schicht <sub>n</sub> )	%	140 K im Mittel 180 K an jeder Messstelle

Diese beiden Werte haben sich seit der Arbeit [24] von 2010 gefestigt und sind in weiteren Forschungen, wie in [20, 27, 28] wiederzufinden. Auch in der geplanten Überarbeitung der Norm [29] sind beide Grenzwerte zur Berechnung einer raumabschließenden Funktion eines Holztafelbauteils vorgesehen.

### 3.3.3 Relevante Berechnungsverfahren in Europa

Die ursprüngliche Entwicklung des additiven Berechnungsverfahrens, wie es in [1] aktualisiert aufgenommen wurde, ist auf Joakim Norén [30] zurückzuführen. Seitdem ist in diesem Bereich eine stetige Weiterentwicklung zu beobachten, wie die große Anzahl an Forschungsarbeiten aufzeigt. Die Literaturrecherche im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes [22] zeigt ähnliche Verfahren auf, bei denen eine Bemessung der gesamten Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils durch die Feuerwiderstandsdauer einzelner Schichten errechnet wird. In [31] ist hierzu ein Überblick aufgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird in diesem Abschnitt kurz auf die in Europa geltenden Methoden eingegangen. Eine umfängliche Darstellung ist in [32] gegeben.

#### 3.3.3.1 Eurocode 5-1-2 (DIN EN 1995-1-2:2010)

Das Berechnungsverfahren, welches in [1] aufgeführt ist, dient zur Nachweisführung, dass eine Brandübertragung auf angrenzende Gebäudeteile über einen vorgegebenen Zeitraum ausgeschlossen werden kann. Der Nachweis gilt gemäß [1] als erbracht, wenn Gleichung (1) erfüllt werden kann.

$$t_{ins} \geq t_{req} \text{ [min]} \quad (1)$$

mit:  $t_{ins}$  Isolationszeit des Bauteils [min]

$t_{req}$  Erforderliche Feuerwiderstandsdauer zur Sicherung des Raumabschluss [min]

Um dies nachzuweisen, werden die Isolationszeiten der einzelnen Schichten unter Berücksichtigung erforderlicher Beiwerte errechnet und gemäß Gleichung (2) summiert.

$$t_{ins} = \sum t_{ins,0,i} \cdot k_{pos} \cdot k_j \text{ [min]} \quad (2)$$

mit:  $t_{ins,0,i}$  Grundisolationszeit der betrachteten Bauteilschicht i [min]

$k_{pos}$  Positionsbeiwert

$k_j$  Fugenbeiwert

Die Berücksichtigung der Wärmedurchgangswege können wie in [1] nach Abbildung 2 angenommen werden. Hierbei werden jedoch die aufgeführten Öffnungen für Installationseinrichtungen wie Schalter, Steckdosen, usw. nicht mit einem gesonderten Beiwert mit eingebunden, sondern als Öffnung der Bauteilschicht als nicht vorhanden gewertet.

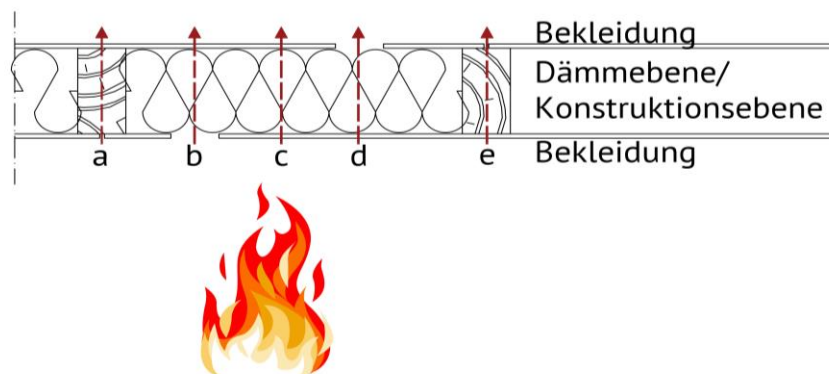


ABBILDUNG 2: WÄRMEDURCHGANGSWEGE DURCH HOLZTAFELBAUTEIL NACH [1]

Je nach Ausführung der Fuge gibt [1] unterschiedliche Beiwerte vor, die in der Gleichung (2) berücksichtigt werden müssen. Ebenso sind die Gleichungen zur Bestimmung der Grundisolationszeit nach Vorgaben der [1] zu wählen.

Die Materialauswahl, mit der das Berechnungsverfahren nach [1] angewendet werden kann, ist fest vorgegeben. Eine Ergänzung weiterer Materialien in das Berechnungsverfahren ist nicht möglich. Zur Anwendung stehen:

- Sperrholz ( $\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$ )
- Span- und Faserplatten ( $\rho \geq 600 \text{ kg/m}^3$ )

- Holzbekleidungen ( $\rho \geq 400 \text{ kg/m}^3$ )
- Gipsplatten, Typen A, F, R und H
- Steinwolle
- Glaswolle

Dies macht die Anwendbarkeit auf die heutzutage üblichen Materialien wie z.B. OSB-Platten oder Dreischichtholzplatten nahezu unmöglich und auch die Integration von Dämmstoffen natürlichen Ursprungs ist ausgeschlossen. Die Verwendbarkeit des Berechnungsverfahrens ist auf 60 Minuten begrenzt, was eine Berechnung für raumabschließende Bauteile von feuerhemmender und hochfeuerhemmender Qualität ermöglicht. Hinzu kommt, dass durch die stetig stattfindenden Innovationen, auch im Hinblick auf den wachsenden Nachhaltigkeitsgedanken, die Baustoffe weiterentwickelt werden und neue Produkte hinzukommen. Allein aus diesem Grund ist eine Überarbeitung des Verfahrens sinnvoll.

### 3.3.3.2 Component Additive Method

Die Component Additive Method, oder auch CAM genannt, wurde von Vanessa Schleifer an der ETH in Zürich entwickelt [24]. Das Verfahren soll die als kritisch angesehene Methode nach Anhang E [1] verbessern und durch eine optimierte Möglichkeit, die Position der betrachteten Schichten im Bauteil einzubinden, die Genauigkeit und somit die Akzeptanz des Berechnungsverfahrens erhöhen. Zudem wurden die Materialien, die in dem Berechnungsverfahren berücksichtigt werden können, modernisiert und auf den heutigen Markt angepasst. Eingebunden sind die Materialien:

- Gipsplatten (Gipskarton- und Gipsfaserplatten)
- Massivholzplatten
- Spanplatten
- OSB-Platten
- Steinwolle
- Glaswolle

Auch hier zeichnet sich ein überschaubarer Bereich der Materialien ab, die berücksichtigt werden können. Als Grund dafür ist der große Aufwand für eine Brandprüfung zu nennen. Jedoch bietet das Verfahren die Möglichkeit, weitere Materialien in dieses aufzunehmen. Dies wurde auch mit der Arbeit [28] zur Integration von holzfaserbasierten Dämmstoffen und Zellulosedämmstoffen bereits angewendet. Eine weitere Arbeit [27], die ebenfalls auf der CAM basiert, integrierte so weitere Gipswerkstoffplatten in das Berechnungsverfahren. Die Möglichkeit, das Verfahren anzuwenden, kann somit stets erweitert und aktualisiert werden, was im Vergleich zu [1] einen bedeutenden Vorteil darstellt.

Der Aufbau bleibt dabei nahezu gleich. Auch hier geht es darum, einen Nachweis zu erbringen, dass die Anforderung an Gleichung (1) erfüllt wird. Die CAM ist hier ebenfalls für eine Anwendung auf eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ausgelegt. Die Errechnung der Isolationszeit  $t_{ins}$  erfolgt dabei nach Gleichung (3).

$$t_{ins} = \sum t_{prot,i-1} + t_{ins,i} \text{ [min]} \quad (3)$$

mit:	$t_{ins}$	Isolationszeit des Bauteils [min]
	$\sum t_{prot,i-1}$	Schutzzeiten der brandbeanspruchten Bauteilschichten i bis i-1 [min]
	$t_{ins,i}$	Isolationszeit der äußersten brandabgewandten Bauteilschicht i [min]

In [24] wird die Berechnung der Schichten in deren Schutzfunktion (brandbeanspruchte Schichten bis i-1) und deren Isolationsfunktion (äußerste, brandabgewandte Schicht i) unterteilt. Hierzu wurden Positionsparameter eingeführt, die zum einen die Schutzwirkung der vorliegenden Schichten, als auch die Isolationswirkung der folgenden Schichten berücksichtigen. Daraus ergeben sich die Gleichungen (4) und (5), nach denen die Berechnung der jeweiligen Schutz- bzw. Isolationszeiten zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion durchgeführt wird. Als ebenfalls neue Größe wird  $\Delta t_i$  als Korrekturwert des zeitlich verzögerten Abfallens von Bekleidungen aus Gipskarton-Feuerschutzplatten und Gipsfaserplatten vorgesehen.

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

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \text{ [min]} \quad (5)$$

mit:	$t_{ins,i}$	Isolationszeit der betrachteten Bauteilschicht i [min]
	$t_{prot,i}$	Schutzzeit der betrachteten Bauteilschicht i [min]
	$t_{ins,0,i}$	Grundisolationszeit der betrachteten Bauteilschicht i [min]
	$t_{prot,0,i}$	Grundschutzzeit der betrachteten Bauteilschicht i [min]
	$k_{pos,exp,i}$	Positionsparameter zur Berücksichtigung der Schutzwirkung vorliegender Bauteilschichten auf betrachtete Bauteilschicht i

$k_{pos,unexp,i}$	Positionsparameter zur Berücksichtigung der Isolationswirkung folgender Bauteilschichten auf betrachtete Bauteilschicht $i$
$\Delta t_i$	Zeitliche Differenz zur Berücksichtigung des verzögerten Abfallens der vorliegenden Schicht
$k_{j,i}$	Fugenbeiwert der betrachteten Schicht

Die Erweiterung dieses Verfahrens nach Mäger und Just [27, 33] ergänzte den nach [24] eingeführten Faktor zur Berücksichtigung des verzögerten Abfallens von Gipskarton-Feuerschutzplatten und Gipsfaserplatten um einen expliziten, zeitabhängigen Eingangswert [20], der das Versagen der Bekleidung entsprechend einbinden soll. Somit können in das Berechnungsverfahren entsprechend vorliegende Kennwerte zur Integration individueller Versagenszeitpunkte der Bekleidungsmaterialien eingebunden werden. Weiter wird die Erhöhung der Versagenszeitpunkte bei allen folgenden Schichten mit hinzuaddiert [20].

### 3.3.3.3 Neuer Eurocode 5-1-2 (prEN 1995-1-2:2025)

Das Berechnungsverfahren, welches im Normenentwurf zur EN 1995-1-2:2025 [29] zur Anwendung kommen soll, basiert auf [24] mit der Ergänzung von [27, 33]. Das als „Separating Function Method“ (kurz: SFM) geführte Verfahren optimiert die CAM stellenweise in den aufgeführten Gleichungen zur Berechnung der Grundschutz-/Grundisolationszeit und in der Berechnung der zu berücksichtigenden Parameter. Eine weitere Besonderheit liegt darin, dass die Anwendungsgrenzen auf 120 Minuten Raumabschlussfunktion erhöht und auch die Verwendung von Dämmstoffen aus brennbaren Rohstoffen ermöglicht werden soll. Die Gleichungen zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion entsprechen den Gleichungen (3), (4) und (5), wobei Ausnahmen bei Isolationszeiten gegeben sind, wenn die letzte Schicht aus Holzelementen hergestellt wird.

Vor allem der größere Nachweiszeitraum und die Integration brennbarer Dämmstoffe bieten der [29] bessere Möglichkeiten sich als anerkanntes Nachweisverfahren in der Praxis zu bewähren. Zudem sorgt der informative Anhang in [29] dafür, dass eine Aufnahme neuer Materialien und somit eine stetig laufende Erweiterung der verwendbaren Materialien möglich ist.

### 3.3.3.4 Britisches Berechnungsverfahren nach British Standard

Im Vergleich zu den normativen Verfahren nach [1] und [29] oder der CAM nach [24], ist das britische Verfahren auf Tabellen aufgebaut. Auch hier werden die Schutz-/Isolationszeiten der einzelnen Schichten aufaddiert, jedoch ergeben sich diese aus Tabellen, die die Zeiten

explizit für ein Produkt angeben. Somit ist hier eine individuelle Anpassung auf die Situation nur begrenzt möglich. Errechnet wird hierbei auch nicht direkt die Zeit in Minuten, sondern Beitragswerte, die in der Summe aller Schichten einen Wert von 100 erreichen müssen. Hierzu werden Tabellen für Feuerwiderstände von 30 Minuten und 60 Minuten vorgegeben. Eine Ergänzung zusätzlicher Materialien in das Verfahren ist nicht möglich.

## 4 Holztafelbau und Brandschutz

Dass es sich bei dem Baustoff Holz um einen brennbaren Baustoff nach [10] handelt, ist weitläufig bekannt und ergibt sich allein aus der Tatsache, dass Holz seit Jahrtausenden als Brennstoff genutzt wird. Dennoch ist es ebenso eines der wichtigsten Baumaterialien, die es in der Geschichte der Menschheit gibt. Im ersten Moment stellt dies einen offensichtlichen Widerspruch dar, wenn man an §3 MBO denkt, der die Sicherheit des Gebäudes zum Schutz von Leben, Gesundheit, der Lebensgrundlage und der öffentlichen Sicherheit und Ordnung fordert [7]. Ebenso der ergänzende §15 MBO, der als Schutzziel zur Umsetzung der Generalklausel u.a. die Verhinderung der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch fordert [7]. Doch gehen vom Holzbau auch positive Eigenschaften aus, die dazu geführt haben, dass dieser auch nach Jahrtausenden noch in aktualisierter Art und Weise ausgeübt wird.

### 4.1 Warum Holzbau?

Einer der Gründe, dass Holz seit Menschengedenken so vielfältig und weitverbreitet eingesetzt wird, ist die breite Verfügbarkeit des Stoffes. Im Jahr 2020 sind nach [34, 35] ca. vier Milliarden Hektar der Erde mit Wäldern bedeckt. Die größten Vorkommen mit insgesamt 54% der Gesamtfläche liegen dabei in Russland, Brasilien, Kanada, USA und China. Dabei ist von Vorteil, dass Holz in einem, als von den Menschen überschaubar angenommenen, Zeitraum reproduzierbar ist [34], was dazu führt, dass das Bewusstsein für die materialgerechte Verwendung von Holz und die Aufforstung steigen [36]. Zudem wurde schon früh festgestellt, dass sich die unterschiedlichen Holzarten mit den sortenspezifischen Eigenschaften gut für verschiedene Einsatzgebiete eignen. Dieses Wissen wurde von Generation zu Generation weitergegeben und durch neue Erfahrungen ergänzt [36].

Neben den günstigen Eigenschaften des Holzes als Baustoff spielt der ökologische Faktor eine zusätzliche, bedeutende Rolle. Holz ist ein wichtiger natürlicher CO<sub>2</sub>-Speicher. So nehmen die Wälder der Erde jedes Jahr 7,35 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> auf und speichern dieses ab [35]. Eine Freisetzung des gespeicherten CO<sub>2</sub> erfolgt bei einer natürlichen Zersetzung des Holzes oder einer thermischen Verwertung. Durch die allgemein geringe Freisetzung an Luftschadstoffen bei der Zersetzung gilt Holz als ökologischer und nachhaltiger Rohstoff [34]. Wegen dieser Vorzüge und der schnellen Bauweise durch vorgefertigte Bauteile und des Wegfalls der Trocknungszeit bei der Errichtung, wird von öffentlicher Hand der Fortschritt im Holzbau vorangetrieben. So tragen Zielsetzungen und Absichtserklärungen wie in [37] und [38] dazu bei, dass der Holzbau immer weiter an Aufmerksamkeit und Ansehen gewinnt.



#### 4.1.1 Geschichte des Holzbaus

Archäologische Forschungen haben schon vor Jahren festgestellt, dass die ersten Gebäude der Menschen aus Holz errichtet wurden. Mit Beginn des Sesshaftwerdens und der Einführung der Landwirtschaft wurde es für die Menschen wichtig, ein Gebäude zum Schutz vor Witterungseinflüssen zu errichten. Dabei wurden bereits 40.000 Jahre vor Christus Erdhütten mit Dächern aus Holz errichtet [36].

Das weitläufige Vorkommen des Rohstoffes Holz trug dazu bei, dass der Bau von Gebäuden für viele Menschen möglich wird, da Material günstig und in naher Umgebung vorhanden war. So konnte sich der Holzbau weiter ausbreiten und behielt auch nach der Entdeckung weiterer Baumaterialien wie Stein, Beton oder Stahl vorerst seinen dominierenden Stand im Bauwesen bei [36]. Im Jahre 725 n. Chr. entstand in Japan die fünfgeschossige, und 50 m hohe Pagode des Kōfuku-ji Tempels. Dies ist ein Beispiel einer ganzen Reihe von Bauwerken aus dieser Zeit und Region, die den schnellen Fortschritt des Holzbaus aufzeigen [39]. In Europa wuchsen vor allem im Mittelalter die Gebäude in Fachwerkbauweise hoch hinaus. Ein Beispiel hierfür stellt der alte Kornspeicher in Geislingen an der Steige dar, der 1445 mit sieben Stockwerken errichtet wurde [39]. Mit der voranschreitenden industriellen Entwicklung des Stahlbaus im 19. Jahrhundert und der demgegenüber späten Industrialisierung des Holzbaus zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelang es dem Stahlbau innerhalb weniger Jahre den Holzbau zu verdrängen [36]. Die brennbare Eigenschaft des Holzbaus verstärkte durch große Stadtbrände, wie z.B. im Jahr 1666 „The Great Fire of London“ [40] oder 1842 der Brand in Hamburg [41], diese Entwicklung.

Erst im 20. und 21. Jahrhundert wurde der Holzbau mit seinen Vorteilen „wiederentdeckt“. Neben den guten Eigenschaften bezogen auf das Raumklima eines Holzhauses und den damit einhergehenden positiven Wirkungen auf den Menschen spielen hier vor allem auch die Klimaschutzziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 [42] eine wichtige Rolle. In der „Charta für Holz 2.0“ wird die Einhaltung der vereinbarten Ziele unmittelbar mit der nachhaltigen Verwendung von Holz verbunden [37].

#### 4.1.2 Vor- und Nachteile

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits angedeutet, besitzt Holz sowohl positive als auch negative Eigenschaften, die auch das Bauen mit dem Baustoff bestimmen.

### Vorteile des Baustoffs Holz

Ökologisch und nachhaltig: Der Holzbau zeichnet sich durch eine besonders umweltfreundliche Bauart aus. Der Rohstoff trägt in der Wachstumsphase zur Speicherung von CO<sub>2</sub> bei und erhöht damit die Luftqualität. Durch eine überschaubare Wachstumszeit, bis ein Baum zu Nutzholz weiterverarbeitet werden kann, wird eine ökologische Planung der Waldnutzung umsetzbar [34]. Zudem kann Holz in vielen Bereichen und in vielen Produkten als Grundrohstoff dienen, was eine nahezu 100%ige Verwertung ermöglicht. Der Anbau von Holz ist global weit verbreitet möglich, was in vielen Fällen eine gute Verfügbarkeit und kurze Transportwege begünstigt. Hierbei ist auch darauf zu achten, dass die Ressourcen effizient genutzt werden, um auch regional nicht mehr Holz zu verwenden als nachwachsen kann [39]. Auch bei der Herstellung und beim Abriss von Holzbauteilen liegen diese beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich unter anderen Baustoffen [43].

Gute Verarbeitung und schnelle Bauweise: Holz lässt sich dank seiner Struktur mit verhältnismäßig wenig zuzuführender Energie verarbeiten [34], was auch die Herstellung von Holzbaustoffen attraktiv macht. Darüber hinaus lassen sich aus Abfallprodukten der Bauholzherstellung weitere Produkte bis hin zu Brennmaterial fertigen. Der hohe Grad der möglichen Vorfertigung spart Bauzeiten ein und ermöglicht so ein schnelles, effizientes Bauen, welches auch unabhängig von Witterung erfolgen kann. In [39] wird dies folgendermaßen beschrieben: „[...] schnell, trocken, wettbewerbsfähig und qualitativ hochwertig.“

Gesundes Raumklima: Wohn- und Aufenthaltsräume, die in Holzbauweise errichtet sind, führen oftmals zu einem besseren Wohlbefinden der Nutzer [39]. Auch im verarbeiteten Zustand, ist der Stoff dazu in der Lage, Feuchtigkeit aus dem Raum aufzunehmen und bei Bedarf abzugeben. Dadurch kann ein deutlich besseres Raumklima gehalten werden [39]. Auch besitzt Holz einen geringen Wärmeeindringkoeffizient, was das Material „warm“ wirken lässt [39].

Leichte Konstruktionen: Durch das geringe Eigengewicht der Holzbauteile im Vergleich zu Bauteilen in Massiv-, Beton- oder Stahlbauweise sticht Holz vor allem dort heraus, wo gewichtssparend gebaut werden muss. Hier ist mit der aufsteigenden Wohnungsnot in innerstädtischen Bezirken der Holzbau im Kommen [44]. Durch die Flexibilität der Bauart können vorhandene Situationen gut aufgegriffen und Gebäude(-teile) gut daran angepasst werden, und auch eine Erweiterung eines genutzten Gebäudes ist deutlich einfacher umsetzbar [43, 44].

## Nachteile des Baustoffs Holz

Brennstoff: Die Tatsache, dass Holz zuerst als Brennstoff von Menschen genutzt wurde, zeigt auf, dass es sich bei Holzbauteilen zwangsläufig um brennbare Bauteile handelt. Diese können mit zusätzlichen Materialien geschützt werden, die Holzkonstruktion an sich bleibt jedoch brennbar. Daraus ergibt sich ein selbstständiges Mitwirken der Bauteile bei einem Brandgeschehen. Holzbauteile stellen eine zusätzliche, immobile Brandlast dar, die in der Planung berücksichtigt werden und auf die entsprechend eingegangen werden muss.

Natürlicher Rohstoff mit natürlichen Feinden: Der natürliche Ursprung des Rohstoffs Holz hat nicht nur positive Eigenschaften auf unsere Umwelt und den Menschen selbst. Er besitzt ebenso Angriffsflächen für natürliche Feinde. Hierzu zählen neben den Witterungseinflüssen, die bei einer unsachgemäßen Verwendung oder auch Behandlung schaden können, auch Schädlinge, wie Insekten oder Pilze [45]. Auch hier sind entsprechende Schutzmaßnahmen erforderlich, um eine dauerhafte Haltbarkeit der Konstruktion zu gewährleisten.

### 4.1.3 Gründe für das Aufstreben des Holzbaus

Immer wieder stehen den positiven Eigenschaften des Rohstoffes Holz und des Holzbaus die Nachteile gegenüber. Dies hat bei einer ausgewogenen und sachlichen Betrachtung durchaus auch seine Berechtigung. Doch dürfen auch die Erfahrung und das Wissen um den Holzbau nicht außer Acht gelassen werden. Für viele negative Aspekte sind bereits Maßnahmen entwickelt worden, die Abhilfe schaffen können. Durch die Verknüpfung der Einhaltung der Klimaschutzziele mit dem Holzbau durch [37] kann nahezu eine Verpflichtung zur Weiterentwicklung und verstärkten Anwendung der Holzbauweise abgeleitet werden. Zugleich steigt das Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein vieler Bauherren und damit ebenso der Wunsch nach einem Gebäude in Holzbauweise mit möglichst umfänglicher Bauweise aus natürlichen Rohstoffen.

Hinzu kommen die vor allem in Ballungszentren dringend benötigten Wohnflächen, um dem wachsenden Wohnungsmangel [46] entgegenzuwirken. Durch seine leichte, flexible und schnelle Bauweise bietet sich hier der Holzbau zur Nachverdichtung ebenfalls verstärkt an.

## **4.2 Einblick in die Holztafelbauweise**

Der Holztafelbau entwickelte sich aus der Holzständerbauweise, eine Weiterentwicklung der Fachwerkbauweise, die schon seit Jahrhunderten im Hausbau angewendet wird [39]. Mit der Entwicklung der Plattenwerkstoffe im 20. Jahrhundert wurde hier der Holzbau entscheidend in die Richtung der Tafelkonstruktionen getrieben. Hierbei können die Vorteile der schlanken

Ständer, die zur Aufnahme der vertikalen Lasten aus dem Rähm dienen, mit der aussteifenden Wirkung der Plattenelemente kombiniert werden [39]. Die konstruktionsbedingt entstehenden Gefache können mit Dämmstoff ausgefüllt werden, was die Wärmedämmleistung deutlich erhöht. Damit sind die Elemente mit deren schlanken Querschnitten vor allem im Außenwandbereich beliebt.

Die Ständer, Rähm und Schwellen werden in der Regel mit Konstruktionsvollhölzern ausgeführt. Zur Abtragung höherer Lasten können auch Brettschichtholz- oder Stahlstützen zum Einsatz kommen [39]. Die Beplankung kann aus Gipswerkstoffplatten oder Holzwerkstoffplatten hergestellt werden. Auch Verschalungen aus Holzlatten sind möglich. Je nachdem wirkt sich die Beplankung mehr oder weniger positiv auf die aussteifende Funktion aus. Hier sind vor allem OSB-Platten beliebt, da diese neben einer guten aussteifenden auch eine gute luftdichte Wirkung mitbringen [39].

In den Abmessungen sind Holztafelbauteile frei gestaltbar. Üblicherweise wird ein Regelabstand von 62,5 cm zwischen den Achsen der Ständer vorgesehen, der sich auf eine Plattenbreite von 125 cm bezieht. Dennoch sind Öffnungen und tatsächliche Wandelemente in der Breite flexibel ausführbar. Eine skizzenhafte Darstellung der Konstruktion ist in Abbildung 3 gezeigt.

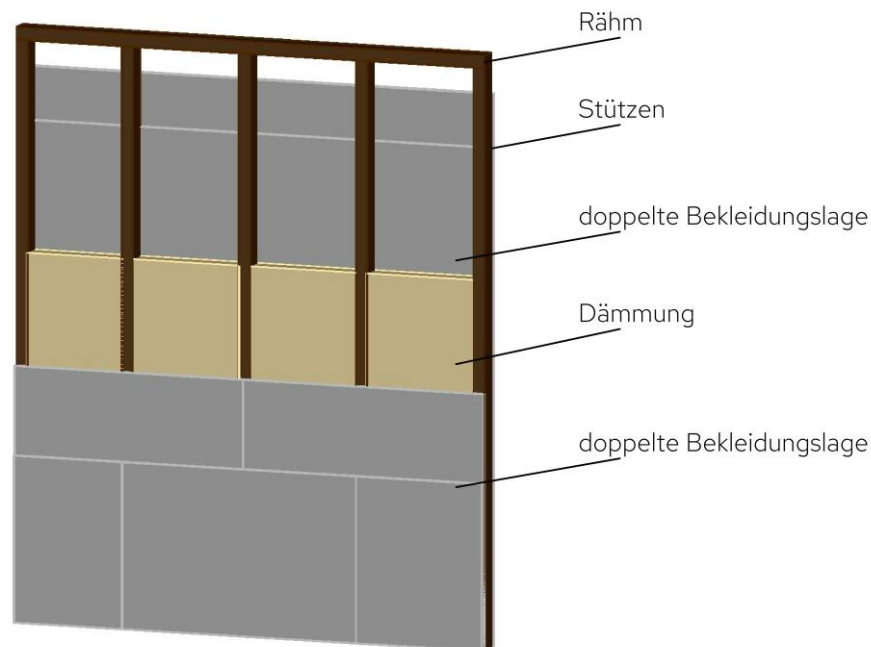


ABBILDUNG 3: AUFBAU DER HOLZTAFELBAUWEISE

Auch die Höhe der Bauteile lässt sich problemlos geschosshoch ausführen und durch den Aufbau ist hier vor allem eine materialsparende und leichte Konstruktion gegeben. Da die Elemente in einem sehr hohen Maße vorgefertigt werden können, eignen sie sich sehr gut für

eine schnelle Bauweise und sind nicht nur deshalb seit den 80er-Jahren auch in Europa mit eines der weitverbreitetsten Holzkonstruktionsverfahren für vertikale Bauteile [39].

### 4.3 Holz unter Brandbeanspruchung – thermodynamische Grundlagen

Der Ablauf eines Brandes in Holz ist abhängig von einer Vielzahl an Variablen. Zum einen ist der Brandverlauf selbst bestimmt von Parametern, die je nach Situation unterschiedlich ausfallen. Hier können die bekanntesten Einflussfaktoren wie Brandlast, Luft- bzw. Ventilationsbedingungen oder Verbrennungstemperatur als Beispiel genannt werden. Und auch der Baustoff Holz selbst bringt einige Eigenschaften mit, die sich auch auf das Brandverhalten und somit auf den Brandverlauf auswirken.

Zu Beginn ist hier eine kurze Übersicht über die unterschiedlichen Entzündungsstadien des Holzes zu nennen. Die Angaben basieren auf [34] und sind abhängig von Holzart, Rohdichte, Holzinhaltsstoffe oder auch Feuchtegehalt des Holzes, wie auch aus anderen Arbeiten wie z.B. in [47–49] entnommen werden kann:

Als „Flammpunkt“ wird die Temperatur betrachtet, bei der das Holz bei Vorhandensein einer Fremdflamme zu brennen beginnt. Dieser liegt üblicherweise bei 200-250°C. Ab einer Temperatur von 260-290°C wird der „Brennpunkt“ erreicht. Hier kann das Holz nach der Entfernung der Fremdflamme eigenständig weiterbrennen. Dieser Zeitpunkt ist nicht mit dem „Zündpunkt“ zu verwechseln, der bei 330-520°C liegt. Ab dieser Temperatur können sich aus dem Holz austretende Gase in Verbindung mit Sauerstoff ohne Fremdflamme selbstständig entzünden.

Bei Holz handelt es sich grundsätzlich um einen brennbaren Stoff der Klassifizierung „normalentflammbar“ nach [8] und [10]. Je nach Rohdichte erfolgt die Zersetzung bei einem Brand unterschiedlich. In [34] wird hierzu eine Einteilung anhand der Rohdichte  $\rho$  vorgenommen. Dabei sind Holzarten mit einer Rohdichte von  $\rho \leq 300 \text{ kg/m}^3$  als sehr gut brennbar bezeichnet. Liegt die Rohdichte zwischen 300-1.000  $\text{kg/m}^3$  gelten diese Holzarten als mittelmäßig brennbar. Bei einer Rohdichte  $\rho > 1.000 \text{ kg/m}^3$  wird eine schlecht brennbare Eigenschaft angenommen.

Grundsätzlich ähneln sich die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen, wobei bei Holzwerkstoffen die Zusätze, wie Leim oder Feuerschutzsalze einen Einfluss auf das Brandverhalten und den Brandverlauf aufweisen [34]. Bei vielen Forschungen wird vor allem der Feuchtegehalt des Holzes in Verbindung mit dem Brandverlauf und dessen Einfluss betrachtet, wie z.B. in [49]. In Holz wird dabei Wasser in den Fasern gespeichert, oder auch als freies Wasser in den größeren Zellhohlräumen aufgenommen. Eine Fasersättigung kann bei

allen Holzarten mit 28% angenommen werden, der restliche Feuchtegehalt wird als freies Wasser eingelagert [50].

### 4.3.1 Der Brand

Ein Brand (im Feuerwehrwesen als Schadfeuer bezeichnet [51]) ist eine chemisch-physikalische Reaktion, bei dem eine Vielzahl von Prozessen stattfinden. Typisch hierfür ist die Abgabe von Wärme, die sich die Menschen seit Jahrtausenden zu Nutze machen. Für ein Bauwerk stellt ein Brand eine besondere Ausnahmesituation dar. Anders als andere physikalische Einflüsse wie Schall, Feuchte, Wärme oder Licht tritt diese Einwirkung nur sehr unwahrscheinlich und bei einem Bauwerk in der Regel nur einmalig auf [52].

Damit ein Brand entstehen kann, sind vor allem ein brennbarer Stoff und Sauerstoff erforderlich. Beides muss in einem richtigen Mischungsverhältnis zueinanderstehen. Als weitere Grundvoraussetzung ist aber auch eine erforderliche Zündenergie bzw. Zündtemperatur zur Entfaltung des Brandes notwendig. Damit die Kettenreaktion des Brennens erhalten bleibt, werden Katalysatoren benötigt, um die Reaktionen voranzutreiben. Diese Katalysatoren werden bei einem Brandvorgang selbstständig erzeugt (z.B. Ruß) [52]. Die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten bestimmt den Brandverlauf.

In [52] wird die Pyrolyse, oder auch der Zersetzungsprozess, bei einem Brand als wichtiger Prozess bezeichnet. Hierbei treten in Folge der einwirkenden Temperatur aus dem brennbaren Stoff brennbare Gase aus und eine Verbrennung kann stattfinden. Brennt der (feste) brennbare Stoff selbst (z.B. Holz), ist dieser Prozess durch eine Glutbildung ersichtlich. Flammen entstehen dagegen nur bei Gasbränden und Flüssigkeiten. Einen Überblick über die Einflussfaktoren zur Pyrolyse und dem Verbrennungsvorgang gibt Abbildung 4.

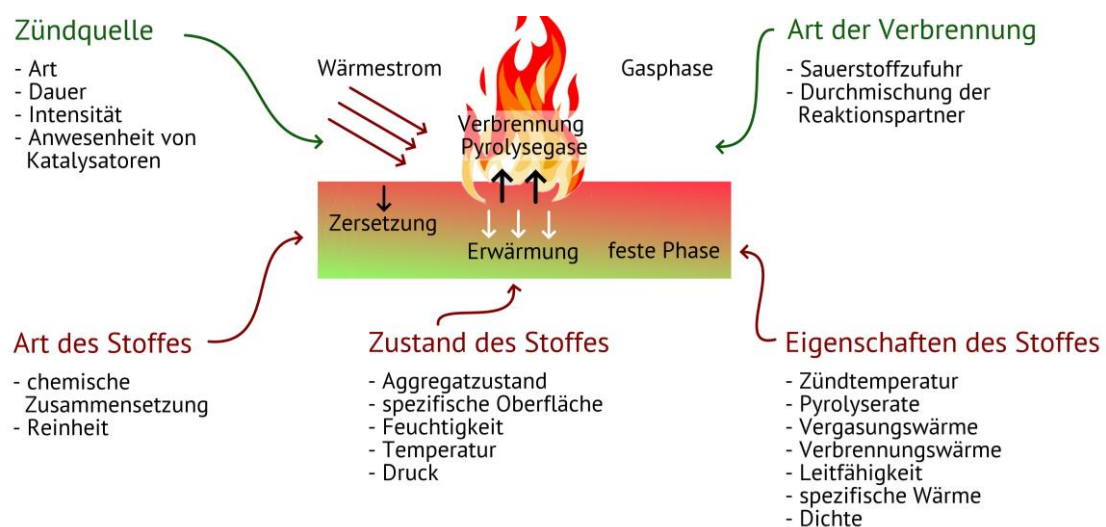


ABBILDUNG 4: EINFLUSSFAKTOREN ZUR PYROLYSE UND VERBRENNUNG NACH [52] AM BEISPIEL EINES FESTEN STOFFES

Jeder natürlich vorkommende Brand kann in drei Brandphasen unterteilt werden, die nur in deren zeitlicher Ausdehnung und Temperaturentwicklung unterschiedlich ausfallen können [52].

Nach der Zündung eines Brandes (die in vier-phasigen Modellen als eigene Phase beschrieben wird) geht der Brand in die Schwelbrandphase über. Hier ist eine allmählich voranschreitende Brandausbreitung unter Freisetzung von Wärme und vor allem Brandrauch zu erkennen. Die Temperatur im Raum steigt mehr oder weniger schnell, bis ein Feuerübersprung, der Flashover, auf die gesamte, im Brandraum vorhandene Brandlast stattfindet. Nach dem Flashover erfolgt die Erwärmungsphase der Vollbrandphase. Hier ist vor allem die starke Wärmeentwicklung im Brandraum typisch. Eine wesentliche Steuerung des Brandgeschehens erfolgt hier neben der Brandlast vor allem durch die gegebenen Ventilationsbedingungen [52]. In dieser Phase werden die Umfassungsbauteile des Brandraumes aufgeheizt und je nach deren Wärmeleitfähigkeit wird ebenso Wärme an die angrenzenden Bereiche weitergegeben. Dies stellt die eigentliche Brandbeanspruchung der Bauteile dar [52]. Ist ein Großteil der vorhandenen Brandlast verbrannt (Richtwert 70% der gesamten Brandlast) geht der Brand in die Abkühlphase über. In dieser Phase klingt das Brandgeschehen langsam ab, wobei die in den Bauteilen aufgenommene Wärme wieder an den Brandraum abgegeben wird. Durch diesen Prozess wird der Verlauf der Abkühlphase entscheidend mitbestimmt. Die Brandphasen sind in Abbildung 5 aufgezeigt.

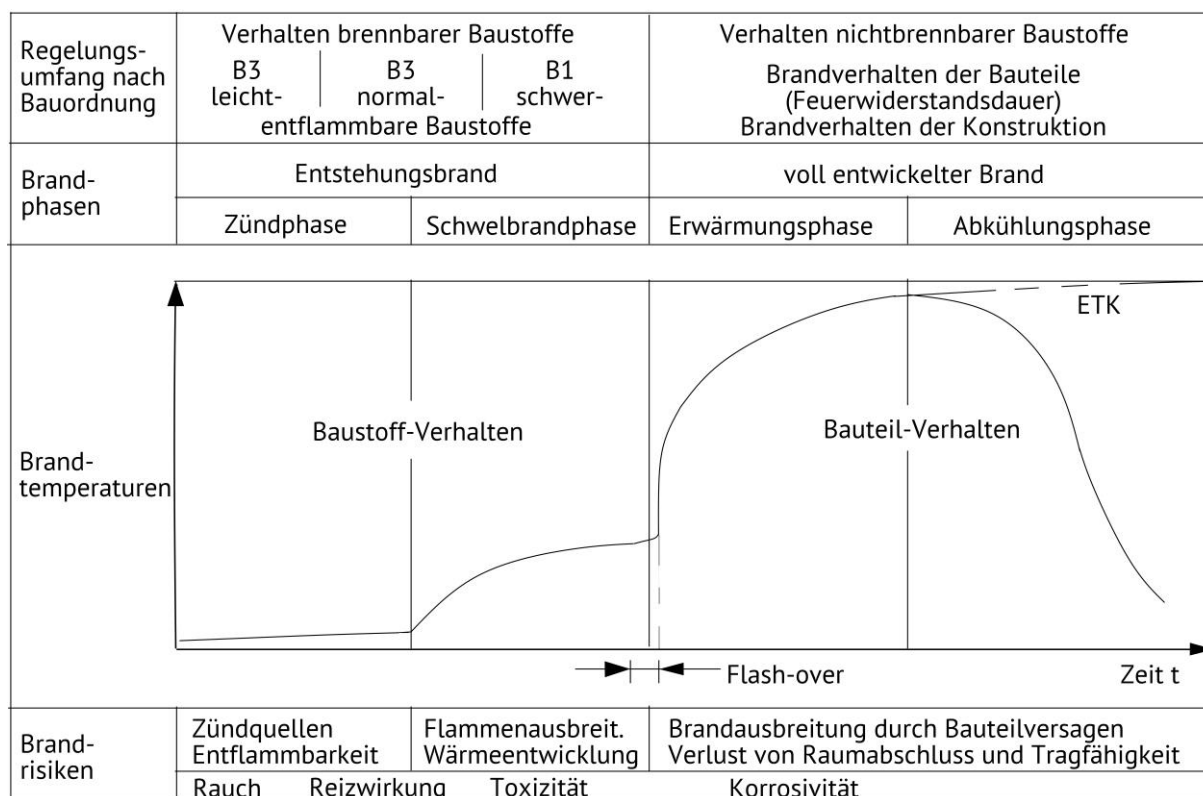


ABBILDUNG 5: BRANDPHASEN MIT ANGABEN ZU BAUAUFSICHTLICHEN ANFORDERUNGEN NACH [52]

Brandnebenprodukte

Ein Brandnebenprodukt, welches bei einem kontrollierten Feuer gerne von Menschen genutzt wird, ist die Wärme. Doch hier muss auch die negative Wirkung auf Bauteile, Konstruktionen und lebenden Organismen genannt werden. Daneben gibt es weitere Brandnebenprodukte, die Berücksichtigung finden müssen.

Eines hiervon ist der Brandrauch. Dieser behindert die Sicht in einem Brandraum erheblich und transportiert zudem nicht nur unverbrannte Rückstände der Brandlast, sondern auch Gase, die eine schädliche Wirkung auf den Menschen aufweisen. Rauch weist hohe Temperaturen auf, die zu Schäden führen können, doch liegt die Gefahr für Personen und Tiere vor allem in den darin enthaltenen toxischen Stoffen in Form von Gasen. Laut Statistiken sind 80% der Brandopfer Rauchopfer [52]. Durch die deutschlandweit geltende Rauchmelderpflicht, die auch Nachrüstungen in Bestandswohnungen vorschreibt [53] konnte die Anzahl der Rauchopfer seit der Einführung der Rauchmelderpflicht halbiert werden. Die Personen sterben durch eine Rauchgasintoxikation, die Erstickungen, Vergiftungen und Verletzungen der Lunge und/oder Atemwege durch toxische Chemikalien oder auch Verbrennungen durch die heißen Gase verursachen kann [54]. Die bekanntesten Gase sind hier Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), die bei jeder Brandreaktion entstehen. Weiter sind Blausäure, Formaldehyd und Halogene wie Chlorkohlenwasserstoffe nur einige Gase, die als Brandnebenprodukt im Rauch mitschweben.

Die Abbildung 6 macht deutlich, wie wichtig eine raumabschließende Funktion der Umfassungsbauteile ist, um eine Übertragung der Temperatur und auch der toxischen Gase in benachbarte Bereiche so lange wie möglich zu verhindern.

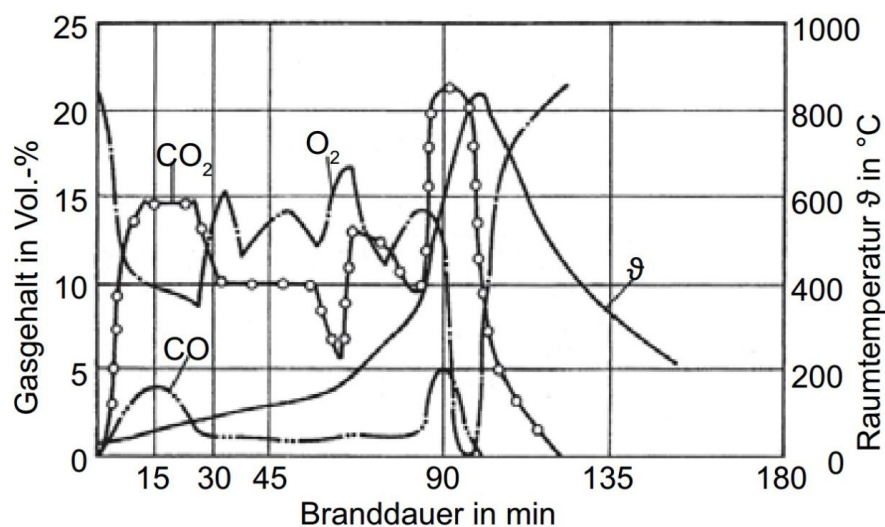


ABBILDUNG 6: ANALYSE DER TOXISCHEN GASE UND TEMPERATURENTWICKLUNG IM NACHBARRAUM DES BRANDRAUMES [52] (MESSUNGEN VON SAUERSTOFF O<sub>2</sub>; KOHLENDIOXID CO<sub>2</sub>; KOHLENMONOXID CO UND DER TEMPERATUR)



In den ersten 15 Minuten nach Brandausbruch ist ein deutlicher Abfall des Luftsauerstoffgehalts im benachbarten Raum zu verzeichnen. Gleichzeitig steigt die Konzentration von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sprunghaft an. Eine Kohlenmonoxidkonzentration von 3 – 4 Vol.-% ist dabei als tödlich einzustufen [52]. Nach diesen Messungen in [52] wäre ein Überleben im Nachbarraum nicht möglich. Die Temperatur im Nachbarraum erhöht sich dagegen deutlich langsamer, was jedoch vor allem von der Bauweise der Umfassungsbauteile abhängig ist.

### Nominelle Temperaturzeitkurve

Um einen einheitlichen Brandverlauf zu definieren, der für die Brandschutzbemessung von Bauteilen und Baustoffen verwendet werden kann, wurde auf internationaler Ebene die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) entwickelt. Diese bildet einen Brandverlauf, beginnend bei einem möglichen Auftreten eines Flashovers, über die Erwärmungsphase in der Vollbrandphase ab. Besonderheiten dieser Brandkurve ist die schnelle, steile Temperaturerhöhung und der immer weiterführende Temperaturanstieg.

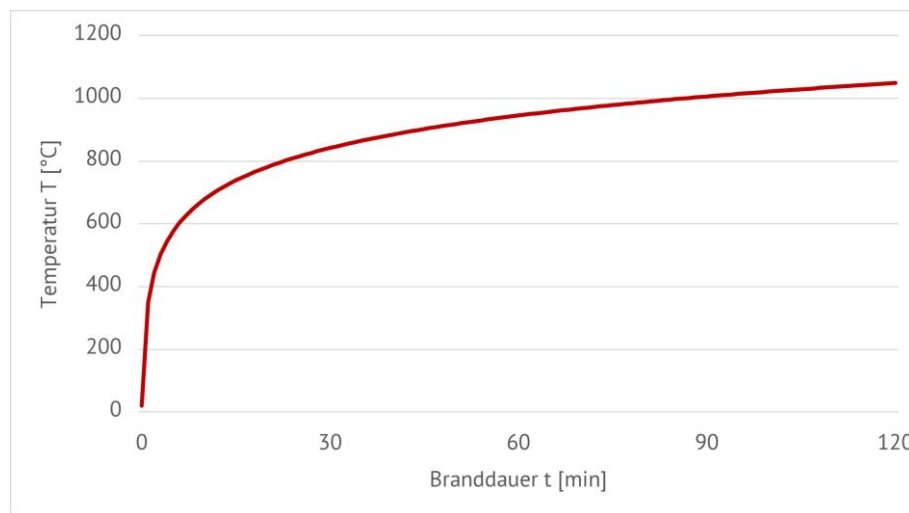


ABBILDUNG 7: EINHEITSTEMPERATURZEITKURVE NACH [18]

Eine Abkühlphase wird, ebenso wie eine Zünd- oder Erwärmungsphase, in der nominellen Temperaturzeitkurve nicht vorgesehen. Die mathematische Berechnung der ETK kann nach [18] durch Gleichung (6) erfolgen. Dabei wird immer eine Raumtemperatur zum Brandbeginn von 20°C angenommen.

$$T = 354 \log(8 t + 1) + 20 \text{ [min]} \quad (6)$$

mit:  $T$  mittlere Ofentemperatur [°C]  
 $t$  Branddauer [min]

Die Kurve dient als Maßstab, an dem der Feuerwiderstand von Bauteilen gemessen und verglichen werden kann, und weist ein ausreichendes Sicherheitsniveau auf, um die bauaufsichtlichen, brandschutztechnischen Anforderungen zu bemessen.

#### 4.3.2 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung zu und innerhalb eines Bauteils als Teilgebiet der Wärmelehre folgt den Hauptsätzen der Thermodynamik. Die Übertragungswege sind dabei immer in Form der Wärmeleitung (Konduktion), Konvektion und Wärmestrahlung vorzufinden. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 8 aufgeführt. Folgend werden die drei Hauptsätze kurz beschrieben.

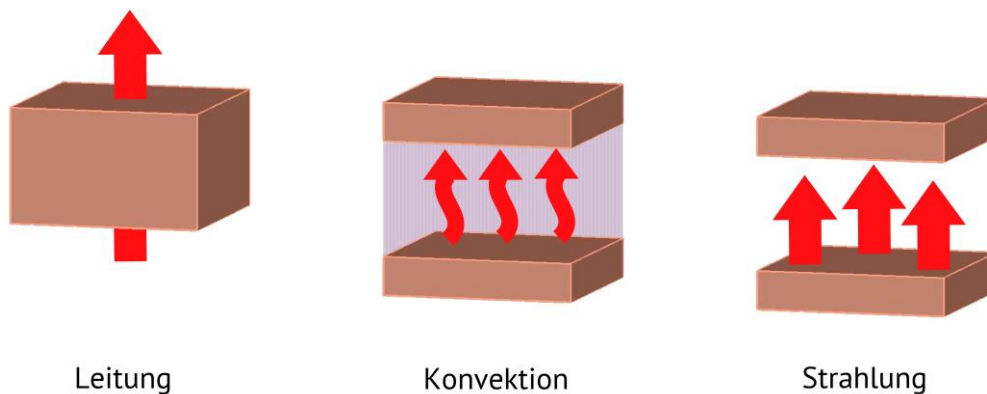


ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMEÜBERTRAGUNGSWEGE VGL. [52]

Der **erste Hauptsatz** der Thermodynamik ist der Energieerhaltungssatz. Wärme ist hierbei als eine innere Energie definiert, die nur durch Hinzuführen und Entnehmen von Wärme oder mechanischer Arbeit verändert werden kann [20]. Dies kann durch Gleichung (7) ausgedrückt werden.

$$\Delta U = Q + W \quad (7)$$

mit: $\Delta U$	Änderung der inneren Energie [J]
$Q$	Wärmeenergie [J]
$W$	Arbeitsenergie [J]

Daraus folgt, dass die innere Energie eines Systems nicht verloren geht oder neu entstehen kann. Sie kann jedoch die Form ihres Daseins wechseln.

Der **zweite Hauptsatz** der Thermodynamik beschreibt, dass Wärmeenergie von selbst immer von der warmen zur kalten Seite oder von einem warmen Körper zu einem kalten Körper strömt, um einen Temperatenausgleich zu erhalten [20, 52].

Im **dritten Hauptsatz** wird beschrieben, dass der absolute Nullpunkt nicht erreicht werden kann.

Für die Betrachtung eines Brandereignisses sind der erste und zweite Hauptsatz relevant. Bei einem Brandereignis wird die entstehende Energie zu einem deutlich überwiegenden Teil in Form von Wärme eingeleitet, weshalb diese Betrachtung ausschlaggebend ist [20]. Nach [55] ist die Wärmeübertragung in das System eines Bauteils über dessen Oberfläche mit Konvektion und Strahlung zu berücksichtigen. Innerhalb des Bauteils ist die Wärmeleitung mit vorzusehen. Eine schematische Darstellung erfolgt in Abbildung 9.

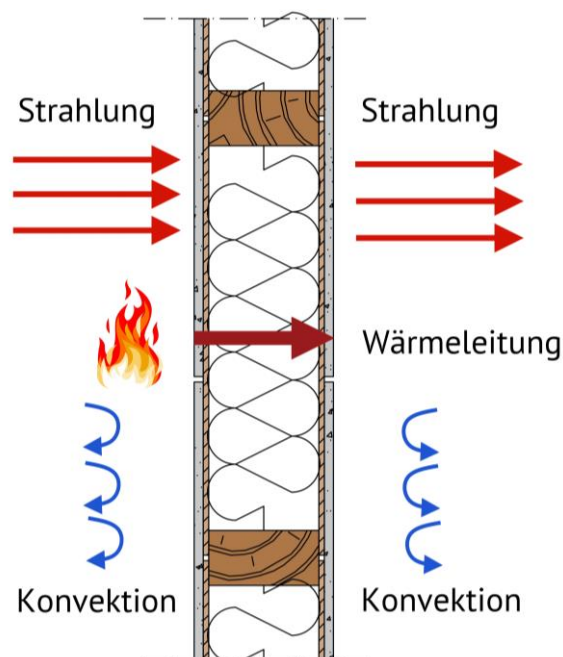


ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMEÜBERTRAGUNGSWEGE NACH [20]

#### 4.3.2.1 Wärmeleitung (Konduktion)

Unter Wärmeleitung, mit der stoffspezifischen Größe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/m<sup>2</sup>K], wird die Übertragung von Wärmeenergie innerhalb eines Materials oder zwischen Materialien, die miteinander in Berührung stehen, verstanden. Die Übertragung erfolgt durch stark schwingende Moleküle, Atome oder Elektronen, die durch Stoßvorgänge die Energie an die schwächer schwingenden weitergeben [20, 52].

Es muss bei der Wärmeleitung zwischen der stationären und der transienten (instationären) Wärmeleitung unterschieden werden. Ein stationäres System kennzeichnet sich dadurch aus, dass die Temperatureinwirkung unabhängig von der zeitlichen Größe erfolgt. Transiente Vorgänge haben dagegen eine über die Zeitschiene variierende Temperatureinwirkung. Ein Brandereignis spiegelt demnach einen transienten Prozess wieder [20]. Dieser kann nach der Fourier'schen Wärmeleitgleichung beschrieben werden, die in Gleichung (8) aufgeführt wird [24, 56].

$$c(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \left( \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + W \quad (8)$$

mit: $\vartheta$	aktuelle Temperatur [K], [°C]
$t$	Zeit [s]
$\lambda(\vartheta)$	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$c(\vartheta)$	spezifische Wärmekapazität [J/kgK]
$\rho(\vartheta)$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$x, y, z$	Ortsangaben der Koordinatenachse
$W$	innere Wärmequelle [J/sm <sup>3</sup> ], [W/m <sup>3</sup> ]

Daraus kann abgeleitet werden, dass die wesentlichen Einflussfaktoren der Wärmeleitung die Parameter Rohdichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Materials sind.

#### 4.3.2.2 Konvektion (Wärmeströmung)

Die Konvektion, oder auch Wärmeströmung, beschreibt die Wärmeübergabe eines Körpers an ein vorbeiströmendes Medium (Luftteilchen) oder auch umgekehrt [52]. Die Übertragung erfolgt dabei über Bewegungen in Fluidteilchen, welche die Wärmeenergie anschließend an

einer anderen Stelle wieder abgeben [49]. Die Übertragungsintensität ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, der Oberflächentemperatur des Körpers und der Temperatur des strömenden Mediums. Auch die Rauigkeit der Oberfläche muss berücksichtigt werden.

Durch die bei einem Brand entstehenden Temperaturunterschiede zwischen der Luft und den umgebenden Bauteilen ist bei den untersuchten Problemen auch die Wärmeübergabe der Kontaktstelle der Luft und der Oberfläche des Bauteils entscheidend. In dieser Grenzschicht ist neben der Konvektion auch die Wärmeleitung zu berücksichtigen [20, 24]. Unterschieden werden muss auch zwischen einer freien und einer erzwungenen Konvektion. Ein Brandgeschehen verursacht bei der Wärmeübertragung vom Brandraum in das Bauteil eine erzwungene Konvektion, charakterisiert durch die Bewegung der Fluide durch Druckunterschiede. Die Übergabe der Wärme von der brandabgewandten Seite des Bauteils an die Raumluft des angrenzenden Bereiches erfolgt dagegen als freie Konvektion, bestimmt durch temperaturbedingte Dichteunterschiede [49].

Die Konvektion wird bei dem hier behandelten Problem mit der Berücksichtigung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ausgedrückt. Nach [55] ist für den Übergang der Luft aus dem Brandraum an die Bauteiloberfläche ein Wert von  $25\text{W/m}^2\text{K}$  vorzusehen. Der Übergang der brandabgewandten Bauteiloberfläche an die Raumluft aus dem angrenzenden Bereich wird mit  $4\text{W/m}^2\text{K}$  bestimmt, es sei denn die Wärmeübertragung durch Strahlung ist an dieser Stelle mit zu berücksichtigen, wodurch ein Wert von  $9\text{W/m}^2\text{K}$  angenommen werden muss. Hierbei handelt es sich vereinfachte Werte, die eine ausreichende Genauigkeit bei der Durchführung von numerischen Simulationen ergeben. Tatsächlich stellt der Wärmeübergangskoeffizient jedoch keine Konstante dar.

#### 4.3.2.3 Wärmestrahlung

Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass es keine Körper mit einer Temperatur von  $0\text{K}$ , also dem absoluten Nullpunkt gibt. Folglich strahlt jeder Körper Wärme ab [20]. Die Wärmestrahlung beschreibt den über eine Temperaturdifferenz hervorgerufenen Wärmetransport anhand elektromagnetischer Wellen [52]. Dieser Transport kann unabhängig von weiteren Medien erfolgen und ist somit der einzige Wärmetransport, der auch im Vakuum stattfindet. Erforderlich für den Wärmetransport zwischen zwei Körpern ist eine unbehinderte „Sichtverbindung“ [24]. Jede Strahlung, die auf einen Körper trifft, wird von diesem absorbiert, reflektiert oder emittiert [49]. Das Kirchhoff'sche Gesetz besagt, dass der Emissionsgrad ( $\epsilon$ ) eines Körpers dessen Absorptionsgrad ( $\alpha$ ) entspricht. Ein Körper, der die gesamte Strahlung, die auf ihn trifft, absorbiert, wird als „schwarzer Körper“ bezeichnet ( $\alpha=1$ ).

In der Realität existieren solche „schwarzen Körper“ jedoch nicht. Das bedeutet, der Emissionsgrad liegt zwischen 0 und 1. Diese Körper werden „graue Körper“ genannt [20, 52]. Das Emissionsvermögen eines grauen Körpers wird durch den Emissionskoeffizienten ( $\epsilon$ ) ausgedrückt.

Die elektromagnetischen Wellen, welche die Wärmeenergie übertragen, bestehen aus lang- und kurzwelligem Strahlen und liegen nur zu einem geringen Anteil in einem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich. Die kurzwellige Strahlung, die die Sonnenstrahlung abbildet, verläuft in einer Wellenlänge von  $<380\text{nm}$  (UV-Strahlung) bis zu  $3.000\text{nm}$  [52]. Dabei befinden sich nur 47% der Strahlung in einem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich. Langwellige Sonneneinstrahlung liegen in einem Bereich bis zu  $3.000\text{nm}$  ( $=3\mu\text{m}$ ). Weitere Wärmestrahlung kann eine Wellenlänge bis zu  $800\mu\text{m}$  aufweisen. Für das menschliche Auge erkennbar ist dabei lediglich die Strahlung bei einer Wellenlänge von  $380\text{nm}$  bis hin zu  $780\text{nm}$  [52]. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz besagt, dass mit einer steigenden Temperatur sich die maximale Strahlungsintensität weiter in den kurzwelligem, und damit in den optisch sichtbaren Bereich verschiebt [52]. Am Brandgut ist dann ein Glühen zu sehen [49].

Die [55] gibt Koeffizienten an, die die Emissivität bei einem Brandereignis beschreiben sollen. So kann vereinfacht für die Flamme ein Emissionskoeffizienten von  $\epsilon_f = 1,0$  und für die Bauteiloberfläche  $\epsilon_m = 0,8$  angenommen werden [1, 55].

#### 4.3.3 Thermische Einwirkung auf Holzbauteile

Die unter Abschnitt 4.3.2 beschriebenen thermodynamischen Grundlagen können auch auf ein Brandereignis übertragen werden. Dabei wird sowohl die Wärmeübertragung vom Brandereignis auf das Bauteil als auch die Wärmeabgabe der brandabgewandten Bauteilseite an die angrenzende Raumluft berücksichtigt und die Weitergabe der Wärme innerhalb des Bauteils. Dabei erfolgt die Temperatureinwirkung auf das Bauteil über Konvektion und Strahlung, die Wärmeweitergabe innerhalb der Konstruktion durch Wärmeleitung und die Abgabe der Wärme an benachbarte Raumluft an der Kaltseite wieder durch Konvektion. Bei einer Betrachtung des Bauteils wird die umgebende Raumluft brandabgewandt immer mit  $20^\circ\text{C}$  angenommen. Dies ist auch in der Einheitstemperaturzeitkurve nach [18] ersichtlich.

Ein wichtiger Begriff in Bezug auf die Temperatureinwirkung eines Bauteils als Holzkonstruktion und dessen Abbrand stellt das Wort „Pyrolyse“ dar. Dabei handelt es sich um eine Zusammensetzung der Begriffe „pȳr“ aus dem griechischen Wort für Feuer und „lýsis“, dem ebenfalls griechischen Wort für Lösung/Auflösung [49]. Der Begriff bedeutet demnach die chemische Zersetzung organischer Stoffe aufgrund thermischer Einwirkung [49]. Durch die bei der Zersetzung entstehenden brennbaren Stoffe bildet sich an der Oberfläche

ein Gemisch, welches selbstständig brennt und Wärmeenergie freisetzt, wodurch die Reaktionskette des Brandes erhalten bleibt. Die Grenze, an der diese Reaktion auch optisch erkennbar ist, wird als Abbrandgrenze bezeichnet. Je nach Holzart wird diese üblicherweise zwischen 200 und 360°C angenommen [20, 49, 57].

#### 4.3.3.1 Aufbau des Holzes/der Holzstruktur

Holz ist in seiner natürlichen Hauptfunktion für den Transport von Wasser aus den Wurzeln zu den Blättern, für die Sicherung der Standfestigkeit eines Baumes und für die Speicherung der biochemischen Stoffe innerhalb des Baumes verantwortlich [50]. Die elementare Zusammensetzung der unterschiedlichen Holzarten ist nahezu identisch. Diese besteht aus 48-50% Kohlenstoff, 43-45% Sauerstoff, 5-6% Wasserstoff und 0,023-0,04% Stickstoff [58]. Die Stabilität und Widerstandsfähigkeit des Holzes werden durch die Zellen, bzw. Zellwände gewährleistet. Letztere bestehen aus den Stoffen Cellulose (40-60%), Hemicellulose (15-20%) und Lignin (15-40%). Die Anteile variieren dabei von Holzart zu Holzart und verursachen damit die unterschiedlichen Eigenschaften der Hölzer, vor allem bei der Festigkeit [58]. Diese wird überwiegend durch die Bestandteile Hemicellulose und Lignin bestimmt. Die Cellulose begünstigt die Stabilität des Holzes [58]. Die auch als Polyosen bezeichneten Hemicellulosen, bestehen aus Mehrfachzuckern und sind hinsichtlich der thermischen Beanspruchung besonders empfindlich [50]. Bei einer Brandbeanspruchung zersetzen sich diese daher schon bei verhältnismäßig geringen Temperaturen (160°C – 180°C [49]).

#### 4.3.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Baustoffs gibt an, welche Wärmemenge bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin zwischen beiden Oberflächen des Baustoffs von 1m<sup>2</sup> Größe und einer Dicke von 1m hindurchfließt. Baustoffe bestehen meist aus festem Material und Luft, welche zwischen den festen Bestandteilen eingeschlossen wird. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Baustoffs liegt zwischen der Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile und der der Luft. Das bedeutet, je poröser ein Baustoff ist, d.h. je mehr Luft in diesem eingebunden ist, desto näher liegt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei der der Luft [52]. Wie abhängig die Ergebnisse bei einer Betrachtung der der Wärmeleitfähigkeit von Messverfahren, Holzart, Feuchtegehalt, Rohdichte u.v.m. ist [47], wird in Abbildung 10 (oben) ersichtlich. Erkennbar ist hier vor allem im Temperaturbereich bis 500°C, dass die Norm [1], auch in Abbildung 10 (unten), einen guten Durchschnitt zu den übrigen Kurven bietet. Auch ist hier zu erkennen, dass der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei höheren Temperaturen, wie sie bei einem Brand auftreten, noch besser erforscht werden muss [49]. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist in W/m<sup>2</sup>K angegeben. Die in [1] aufgeführten Materialkennwerte

werden als effektive Materialkennwerte betrachtet, bei denen Effekte wie der Feuchtetransport oder die Pyrolyse eingebunden wurden, die in der Fourier'schen Wärmeleitgleichung nicht berücksichtigt werden.

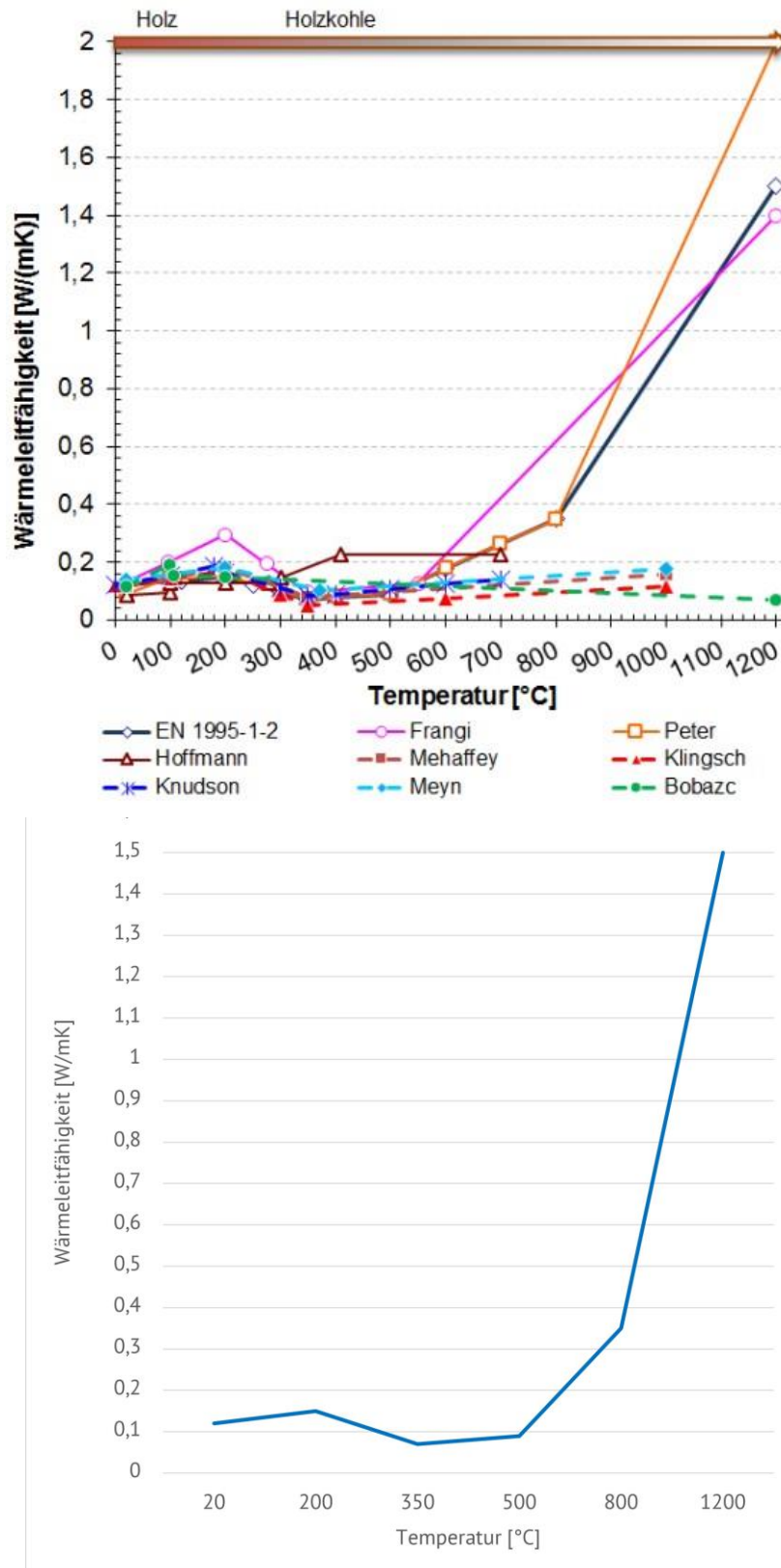


ABBILDUNG 10: OBEN: ÜBERSICHT WÄRMELEITFÄHIGKEIT [49]; UNTEN: WÄRMELEITFÄHIGKEIT VOLLHOLZ NACH [1]



In vielen Untersuchungen zum Thema Holz und seinen Einflussfaktoren auf das Brandverhalten wurde immer wieder ein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Holz und dessen Dichte, Temperatur und Feuchtegehalt betrachtet [24, 49, 50]. Da sich bei einer Brandbeanspruchung auch die Zusammensetzung von Holz mit einwirkender Temperatur ändert, begründet dies die in Abbildung 10 gezeigte Änderung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Zu diesen Änderungen wurden eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, von denen z.B. in [24, 49] eine Übersicht geboten wird.

Wie in [59] beschrieben, kann die Änderung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in Abhängigkeit zur Reaktion der Feuchtigkeit im Bauteil gesehen werden. In der Verdampfungsphase des Wassers zwischen ca. 100-200°C kann ein leichter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit erkannt werden. Ist das Wasser vollständig verdampft und das Holz befindet sich im darrtrockenen Zustand, wird ein Absinken der Wärmeleitfähigkeit registriert [50]. Wie andere Projekte zeigte auch [24] nach einer kurzen Phase der Steigung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei Temperaturerhöhung ein weiteres Absinken dieser im Temperaturbereich von 300-350°C, in dem sich das Holz durch die Pyrolyse in Holzkohle zersetzt. Bei ca. 500°C kann ein Glühen von Holz und eine entsprechende Rissbildung angenommen werden, was zu einem starken Anstieg der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  führt [50]. Die [1] weicht von den gemessenen Werten ab, um die Rissbildung und den Abbau der Kohleschicht bei einem Brand in der Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen.

#### 4.3.3.3 Wärmekapazität

Bei der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  handelt es sich um die Angabe, welche Wärmemenge erforderlich ist, um eine Temperaturänderung von einem Kelvin in einem kg eines Stoffes zu erhalten. Der Wert steigt proportional zur zugeführten Energie [52] und ist bei Holzbaustoffen abhängig von der vorhandenen Holzfeuchte. So beschreibt [49] eine Steigerung der spezifischen Wärmekapazität mit steigender Holzfeuchte. Begründet werden kann dies mit einer deutlich höheren spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  von Wasser mit 4190J/kgK, welches bei einer Erwärmung ab ca. 100°C verdunstet. Je mehr Wasser im Holz enthalten ist desto mehr Energie muss aufgebracht werden um den darrtrockenen Zustand zu erreichen. Welch unterschiedliche Verläufe auch hier bereits bei Untersuchungen festgestellt wurde, zeigt, wie auch schon bei der Wärmeleitfähigkeit, die Vielzahl der Einflussfaktoren auf den Verlauf der spezifischen Wärmekapazität, siehe hierzu auch Abbildung 11 oben.

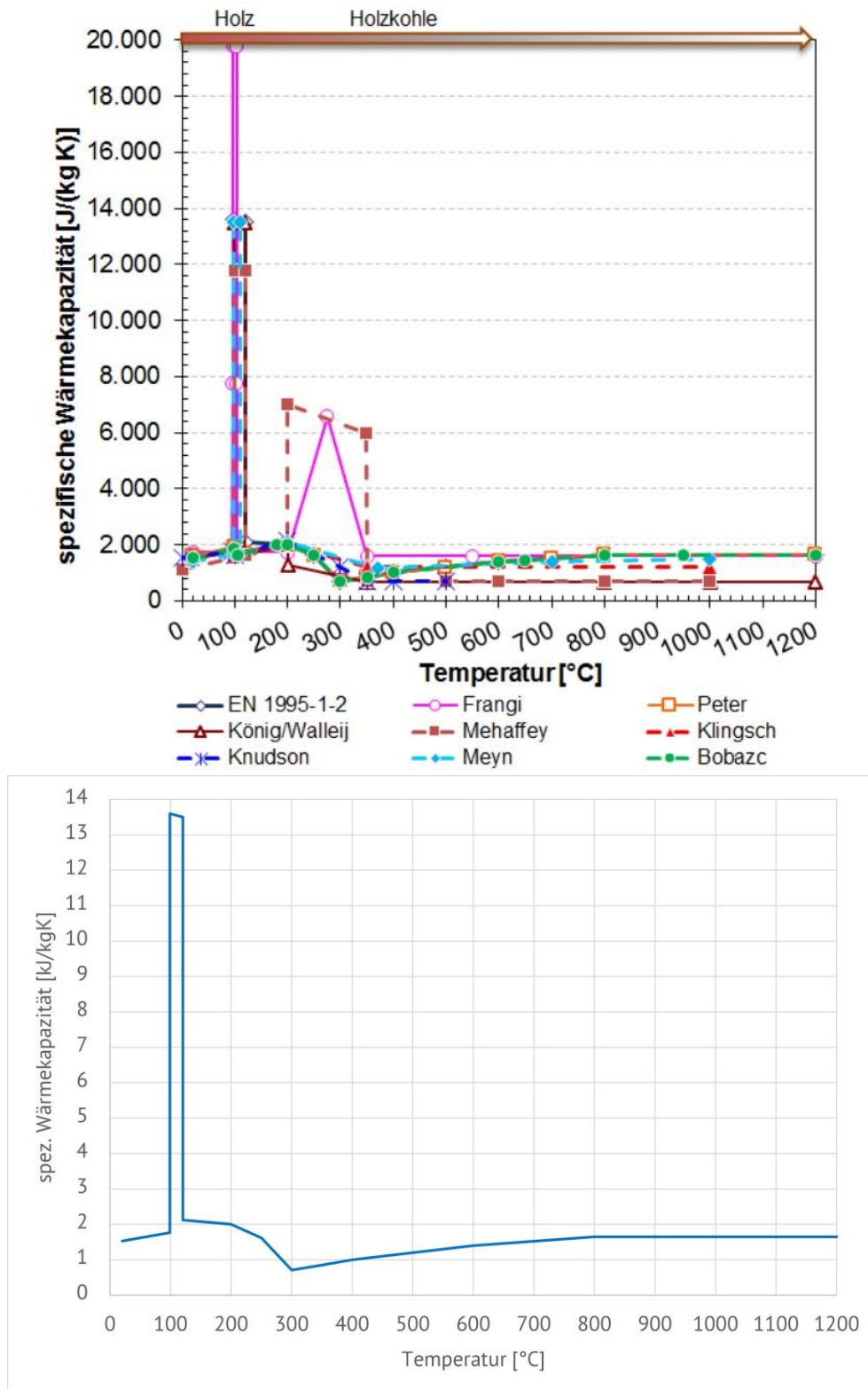


ABBILDUNG 11: OBEN: ÜBERSICHT SPEZ. WÄRMEKAPAZITÄT [49]; UNTEN: WÄRMEKAPAZITÄT VOLLHOLZ NACH [1]

Im untenstehenden Bild der Abbildung 11 wird der Verlauf nach [1] der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  von Holz und Holzkohle unter Temperaturbeanspruchung abgebildet. Bei einer Temperatur zwischen 99°C und 120°C erreicht das Wasser den Höhepunkt in der Verdampfungsphase, wofür ein deutlich höherer Energieaufwand (Wärmeenergie) von

2,26MJ/kg [50] erforderlich ist. In dieser Phase ist eine sprunghafte Steigerung der spezifischen Wärmekapazität zu erkennen. Nachdem das eingeschlossene Wasser verdampft ist, fällt die spezifische Wärmekapazität wieder ab und steigert sich bei höheren Temperaturen nur langsam mit Eintreten der Pyrolysephase. Der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität  $C_p$  von Holz ist dabei deutlich besser erforscht, als von Holzkohle [50].

#### 4.3.3.4 Verkohlung/Abbrand

Bei Temperatureinwirkung in Folge eines Brandes beginnt Holz sich ab einer Temperatur von ca. 250-300°C [34] zu zersetzen. Die Pyrolyse, oder umgangssprachlich auch Verkohlung, startet. Sichtbar wird dies durch die dunkle Färbung (hell- bis dunkelbraun), die das Holz in dieser Phase erhält, bevor sich Holzkohle bildet. Wie schnell die Zersetzung erfolgt, ist von Holzart zu Holzart und auch von Holzwerkstoff zu Holzwerkstoff unterschiedlich. Die Norm [1] zeigt hier unterschiedliche Abbrandraten. Die Abbrandrate beschreibt die Schichtdicke des Holzes in mm, die bei einer Brandeinwirkung auf das Holz in einer Minute in die Pyrolyse übergeht. Die Einheit wird folglich in mm/min angegeben. Auch wenn es Unterschiede zwischen den Holzarten und -werkstoffen bzgl. der Abbrandrate gibt, so zeigen Arbeiten wie z.B. [21] und [49], dass diese vereinfacht bei einem Holzbaustoff mit konstanter Geschwindigkeit angenommen werden kann. Die Kohleschicht, die von Holz ausgebildet wird, fungiert als Schutzschicht gegen eine direkte Wärmebeaufschlagung der dahinterliegenden Holzschichten durch den Brand. Fällt diese ab, erhöht sich zunächst die Abbrandrate der dahinterliegenden Holzschichten, bis wieder eine schützende Kohleschicht gebildet wurde. Diese neue Schutzschicht führt dazu, dass sich die Abbrandrate wieder angleicht [50, 59, 60]. Als Abbrandgrenze wird der Bereich bezeichnet, bei dem durch die braune Verfärbung die Pyrolyse schon erkennbar ist, jedoch noch keine Kohle gebildet wurde. Die aufgeführten Abbrandraten in [1] verdeutlichen, dass ein eindimensionaler Abbrand (Bauteil z.B. Wand) langsamer voranschreitet als ein Abbrand, bei dem ein Brand ein Bauteil (z.B. Pfeiler oder Stütze) von zwei oder mehreren Seiten angreifen kann.

#### 4.3.3.5 Rohdichte

Die Rohdichte ( $\rho$ ) bezeichnet die Masse eines  $m^3$  eines Stoffes ( $kg/m^3$ ). Bei Baustoffen oder Bauteilen aus Holz verringert sich die Dichte des Materials mit zunehmender Temperatureinwirkung eines Brandes. Dieser Vorgang wurde in vielen Forschungen bereits untersucht und beschrieben, u.a. in [20, 24, 49, 50]. Auch die Norm [1] beschreibt diese Dichteänderung in Abhängigkeit mit der Temperatur, wie in Abbildung 12 unten ersichtlich.

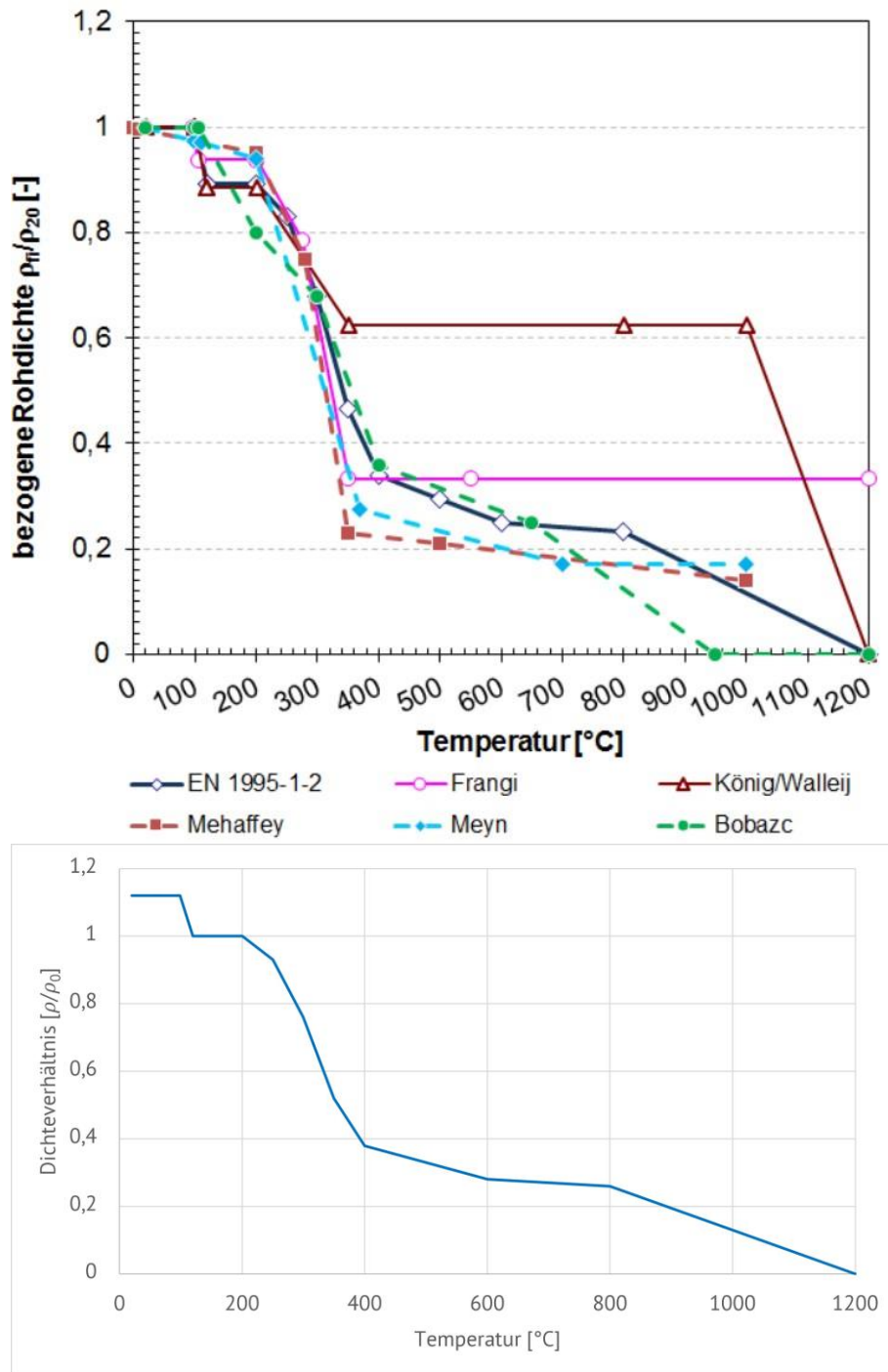


ABBILDUNG 12: OBEN: ÜBERBLICK DICHTEVERLAUF [49]; UNTEN: DICHTEVERLAUF VOLLHOLZ MIT ANFANGSFEUCHTE 12% NACH [1]

Erkennbar ist, dass bis zu einer vollständigen Verdampfung des im Holz eingebundenen Wassers kein Massenverlust und somit keine Änderung der Rohdichte erfolgt [1]. Bis zu diesem Zeitpunkt kann die Rohdichte aus der Darrrohichte ( $\rho_0$ ) und dem Feuchtegehalt mit Gleichung (9) ermittelt werden. Welch Streuungen bei diesen Messungen jedoch auftreten kann oben in Abbildung 12 aus [49] gesehen werden.

$$\rho = 1 + \omega \text{ [kg/m}^3\text{]} \tag{9}$$

mit: $\omega$	Holzfeuchte [%]
1	Dichteverhältnis Rohdichte zu Darrohdichte

Bis hin zu einer Temperatur von ca. 350-400°C im Holz ist ein starker Abfall der Masse zu erkennen, der in Verbindung mit dem Abbau der Cellulose und Hemicellulose steht [49]. Nach dieser Phase kann die Dichte noch mit ungefähr 20% des Ausgangswertes angenommen werden [50]. Im weiteren Verlauf der Brandphase beginnt das Holz zu glühen und zu oxidieren und verliert mit der Zersetzung in Holzkohle weiter an Masse [50]. Die Kohleschicht ist beständig bis ca. 800-1.200°C. Ab diesem Zeitpunkt kann die Dichte mit nahezu 0 angenommen werden [49].

#### 4.3.4 Ablauf der Holzzerersetzung im Brandfall

Wie in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben, tritt bei Holz und Holzwerkstoffen unter thermischer Beanspruchung eine Zersetzung mit einer Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen ein. Diese betrifft vor allem die Holzsubstanzen Cellulose und Lignin [52]. So beginnen bei einer Temperatur von ca. 105°C die flüchtigen und leicht zersetzbaren Inhaltsstoffe auszutreten. Hinzu kommt eine Veränderung in der Cellulose und Hemicellulose [34]. Bei zunehmender Temperatur steigt auch die Konzentration der austretenden Gase, die bei ca. 275-300°C ihren Höhepunkt erreicht. Die Pyrolyse setzt ein [34]. Für deren Beginn kann keine feste Temperaturangabe gemacht werden, da sich der Wert je nach Holzzusammensetzung und Einwirkdauer ändern kann. So wurden auch schon Pyrolysespuren an Holz beobachtet, bei dem die Temperaturbeanspruchung zwar deutlich unter 275°C lagen, dafür aber eine wesentlich längere Einwirkdauer aufwiesen.

Die Bereiche des Holzes, die in die Phase der Pyrolyse übergangen, werden zu Holzkohle zersetzt und weisen keine nennenswerte Festigkeit mehr auf [52]. Jedoch wird auch hier noch ein Beitrag zum Feuerwiderstand geleistet, da Holzkohle eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Holz aufweist und dadurch das Eindringen der höheren Temperaturen in tiefere Holzschichten hemmt [34].

Dabei ist aber auch zu beachten, dass bei einer ausreichend hohen Konzentration der austretenden Gase eine Entzündung des Holzes ohne eine Zündquelle erfolgen kann. Auch hier ist die Erwärmungsdauer der entscheidende Parameter dafür, wann dieser Effekt eintritt [52].

## 4.4 Gefahren und Risiken von Gefachbränden

Ein großes Risiko bei Gebäuden mit einer Tafelbauweise, sei diese aus Holz- oder auch aus Metallständern, ist ein Brand in der Ebene der Stützen. Dabei werden Holzstützen aufgrund ihres brennbaren Baustoffs sehr viel kritischer gesehen, da diese selbstständig mitbrennen oder auch schwelen können. Ein Brand, der sich innerhalb der Holzkonstruktion ausbreitet, muss demnach verhindert werden. Brände können auf unterschiedlichen Wegen in einem Gefach entstehen. Eine Möglichkeit ist, dass sich diese vor dem entsprechenden Bauteil entwickeln und entweder durch eine Rissbildung in der Bekleidung in den Innenraum des Bauteils eindringen können, oder sich in Folge einer zu starken Erwärmung selbstständig im Gefach entzündet. Eine andere Ursache könnte z.B. ein elektrischer Defekt einer Leitung im Bauteilinnenraum sein, der sich unentdeckt in der Ebene entzündet. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die wesentlichen Risiken einzeln eingegangen.

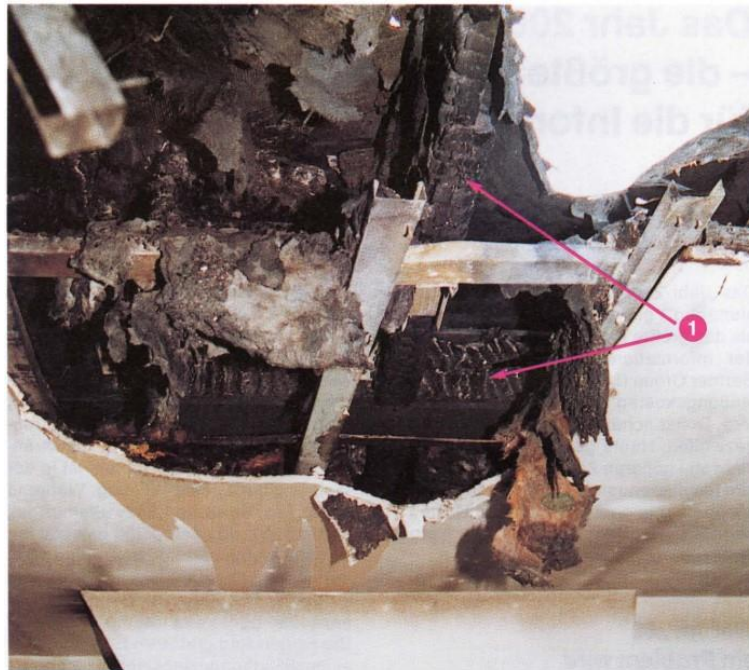
### 4.4.1 Schwelbrände

Kann sich ein Brand in der Dämmebene eines Bauteils entzünden, wird dieser oftmals nur unzureichend mit Sauerstoff versorgt. Das wiederum führt zu einer unvollständigen Verbrennung bei niedrigen Temperaturen. Dieser Brandvorgang wird „Schwelbrand“ bezeichnet und ist auch als eine Phase des Entstehungsbrandes beschrieben. Die Gefahr bei einer Verbrennung mit unzureichender Sauerstoffzufuhr besteht bei einer solchen Situation zum einen durch den weiterlaufenden, unentdeckten Brand in der Bauteilebene [61], zum anderen kann aus einem solchen Brandverlauf schlagartig ein ausgedehnter Brand werden, wenn eine Sauerstoffversorgung, z.B. durch das Abfallen einer Bekleidungsplatte, hergestellt wird. Durch die unvollständige Verbrennung entstehen große Mengen an Brandgasen mit vielen, unvollständig verbrannten Partikeln, die bei Sauerstoffversorgung durchzündet und zu einer Art Stichflamme führen können. Durch einen solchen Ablauf kann ein Brand innerhalb einer Wand schnell in einen Zimmervollbrand übergehen.

### 4.4.2 Unentdeckte Brandausbreitung

Welche gravierenden Folgen ein unentdeckter Brand annehmen kann, konnte u.a. bei dem Flughafenbrand in Düsseldorf 1996 beobachtet werden. Hier konnte über einen Zeitraum von ca. 16 Minuten der gemeldete Brand oberhalb der Unterdecke nicht aufgefunden werden. Wie viel länger der Brand jedoch schon vor der Meldung bestand, ist nicht bekannt [62]. Durch das lange unentdeckte Schwelen und Brennen konnten sich im Bereich der Unterdecke eine Menge Rauch und vor allem Wärme anstauen, was zu einem plötzlichen Versagen der

Konstruktion der Unterdecke führte. Der gesamte Bereich wurde sehr schnell mit den entstandenen, toxischen Rauchgasen gefüllt.



Übersichtsaufnahme der Brandschäden in der Decke  
1 massive Brandwaffelung an den Holzbauteilen in der Decke

ABBILDUNG 13: BEISPIEL AUSWIRKUNG EINES UNENTDECKTEN SCHWELBRANDES AUS [61]

Dieses Ereignis zeigt die Gefahr unentdeckter Brände sehr deutlich. Durch die Hitze und den weiter fortschreitenden Pyrolyseprozess bei Holztafelkonstruktionen können hier große Flächen von Bauteilen angegriffen werden, wie es in [61] beschrieben wird. Dabei spielen auch die Größe der Gefache und die Art des Dämmmaterials, falls vorhanden, eine Rolle. Wird eine brennbare Dämmung eingebracht, kann sich der Brand deutlich schneller und einfacher in dem Gefach ausbreiten, eine höhere Temperatur entwickeln und entsprechend stärker die Konstruktionshölzer angreifen, als dies bei einer nichtbrennbaren Dämmung der Fall wäre. Verliert auch hier die Bekleidung infolge der Brandbeanspruchung der Konstruktionshölzer die Stabilität oder entstehen Risse, durch die Sauerstoff in das Bauteil eindringen kann, kann es zu einer Durchzündung und zu einer schlagartigen Brandausbreitung kommen. Ein Beispiel, welche Auswirkungen ein unentdeckter Schwelbrand auf eine Holzkonstruktion haben kann, kann Abbildung 13 aus [61] entnommen werden. Durchgeführte Vorversuche zur Forschung, auf welche diese Arbeit basiert, zeigen den Einfluss von Dämmmaterialien in den Gefachen eines Holzrahmenbaus. Eine genauere Beschreibung erfolgt in Abschnitt 5.3 dieser Arbeit.

## **5 Experimentelle Materialuntersuchungen zu Schutz- und Isolationszeiten anhand von Kleinbrandversuchen**

Die Kleinbrandversuche wurden am Brandofen der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) am Standort Kaiserslautern durchgeführt. Der Ofen entspricht in weiten Teilen den Vorgaben der [63] und weist für vertikal ausgerichtete Versuche eine Öffnung von 50 cm x 50 cm auf. Die Beflammung erfolgt in dem Ofen durch Gas, wobei die [63] die Befeuerung durch Heizöl oder Dieselkraftstoff beschreibt. Die Versuchsreihen wurden sowohl zur Ermittlung der Isolationszeit als auch der Schutzzeit durchgeführt. Wie in 5.3.3 beschrieben, erfolgte die Bestimmung der Schutzzeit mit einer Trägerplatte (19 mm Spanplatte [64]) hinter den zu untersuchenden Bekleidungsmaterialien. Die verwendete Trägerplatte erfüllte die Angaben nach [11]. Ebenso wurden die Probekörper für die Dämmstoffversuche mit der Trägerplatte bekleidet, um die Bedingungen für die Versuche von unterschiedlichen Dämmmaterialien an die Bekleidungsmaterialien anpassen zu können.

### **5.1 Schutzzeiten**

Die Schutzzeiten geben die Dauer an, in der die Temperatur auf der brandabgewandten Seite eines Materials um 250K im Mittel, oder 270K punktuell ansteigt [24, 29]. Ausgehend von einer Raumtemperatur vor Brandbeginn, und damit einer Bauteiltemperatur von 20°C, ergibt dies eine Temperatur auf der brandabgewandten Materialseite von 270/290°C. In diesem Temperaturbereich muss mit dem Einsetzen der Pyrolyse bei Holzkonstruktionen gerechnet werden. Daher wird diese Temperatur als Grenztemperatur für die Schutzwirkung von vorliegenden Materialien betrachtet.

Damit eine isolierende Wirkung von nachfolgenden Schichten auf die zu untersuchenden Materialien angenommen werden kann, sind die Probekörper mit einer weiteren Schicht zu hinterlegen. Dies gilt sowohl für Bekleidungsmaterialien als auch für Dämmstoffe, die eine Schutzwirkung aufweisen. Die Hinterlegung hat mit der oben genannten Trägerplatte zu erfolgen. Die Messung bei Brandversuchen erfolgt im Zwischenraum von dem zu untersuchenden Material und der Trägerplatte mittels Thermoelemente Typ K [18].

### **5.2 Isolationszeiten**

Die Isolationszeit drückt aus, wie lange ein Material die Wärmeeinwirkung einer Brandbeanspruchung eindämmen kann, bevor die Temperatur auf der brandabgewandten Materialseite um 140K im Mittel oder 180K punktuell ansteigt. Es wird, wie auch bei der



Schutzzeit, von einer Bauteiltemperatur zu Beginn des Brandes von 20°C ausgegangen, woraus sich eine Temperaturgrenze von 160°C/200°C ergibt.

Durch das Isolationskriterium soll verhindert werden, dass sich der Brand über ein raumabschließendes Bauteil auf andere Nutzungseinheiten übertragen kann. Da der Raumabschluss selbst nicht nachweisbar ist, wird dies vom Isolationskriterium übernommen.

Anders als bei der Schutzzeit, wird die Messung zur Isolationszeit gegen die freie Raumluft durchgeführt. Das bedeutet, dass keine weitere Materialschicht hinter der zu untersuchenden Schicht vorgesehen ist. Die Isolationszeit ist demnach immer für die äußerste, brandabgewandte Schicht zu bestimmen, während bei den vorherigen Schichten die Schutzzeit ausschlaggebend ist.

### **5.3 Experimentelle Untersuchungen zum Branddurchgang im Bereich der Gefache**

Wird eine Wandkonstruktion in Holztafelbauweise betrachtet, ist den Bereichen der Gefache besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Im Vergleich zu dem Bereich der Holzstützen in der Tafelkonstruktion, bei der die Feuerwiderstandsdauer sowohl für die Tragfähigkeit als auch für den Raumabschluss mit dem errechenbaren Abbrand bemessen werden kann [1], ist in der Ebene der Gefache durch den gefüllten oder auch ungefüllten Hohlraum eine gänzlich andere Situation zu erwarten. Diese wird nicht nur durch die Wärmeeinwirkung der brandbeanspruchten Bekleidungsseite beeinflusst, sondern auch durch Wärme- und Brandeinwirkung, die von den beanspruchten Stützen ausgehen können.

Die im Rahmen der Forschung zu der vorliegenden Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen berücksichtigen auch diese Auswirkungen von Bränden in Holztafelbaukonstruktionen. Dabei erfolgten Brandversuche, die sowohl den Wärmedurchgang und damit die Feuerwiderstandsdauer zur raumabschließenden Funktion für Konstruktionen mit ungedämmten Hohlräumen betrachteten als auch mit ausgedämmten Kammern. Der Aufbau der Probekörper ist in Abbildung 14 und Abbildung 16 zu sehen. Dabei handelt es sich um eine Konstruktion aus einem 80mm starken Hohlraum, gebildet durch 60 x 80 mm Konstruktionsvollhölzer, bekleidet mit 25mm starken OSB3-Platten. Der obere und untere Abschluss wird durch 15mm starke Gipskarton-Feuerschutzplatten ausgeführt.

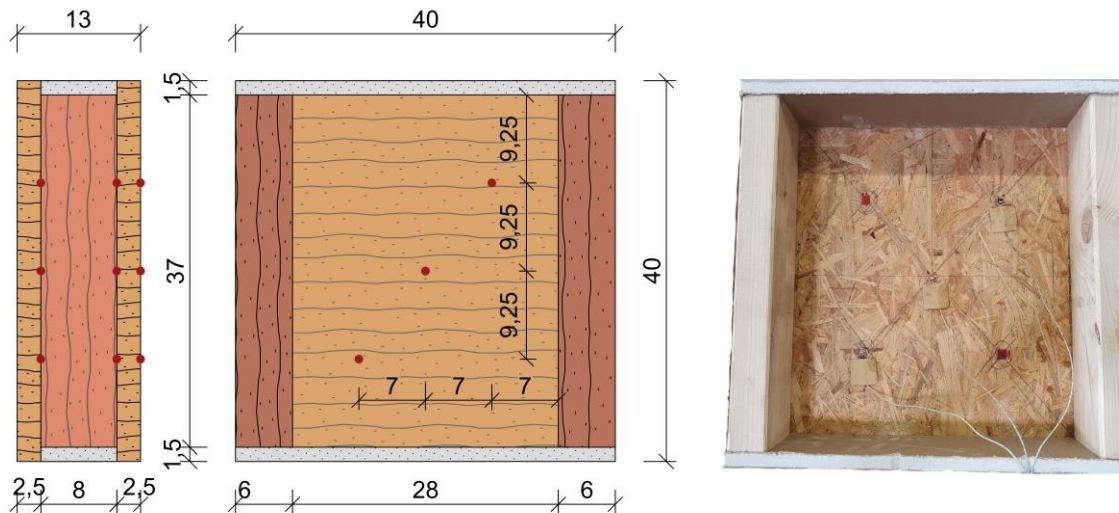


ABBILDUNG 14: PROBEKÖRPER VORVERSUCHSREIHE HOHLRAUM [32] – AUFBAUZEICHNUNG (MESSSTELLEN IN ROT) UND FOTO

### 5.3.1 Hohlraumbrände

Wie ein Brand im Bereich der Gefache abläuft und welche Feuerwiderstandsdauer erreicht werden kann, ist Gegenstand vieler aktueller Untersuchungen, die sich vor allem auch mit den additiven Berechnungsmethoden beschäftigen. So werden im Rahmen von [20, 22, 24, 28] unterschiedliche Dämmstoffe, welche üblicherweise zum Ausfüllen der Gefache genutzt werden, auf deren Verhalten unter Brandeinwirkung betrachtet. Einen wiederum anderen Brandverlauf kann bei Bränden ohne Dämmstofffüllung in den Gefachen erfolgen, wo Wärmeeinwirkungen, allein gehindert durch die Dämmwirkung der Luft, über Strahlung und Konvektion auf die brandabgewandte Bekleidung des Bauteils übertragen wird. Da diese Gefache verhältnismäßig sehr groß sind, können sich die erwärmten Luftteilchen sehr gut darin bewegen und die Wärme an die brandabgewandte Bekleidung übertragen. In den Untersuchungen zur Genauigkeit additiven Berechnungsverfahren [32] im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dies mit betrachtet. Dabei wurde eine, vom Verlauf her sehr ähnliche Erwärmung der brandabgewandten Seite der beanspruchten Bekleidung und der brandzugewandten Seite der Bauteilseite gegen den angrenzenden Raum hin beobachtet, siehe Abbildung 15 (Aufbau Probekörper durchgeführter Versuch siehe Abbildung 14). Die maximal zulässige Temperaturerhöhung der Bauteilschichten sind dabei 250K für die brandzugewandten Bauteilschichten und 140K für die äußerste brandabgewandte Bauteilschicht. Bezeichnet wird dies im Diagramm mit „250K Kriterium“ und „140K Kriterium“.

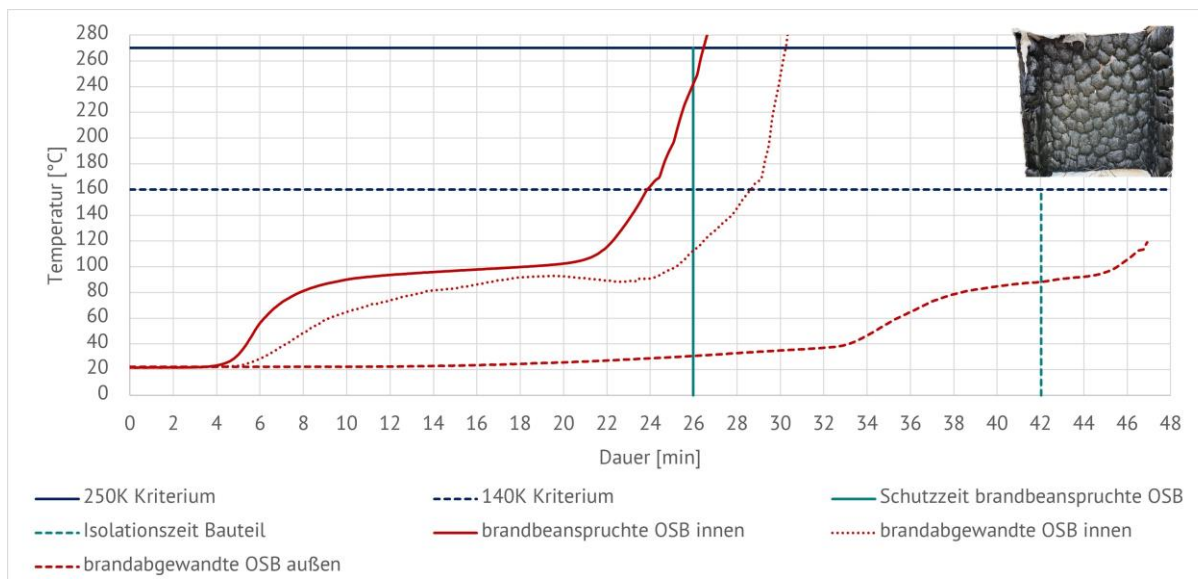


ABBILDUNG 15: AUFBAU PROBEKÖRPER UND VERSUCHSERGEBNIS – LUFT; MIT ENTSPRECHENDEM TEMPERATURVERLAUF [32]

Ab dem Zeitpunkt, an dem die brandbeanspruchte Bekleidung versagte und der Brand den Hohlraum ungehindert vereinnahmen konnte, entsprach die Messstelle der brandabgewandten Bekleidung im Hohlraum dem Temperaturverlauf der Brandeinwirkung. Dies war bei ungefähr 665°C der Fall (nicht in Abbildung 15 abgebildet).

### 5.3.2 Experimentelle Dämmstoffuntersuchungen

Gefachhöhlräume, die mit Dämmstoffen ausgefüllt sind, verzögern die Wärmeübertragung von der brandbeanspruchten auf die brandabgewandte Bauteilseite. Dadurch kann ein höherer Feuerwiderstand erbracht werden. Allerdings ist hierfür neben der Art des Dämmstoffes auch entscheidend, wie lange das brandbeanspruchte Bekleidungsmaterial an der Konstruktion verbleibt [65]. Die verschiedenen Dämmstoffarten weisen nicht nur anhand ihrer Wärmeleitfähigkeit einen unterschiedlichen Feuerwiderstand auf, sondern vor allem auch durch ihre Materialität und ihre dadurch zugehörigen Baustoffklasse. Es kann demnach eine grundlegende Einteilung in brennbare und nichtbrennbare Dämmstoffe erfolgen. Weitere Untergruppierungen wie schwer- oder normalentflammbar bleiben im Zuge dieser Arbeit außer Betracht. Eine Auswahl der Materialien, die bei den hier beschriebenen Dämmstoffversuchen durchgeführt wurden, ist in Abbildung 16 aufgezeigt.



ABBILDUNG 16: PROBEKÖRPER DÄMMSTOFFVERSUCHE –(V.L.) HOLZFASERDÄMMUNG (FEST), SCHAFSWOLLE, STEINWOLLE

Bei den Untersuchungen wird vor allem das Schutzkriterium der Dämmstoffe betrachtet. Als Versagenszeit gilt daher die Zeit, nach der die Temperatur auf der brandabgewandten Seite des Dämmstoffs eine Temperaturerhöhung von 250 K im Mittel, oder 270 K an einer Stelle des Materials überschritten wird. Dies gleicht dem beschriebenen Schutzkriterium aus Abschnitt 3.3.2 dieser Arbeit. Bekleidet wurden die Probekörper auf der brandbeanspruchten wie auch auf der brandabgewandten Seite mit einer Spanplatte [64] nach [11].

#### 5.3.2.1 Verwendung nichtbrennbarer Dämmstoffe

Aus der Gruppe der nichtbrennbaren Dämmstoffe wurden die Dämmmaterialien Glaswolle [66] und Steinwolle [67] untersucht. Bei diesen beiden Stoffen unterscheidet sich die Wärmeleitfähigkeit von  $0,037\text{W/m}^2\text{K}$  bei Glaswolle zu  $0,039\text{W/m}^2\text{K}$  bei Steinwolle nur sehr gering. Aus brandschutztechnischer Sicht ist diese Differenz als nicht ausschlaggebend anzusehen. Da es sich bei beiden Produkten um Dämmstoffplatten in einer Stärke von 100mm handelte, ist die Komprimierung der Dämmstoffe im Probekörper vernachlässigbar. Beide Produkte füllten den Hohlraum von 100mm vollständig aus. Die Dämmwolle wurde bei den Versuchen von [68, 69] mit einem Übermaß von 1cm in den Probekörper eingebracht. Ein bedeutender Unterschied zwischen beiden Baustoffen liegt bei der Temperaturbeständigkeit. Während die Steinwolle auch als 1.000°C-Wolle bekannt ist, d.h. eine Temperaturbeständigkeit bis zu einer Beanspruchung von 1.000°C aufweist, liegt diese bei der untersuchten Glaswolle bei 150°C [70] bis 200°C [66] für die verwendeten Bindemittel in dem Baustoff. Dies machte sich bei den Versuchen durch ein Schrumpfen ersichtlich, welches vor allem mittig der oberen Materialkante zu beobachten war. Die Steinwolle blieb dagegen bis zum Versuchsende in ihrer ursprünglichen Form [68, 69]. Die Temperaturverlaufskurven beider Versuche sind in Abbildung 17 aufgeführt. Die in den Diagrammen mit  $t_{prot}$  dargestellten Zeitangaben zeigen die Schutzzeit der jeweils betrachteten Dämmstoffsicht

nach Berechnungsverfahren von [1], [24] und [29], die horizontalen Linien stellen die maximal zulässige Temperaturerhöhung von 250 K zur Annahme der Schutzwirkung dar.

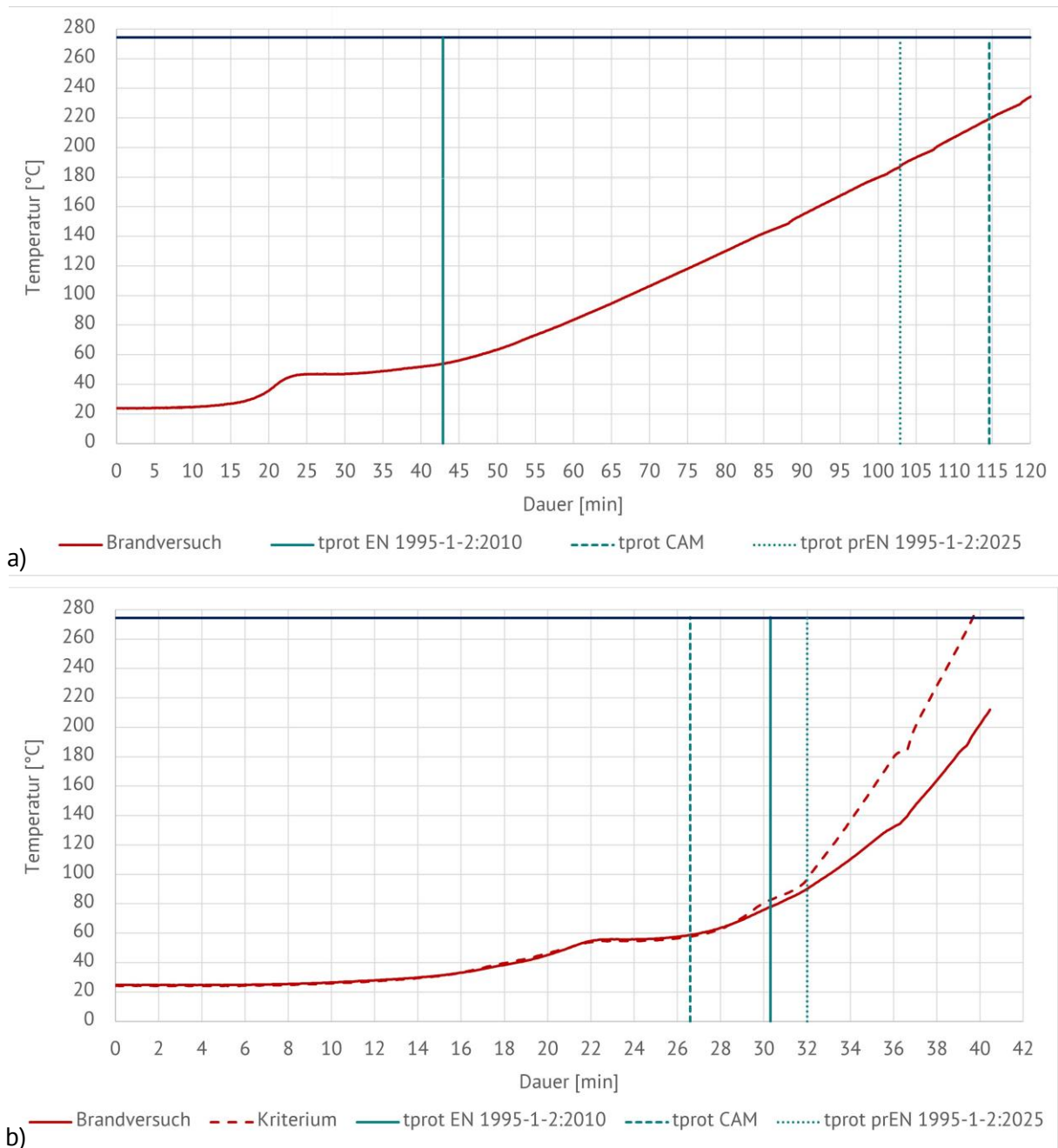


ABBILDUNG 17: TEMPERATURVERLAUF UNTER BRANDBEANSPRUCHUNG BEI A) STEINWOLLE UND B) GLASWOLLE

Durch die längere Festigkeit und Stabilität des Dämmmaterials wird vor allem die brandabgewandte Bekleidungsfläche vor der direkten Brandbeanspruchung geschützt, aber auch der seitliche Brandangriff auf die Konstruktionshölzer selbst reduziert sich bei einer gepressten Einbauweise der Dämmwolle.

### 5.3.2.2 Verwendung brennbarer Dämmstoffe

Die längere Stabilität des Dämmstoffs, die in 5.3.2.1 beschrieben wird, ist auch bei den brennbaren Dämmstoffen relevant. Hier kommt zusätzlich noch der Aspekt des selbstständigen Mitbrennens bei einer Brandbeanspruchung hinzu. Wie in [68, 69] ersichtlich, kann hier vor allem der Feuerwiderstand von Steinwolle nicht annähernd erreicht werden, wenn auch die Wärmeleitfähigkeit bessere Werte liefert. Untersucht wurden hier Holzfaserdämmstoffe in plattenform (fest) [71] und lose Holzfaserdämmung als Einblasdämmstoff [72] sowie Schafswolldämmung [73], siehe hierzu auch Abbildung 18. Dabei erreichte die Holzfaserdämmung (fest) mit vorliegender Spanplatte eine Feuerwiderstandsdauer von 42 min, die lose Holzfaserdämmung ebenfalls 42 min, und für die Schafswolldämmung konnte nur ein Feuerwiderstandsdauer von 30 min inkl. der davorliegenden Spanplatte nachgewiesen werden. Eine detaillierte Aussage zu den Versuchen bietet [32], wobei nachfolgend in Anhang B die Temperaturverläufe der Brandversuche aufgezeigt werden.

### 5.3.3 Experimentelle Untersuchungen zu Bekleidungsmaterialien

Abschnitt 4.4 zeigt, wie wichtig es ist, eine Brandausbreitung innerhalb eines Bauteils zu verhindern. Gegen eine Brandentstehung in der Bauteilebene durch elektrische Defekte sind anlagentechnische Maßnahmen, auch im brandschutztechnischen Sinne, vorzusehen. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

In dieser Arbeit liegt der Fokus darauf, eine Ausbreitung eines Brandes von außerhalb in die Bauteilebene zu verhindern. Wirksam ist hier vor allem die Wahl der Bekleidungsmaterialien, die, neben einem direkten Schutz vor der Brandbeanspruchung, baustoffabhängig auch einen Schutz vor einer Temperaturerhöhung hinter der Bekleidung bieten und damit innerhalb des Bauteils die Wahrscheinlichkeit von Pyrolyse und Selbstentzündung verringern.

Diese brandschutztechnisch wirksame Funktion wird nicht von allen Bekleidungsarten gleichermaßen erfüllt. Auch hier kann eine erste grobe Eingruppierung in brennbare und nichtbrennbare Bekleidungen erfolgen, wobei [74] Ergebnisse aus den Versuchen zu dieser Arbeit für beide Gruppen aufzeigt.



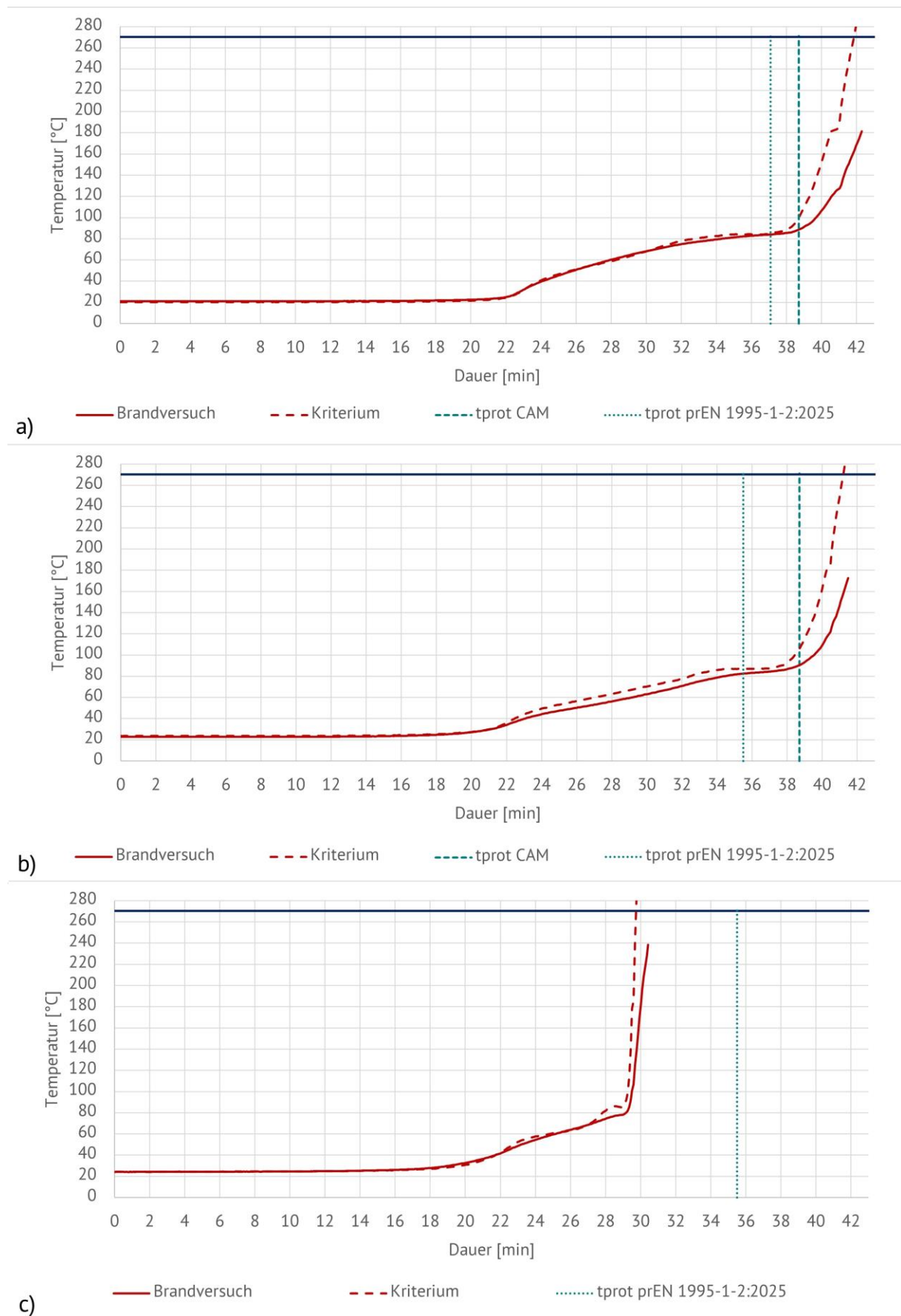


ABBILDUNG 18: TEMPERATURVERLÄUFE UNTER BRANDBEANSPRUCHUNG (DÄMMSTOFFVERSUCHE): A) HOLZFASERDÄMMUNG FEST; B) HOLZFASERDÄMMUNG LOSE; C) SCHAFSWOLLDÄMMUNG

### 5.3.3.1 Verwendung nichtbrennbarer Bekleidungsmaterialien

In der Gruppe der nichtbrennbaren Bekleidungsmaterialien wurden Gipskartonplatten (GKB) [75], Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) [76] und Gipsfaserplatten (GFP) [77] untersucht [22, 78]. Dabei sind die GKF und GFP bei einer Ausführung nach [14] als brandschutztechnisch wirksame Bekleidungsmaterialien anerkannt. Das bedeutet, dass ein Schutz der dahinterliegenden Holzkonstruktion für einen Zeitraum bis zu 60 Minuten angenommen werden kann [14]. Durch das gebundene Wasser in Gipswerkstoffplatten weisen diese Materialien eine deutlich längere Schutzfunktion auf. Mit der Kondensation des Wassers wird Wärmeenergie unter Brandbeanspruchung längere Zeit vor einem Durchgang auf die brandabgewandte Seite der Bekleidung gehindert, wodurch sich auch die Dämmebene verzögert aufheizt. Der Temperaturverlauf einer Gipswerkstoffplatte kann beispielhaft an Abbildung 19 gesehen werden.

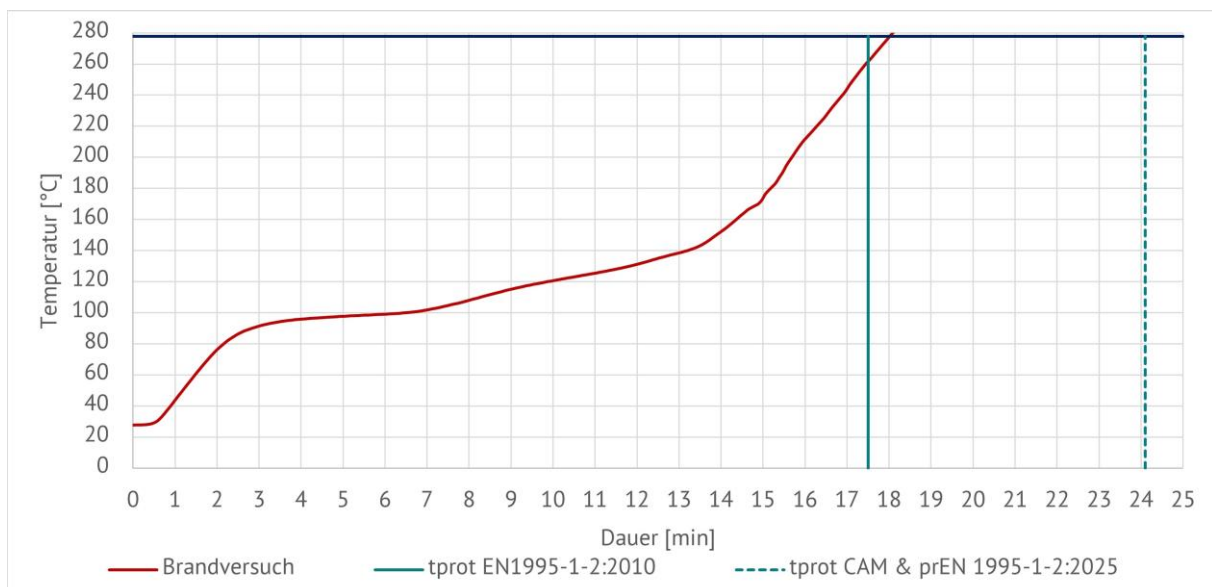


ABBILDUNG 19: TEMPERATURVERLAUF BRANDABGEWANDTE SEITE GIPSWERKSTOFFPLATTE UNTER ETK-BEANSPRUCHUNG

Die isolierende und schützende Wirkung von Bekleidungsschichten wird bei nichtbrennbaren Materialien vor allem durch die Zeit bis zum Abfallen der Platten von den Konstruktionshölzern bestimmt. In [79] wird gezeigt, wie entscheidend diese längere Abfallzeit für die Schutzfunktion eines Bauteils sein kann.

Alle Materialien wurden im Rahmen der Versuchsreihe auf deren Isolationszeit (140/180K-Kriterium) und Schutzzeit (250/270K-Kriterium) betrachtet. Die Schutzzeit wird geprüft, indem die Platte mit einer Trägerplatte [11] hinterlegt wird. Das Ende der Schutzzeit wird angenommen, wenn in diesem Zwischenbereich das 250K-Kriterium erreicht wird. Als Trägerplatte wird eine 19 mm dicke Spanplatte [64] verwendet.



### 5.3.3.2 Verwendung brennbarer Bekleidungsmaterialien

Was ebenfalls bei den Versuchen deutlich wurde, ist, dass diverse brennbare Bekleidungsmaterialien den Wärmedurchgang ebenso gut verzögern können, wie Gipswerkstoffplatten, allerdings ist die Rissbildung und ein mögliches früheres Durchbrennen der brennbaren Materialien zu beachten, was zu einer früheren Beanspruchung der dahinterliegenden Baustoffe durch den Brand führen kann als es bei nichtbrennbaren Bekleidungsmaterialien der Fall ist. Die Differenzen zum Zeitpunkt des Erreichens des 250K-Kriteriums können in Abbildung 20 gesehen werden.

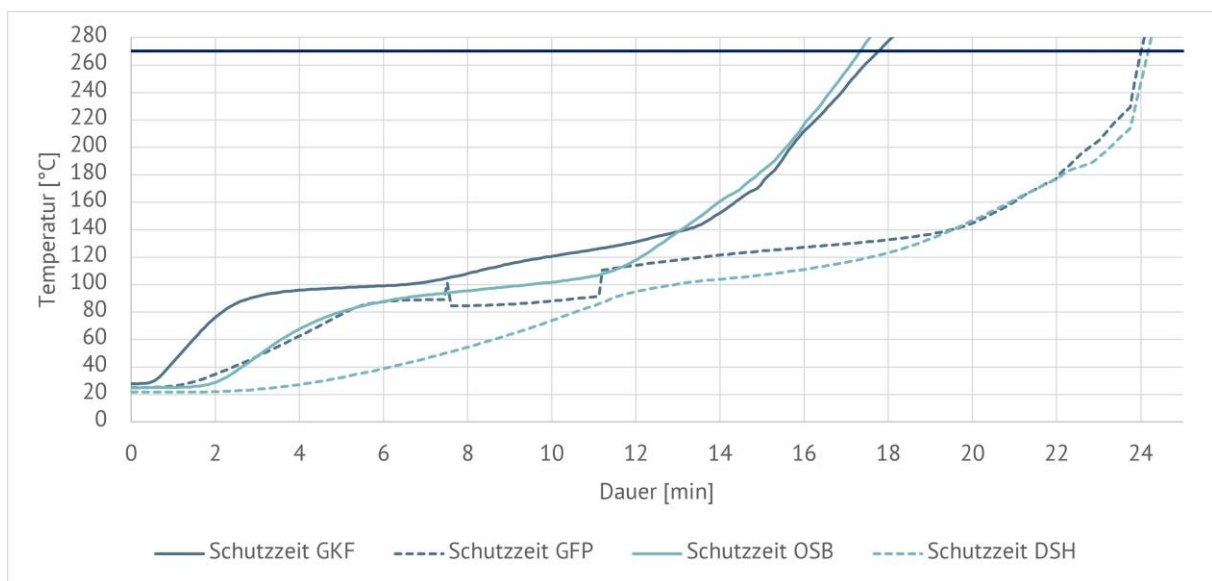


ABBILDUNG 20: VERGLEICH SCHUTZZEIT NICHTBRENNBARE UND BRENNBARE BEKLEIDUNG (15MM GKF; 15MM GFP; 15MM OSB; 19MM DSH)

Durch die Brandbeteiligung der Bekleidungsmaterialien dieser Gruppe kann es in Folge zu einer höheren, bzw. schnelleren Temperaturentwicklung kommen [65], allerdings zeigen andere Versuche auch eine nicht abweichende Temperaturentwicklung bei brennbaren Oberflächen auf [80]. Hier wird lediglich in der Abkühlphase eine längere Wärmeabgabe aus den Bauteilen verzeichnet.

Im Rahmen von [22, 78] wurden aus der Gruppe brennbarer Bekleidungsmaterialien Untersuchungen von OSB-Platten [81], Dreischichtholzplatten (DSH) [82], Holzfaserverplatten [83] und Holzweichfaserplatten [84] durchgeführt. Die genauen Angaben zu der Materialauswahl werden in Abschnitt 5.4.1 auf Seite 61 gezeigt. Um die Schutzzeiten der Materialien bestimmen zu können, wurde auch hier eine Spanplatte [64] als Trägerplatte nach [11] verwendet. Diese wurde im Rahmen der Versuchsreihe ebenfalls separat auf deren Isolationszeit untersucht.

Der in Abbildung 21 dargestellte Temperaturverlauf zeigt beispielhaft die Temperaturentwicklung hinter einer brennbaren Bekleidungsplatte, geprüft auf deren Schutzzeit (250/270K-Kriterium). Auffällig ist hier das Plateau der Temperaturentwicklung bei 90-110°C. Das Verweilen der Temperatur bei ungefähr 100°C resultiert aus der Verdampfung des Wassers, das die eingebrachte Energie bindet und dadurch die Erwärmung auf der brandabgewandten Seite hinauszögert. Bei ca. 250°C wird Wärmeenergie durch die eintretende Pyrolyse gebunden und kann so in einem Temperaturbereich von 250°C-300°C ebenfalls zu einer Plateauausbildung führen. Die Verläufe aller untersuchten Materialien sind in Anhang A aufgeführt.

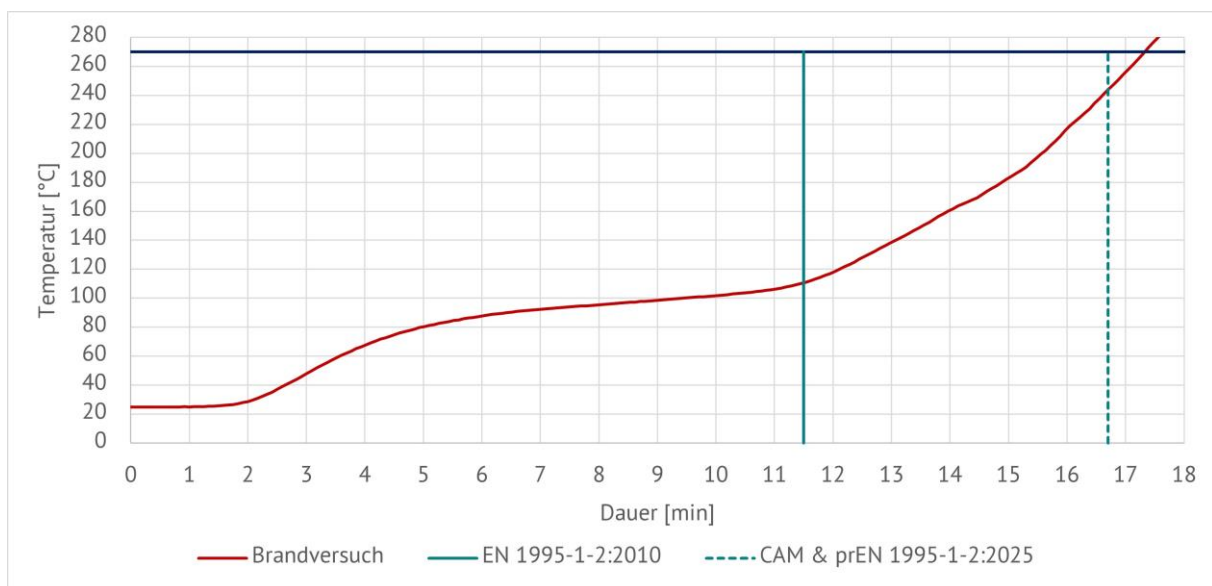


ABBILDUNG 21: TEMPERATURVERLAUF BRENNBARE BEKLEIDUNG BEISPIELHAFT AN OSB-PLATTE

### 5.3.3.3 Vor- und Nachteile der Bekleidungsarten

Die Ergebnisse der durchgeführten Brandversuche zu Bekleidungsmaterialien zeigen deutlich einen wesentlichen Unterschied zwischen der Gruppe der brennbaren Bekleidungen und der nichtbrennbaren Bekleidungen [22]. Es kann nicht pauschal eine kürzere Isolations- oder Schutzwirkung im Sinne der CAM angenommen werden, allerdings wirkt sich der längere Verbleib nichtbrennbarer Bekleidungs-elemente an den Konstruktionshölzern günstig auf die dahinterliegende Schicht aus, die dadurch deutlich länger vor direkter Brandeinwirkung geschützt wird. Vor allem bei der Verwendung brennbarer Dämmstoffe ist dies ein wichtiger Aspekt [22, 65].

Im Hinblick auf die Temperaturentwicklung im Brandraum konnten bei den Versuchen im kleinen Brandofen kein abweichender Verlauf zwischen brennbaren und nichtbrennbaren Bekleidungs-materialien festgestellt werden [78]. Bei den Großbrandversuchen im Rahmen

dieser Arbeit wurde dagegen eine deutliche Abweichung festgestellt [65, 79]. Für die in [21] beschriebenen Brandversuche wurde festgestellt, dass die Temperaturentwicklung an der Oberflächen der brennbaren Bekleidungen im Vergleich zu nichtbrennbaren Bekleidungen oberhalb der ETK liegt, was mit der Wärmefreisetzung des brennenden Holzes und der ausreichenden Sauerstoffmenge zu erklären ist [21]. Dies wurde bei den Versuchen von [21] von den Plattenthermometer im Brandraum jedoch nicht erfasst. Die Realbrandversuche von [80] können hingegen eine ausschlaggebende Abweichung nicht nachweisen. Um eine belastbare Aussage in Bezug auf die abweichenden Temperaturverläufe bei großflächigen, ungeschützten Holzoberflächen geben zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich, die die Temperaturentwicklung im Bezug zur Größe der sichtbaren Holzoberfläche und der Sauerstoffversorgung betrachten.

#### **5.4 Auswertung der experimentellen Versuchsreihe mit Brandbeanspruchung**

Bei Brandversuchen ist es wichtig zu berücksichtigen, dass ein Brand, auch unter kontrollierten Bedingungen wie in einem Brandofen, niemals vollständig identisch zu einem anderen verläuft. Dies liegt an den äußeren Einflüssen, die nicht immer gleichermaßen vorherrschen, aber auch den zu untersuchenden Baustoffen selbst. Vor allem bei Holzprodukten sind aufgrund des natürlichen Ursprungs immer unterschiedliche Zusammensetzungen in der Struktur des Holzes zu erwarten. Allein diese Zusammensetzung hat einen Einfluss auf einen Brandverlauf, auch wenn dieser nicht immer zeitlich messbar ist. Angegebene Materialkennwerte zu Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität und Rohdichte können somit von den tatsächlichen Werten der verwendeten Produkte aufgrund der natürlichen Schwankungen abweichen.

Durch die kontrollierte Ofensteuerung und die Verwendung der Normbrandkurve [18] sollen äußere Einflüsse bis auf ein Minimum reduziert werden. Als schwankend muss hier nach wie vor die Raumtemperatur der Brandhalle genannt werden, die jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Um die Beanspruchung einheitlich zu gestalten, wurde die Brandbelastung nach ETK vorgesehen. Dies gewährleistet sowohl eine gut vergleichbare Belastung der Bauteile innerhalb dieser Versuchsreihen als auch eine Vergleichbarkeit zu Versuchen, die an anderen Instituten europaweit durchgeführt wurden.

### 5.4.1 Materialauswahl

Ziel war es, ein breites Spektrum an Baustoffen zu untersuchen und auf die festgelegten Kriterien hin zu überprüfen. Einen Überblick über alle untersuchten Baustoffe gibt die folgende Tabelle 3.

TABELLE 3: AUSWAHL DER UNTERSUCHTEN BAUSTOFFE

<u>Nichtbrennbare Bekleidung</u>	
Gipskartonplatte	Knauf „Miniboard 12,5mm“ [75] (d= 12,5mm)
Gipskarton-Feuerschutzplatte	Knauf „Feuerschutzplatte Piano“ [76] (d= 15mm)
Gipsfaserplatte	James Hardie „Fermacell Gipsfaserplatte“ [77] (d= 15mm)
<u>Brennbare Bekleidung</u>	
OSB-Platte	Fritz Egger „OSB 3“ [81] (d= 15mm)
Dreischichtholzplatte	Nordpan [82] (d= 19mm)
Holzfaserverplatte	AGEPAN System [83] (d= 16mm)
Holzweichfaserplatte	Pavatex Isolair [84] (d= 60mm)
<u>Nichtbrennbare Dämmstoffe</u>	
Glaswolle	Ursa Geo Spannfalz SF 32/35 [66] (d= 100mm)
Steinwolle	Rockwool „Masterrock 035“ [67] (d= 100mm)
<u>Brennbare Dämmstoffe</u>	
Holzfaserdämmung (fest)	Steico „flex 038“ [71] (d= 100mm)
Holzfaserver-Einblasdämmung	Steico „zell“ [72] (d= 100mm)
Schafswolle	Isolena „Optimal“ [73] (d= 100mm)

Es wurden gängige Baustoffe gewählt und auch Produkte, die das Potential aufweisen, sich als ökologisches und nachhaltiges Produkt in Zukunft vermehrt zu bewähren. Dabei wurde ebenso darauf geachtet, dass sowohl für Bekleidungsmaterialien als auch für die Dämmstoffe,

Baustoffe mit einer nichtbrennbaren sowie mit einer brennbaren Klassifizierung untersucht werden.

#### 5.4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Probekörper wurden zur Durchführung der Brandversuche in den Brandöfen der RPTU Kaiserslautern-Landau eingebaut und nach ETK [18] beansprucht. Die Bekleidungsmaterialien wurden mit und ohne Trägerplatte vor die vertikale Ofenöffnung montiert. Hierzu wurden die Probekörper, wie in Abbildung 22 ersichtlich, in einer Größe von 54 cm x 57 cm angefertigt. Die Messstellen nach [18] sind in Abbildung 22 ebenfalls (als rote Kreise) aufgeführt.

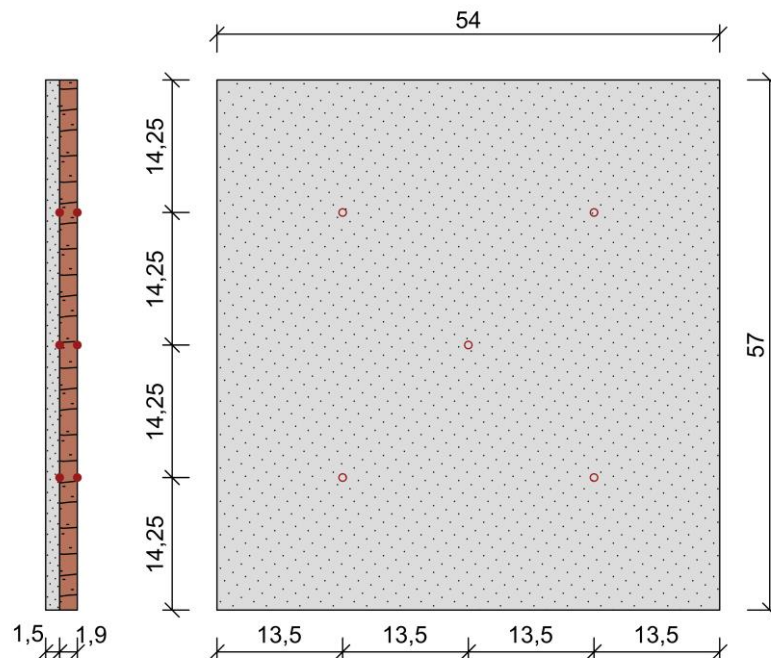


ABBILDUNG 22: PROBEKÖRPER BEKLEIDUNGSELEMENTE, MIT MESSSTELLEN (BEISPIELHAFT FÜR BEKLEIDUNG MIT 15MM DICKE)

Für die Dämmstoffversuche wurden die Probekörper mit einer Abmessung von 40 cm x 40 cm hergestellt. Der Einbau der Module erfolgte in die vertikale Ofenöffnung. Um eine Belastung des Probekörpers in der Einbaufuge und damit die Gefahr einer seitlichen Brandausbreitung auf die brandabgewandte Seite der Module auszuschließen, wurde diese mit Keramikwolle [85] abgedichtet. Die zur Messung benötigten Thermo-elemente nach [18] wurden zwischen den Schichten und auch auf der brandabgewandten Seite des Probekörpers montiert. Die Messstellen sind, wie auch der Aufbau der Probekörper, in Abbildung 23 aufgezeigt. Jedes Material wurde mit einem Brandversuch im Brandofen untersucht.

Mit Nachweis einer Temperaturerhöhung über das festgelegte Temperaturkriterium hinaus auf der brandabgewandten Schicht, bzw. in der Zwischenschicht zwischen zu untersuchendem Material und Trägerplatte, wurden die Versuche beendet. Ebenfalls galt ein Durchbrand durch das betrachtete Material als Versagen der raumabschließenden Funktion, und der Versuch wurde ebenfalls beendet. Die Temperaturkriterien liegen, wie in Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2 aufgeführt, bei 140/180K für die Isolationszeit und 250/270K für die Schutzzeit. Nach Beendigung der Versuche wurden die Probekörper sofort aus dem Ofen ausgebaut und mit Wasser abgelöscht, um ein Weiterbrennen zu verhindern. Nach Abkühlen der Module wurden diese untersucht, um die Verkohlung der Trägerplatten beurteilen zu können. Auch wenn der Ausbau unmittelbar nach Abschaltung des Brandofens erfolgte, ist die Verkohlung der Holzelemente bis zu einem vollständigen Ablöschen der Module, auch zwischen den Schichten im Gange, was bei der Beurteilung der verkohlten Flächen berücksichtigt werden muss. Ausschlaggebend ist hier vor allem die Zeitspanne von Versuchsende bis zum vollständigen Ablöschen, ggf. Demontage des Probekörpers. Weiter muss in die Auswertung die Möglichkeit eines ersten Ablöschens in zusammengebautem Zustand des Probekörpers einfließen. Die meisten Probekörper konnten nach dem Ausbau aus dem Brandofen in einer Wasserwanne vollständig abgelöscht werden, wodurch vor allem die Zeit von Versuchsende bis zu diesem Ablöschen relevant ist. So kann der erfolgte Abbrand mit der in [1] gegebenen Abbrandraten zum Zeitpunkt des Versuchsendes nachberechnet und abgeglichen werden.

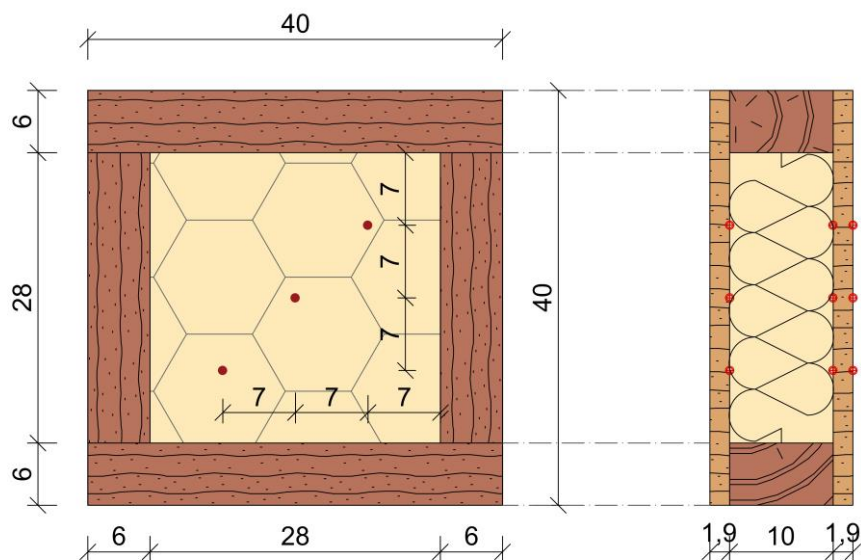


ABBILDUNG 23: PROBEKÖRPER DÄMMSTOFFVERSUCHE, MIT MESSSTELLEN

Die Isolations- und Schutzzeiten wurden als Richtwerte für die Nachberechnung nach additiven Berechnungsverfahren der raumabschließenden Funktion und zur Nachsimulation mittels FEM verwendet.

### 5.4.3 Ergebnisse der Kleinbrandversuche

Als Versagen der raumabschließenden Funktion wurde eine Temperaturerhöhung über die genannten Grenzkriterien hinaus und ein erfolgter Durchbrand gewertet. Die in Tabelle 4 aufgeführten Zeiten entsprechen den Isolations- und Schutzzeiten der jeweiligen untersuchten Bekleidungsmaterialien, also der Zeitspanne von Beginn der Brandbeanspruchung (Versuchsbeginn) bis zum Erreichen des Isolationskriteriums (140/180K Temperaturerhöhung) oder Schutzkriterium (250/270K Temperaturerhöhung).

TABELLE 4: ISOLATIONS- UND SCHUTZZEITEN DER UNTERSUCHTEN BAUSTOFFE

<b>Material</b>	<b>Isolationszeit [min]</b>	<b>Schutzzeit [min]</b>
Gipskartonplatte	16	18
Gipskarton-Feuerschutzplatte	16	17
Gipsfaserplatte	21	24
OSB-Platte	14	17
Dreischichtholzplatte	23	23
Holzfaserplatte	12	14
Holzweichfaserplatte	24	51

Im Gegensatz zu den Versuchen mit den Bekleidungsmaterialien wurden bei den Dämmstoffen nur die Zeiten zu den Schutzfunktionen ermittelt, da hier nicht davon auszugehen ist, dass der Dämmstoff die äußerste Schicht eines Bauteils sein wird. In Tabelle 5 werden die entsprechenden Zeiten hierzu aufgezeigt. Dabei bestand die Bekleidung beiderseits immer aus einer Trägerplatte, und die Dämmstoffdicke wurde durchgängig mit 100mm vorgesehen.

Bei den Dämmstoffversuchen wurde zusätzlich die Abfallzeit der brandbeanspruchten Trägerplatte vermerkt. Diese ist in Tabelle 5 mit aufgeführt. Die Abfallzeit beschreibt die Zeitspanne von Beginn der Brandbeanspruchung bis zum Versagen/Abfallen der brandbeanspruchten Bekleidungsschicht in Minuten. Durch das Abfallen der brandbeanspruchten Trägerplatte ist der Dämmstoff ungeschützt der Brandeinwirkung

ausgesetzt, was vor allem bei der Schafswolle zu einem nahezu unverzüglichen Verlust der Schutzfunktion führt. Die Schutzwirkung der Dämmstoffe ergibt sich aus der Zeitspanne von Erreichen der 270°C Isotherme (250K + 20°C Bauteiltemperatur zu Brandbeginn als Mittelwert aller in dieser Schicht vorgesehenen Messstellen) zwischen brandbeanspruchter Bekleidung und Dämmstoff und Erreichen der 270°C Isotherme zwischen Dämmstoff und brandabgewandter Bekleidung. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 24.

TABELLE 5: SCHUTZZEITEN DER UNTERSUCHTEN DÄMMSTOFFE, INKL. ABFALLZEITEN DER BRANDBEANSPRUCHTEN TRÄGERPLATTE

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Schutzzeit [min]</b>	<b>Abfallzeit [min]</b>
Holzfaserdämmung (fest)	42	21	26
Holzfaser-Einblasdämmung	42	18	25
Schafswolle	30	1	28
Glaswolle	40	20	30
Steinwolle	120	100	25

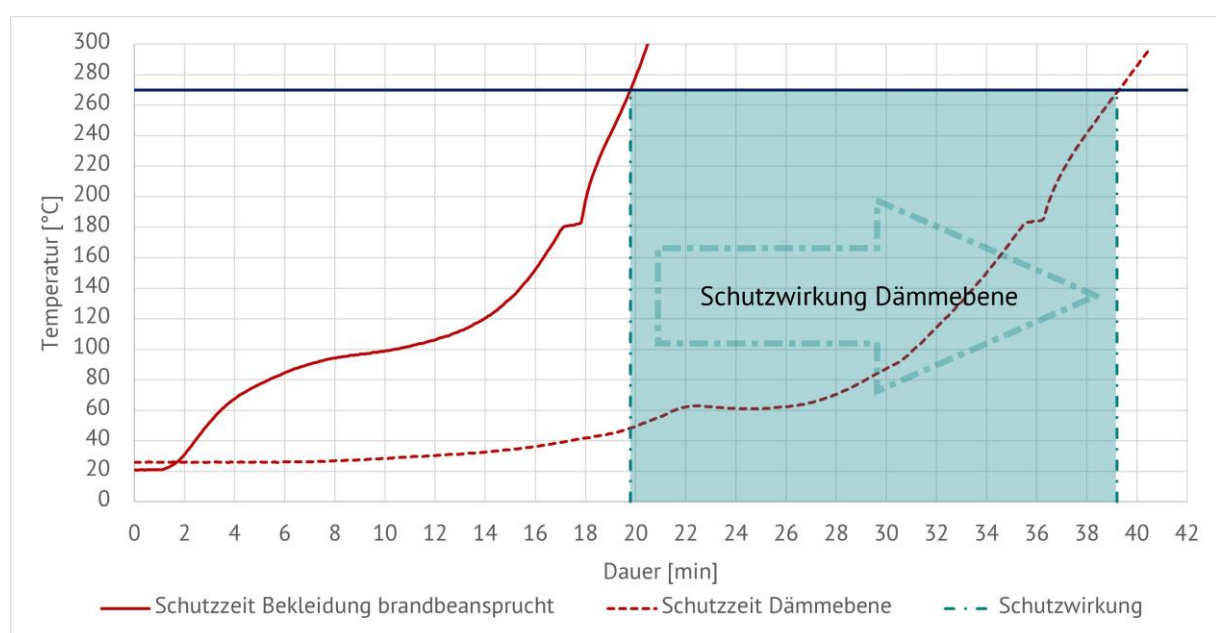


ABBILDUNG 24: SCHEMAZEICHNUNG SCHUTZWIRKUNG VON DÄMMSTOFF, AM BEISPIEL GLASWOLLE



Bei den Dämmstoffversuchen kann erkannt werden, dass sich die Abfallzeiten einer Bekleidung nicht nachweislich in Abhängigkeit zu dem dahinterliegenden Dämmstoff befinden. Die Dämmwirkung dieses Stoffes wirkt sich nur geringfügig (bei den untersuchten Materialien in einem Zeitraum von 5 Minuten) auf den Versagenszeitpunkt der Bekleidung aus. Es sind aber große Unterschiede bei der Schutzzeit der Dämmung zu beobachten. Diese zeigen sich nicht nur zwischen brennbarer und nichtbrennbarer Dämmung, sondern auch innerhalb der jeweiligen Dämmstoffgruppen. So liegen auch die Schutzzeiten von Glaswolle und den Holzfaserdämmstoffen nur unwesentlich auseinander. Dies hängt mit der geringen Temperaturbeständigkeit der Glaswolle zusammen. Schafswolle weist bei den Versuchen bis zum Versagen der Bekleidung eine sehr gute Dämmwirkung auf. Da es sich hierbei aber um feine „Haare“ handelt, die verhältnismäßig große Lufträume umfassen, kann sich der Brand ungehindert ausbreiten und führt daher zu den schlechten Ergebnissen in der Schutzzeit. Steinwolle zeigt im Gegensatz dazu mit der hohen Temperaturbeständigkeit und der relativ hohen Dichte an festen Stoffen ein sehr gutes Ergebnis. Faktoren wie die Wärmeleitfähigkeit oder auch die Rohdichte der Stoffe geben dabei keinen eindeutig nachvollziehbaren Einfluss auf die erreichten Versuchsergebnisse.

## **5.5 Berechnung der Schutz- und Isolationszeiten**

Um einen Eindruck der Genauigkeiten zu den additiven Berechnungsverfahren zu erhalten, wurden die Ergebnisse aus den Brandversuchen mit dem Verfahren nach [1], [24] und [29] nachgerechnet. Eine ausreichende Genauigkeit wurde auf einen Abweichungsgrad von max.  $\pm 5\%$  festgelegt. Dieser wurde sowohl im sicheren (-) als auch im unsicheren (+) Bereich akzeptiert, da durch die zu erwartenden Schwankungen bei Bränden die Zeiten nicht als absolute Isolations- oder Schutzzeiten angenommen werden können. In [86] sind Versuchsdaten gegeben, aus denen sich für Versuche mit Gipswerkstoffplatten eine Abweichung von ca.  $\pm 5\%$  ableiten lassen. Diese Schwankungen können auch bei Versuchen in [20] zur Betrachtung von Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturmessungen entnommen werden. Für Holzwerkstoffe lassen sich hierzu jedoch keine Angaben finden, bei denen der Versuchsaufbau als ausreichend gleich angesehen werden kann. Es kann jedoch auf Grund der natürlichen Struktur von Holz davon ausgegangen werden, dass ein Abweichungsrahmen von den oben beschriebenen  $\pm 5\%$  ebenfalls angenommen werden kann.

### **5.5.1 Nach DIN EN 1995-1-2:2010**

Der Abweichungsrahmen wird als relative Abweichung in der folgenden Tabelle 6 angegeben. Dieser errechnet sich wie folgt:

$$\text{rel. Abweichung} = \frac{\text{Berechnung} - \text{Branddauer Versuch}}{\text{Branddauer Versuch}} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

### Isolationszeiten

TABELLE 6: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [1]

<b><u>Material</u></b>	<b><u>Brandversuch [min]</u></b>	<b><u>Berechnung [min]</u></b>	<b><u>rel. Abweichung [%]</u></b>
Gipskartonplatte	16	17,5	+ 9,4
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	17,5	+ 9,4
Gipsfaserplatte	21	21	0
OSB-Platte	14	16,5	+ 17,9
Dreischichtholz- platte	23	18	- 21,7
Holzfaserplatte	12	17,6	+ 46,7
Holzweichfaserplatte	24	keine Berechnung möglich	

Da in [1] zur Berechnung der raumabschließenden Funktion nur Gleichungen für die Materialien Sperrholz-, Span- und Faserplatten, Holzbekleidungen und Gipsplatten aufgeführt werden, wurden die Berechnungen mit den gegebenen Gleichungen durchgeführt, die am besten zu der Beschaffenheit und Struktur des betrachteten Baustoffs passen. So wurden OSB-Platten nach der Gleichung für Span- und Faserplatten und Dreischichtholzplatten wie Sperrholzplatten berechnet. Für Holzweichfaserplatten konnte aufgrund der geringen Rohdichte keine Berechnung durchgeführt werden, da keine Gleichung gegeben ist, die die Eigenschaften des Baustoffes genau genug abdecken kann. Für die Holzfaserplatte und die Gipswerkstoffplatten wurden die vorgegebenen Gleichungen verwendet. Die angewendeten Gleichungen sind im Anhang B mit aufgezeigt.

Die Berechnungen der Gipsfaserplatte lieferte dabei eine gute Übereinstimmung innerhalb von  $\pm 5\%$  Abweichung. Für die übrigen Gipswerkstoffplatten und die Holzwerkstoffe konnte

dies nicht eingehalten werden. Den für die Genauigkeit der Nachweisverfahren festgelegten Abweichungsrahmen von  $\pm 5\%$  konnte keine der weiteren Berechnungen erreichen.

### Schutzzeiten

TABELLE 7: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [1]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Berechnung [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	17,5	+ 2,8
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	17,5	- 2,9
Gipsfaserplatte	24	21	- 12,5
OSB-Platte	17	11,5	- 32,4
Dreischichtholz- platte	24	12,6	- 47,5
Holzfaserplatte	14	12,3	- 12,1
Holzweichfaserplatte	51	Keine Berechnung möglich	
Holzfaserdämmung (fest)	41	Keine Berechnung möglich	
Holzfaser- Einblasdämmung	41	Keine Berechnung möglich	
Schafswolle	29	Keine Berechnung möglich	
Glaswolle	39	30,3	- 23,5
Steinwolle	120	42,9	- 64,3

Hier zeigen sich die Ergebnisse für Gipskarton- und Gipskarton-Feuerschutzplatten mit der besten Übereinstimmung von weniger als  $\pm 5\%$  Abweichung. Die Berechnung der Gipsfaserplatte weist hier mit  $-12,5\%$  schon deutlich mehr als die vorgegebenen  $\pm 5\%$  Abweichung auf, ebenso wie die Berechnung der Holzfaserplatte mit  $-12,1\%$  Abweichung. Eine Berechnung der Holzweichfaserplatte und der Holzfaserdämmstoffe ist nicht möglich. Die Gleichungen zu den gegebenen Dämmstoffen weisen mit  $-23,5\%$  für Glaswolle und  $-64,3\%$  für Steinwolle sehr große Abweichungen auf.

Die Schutzzeiten der Materialien wurden wie bei den Isolationszeiten mit den in [1] gegebenen Gleichungen berechnet.

### 5.5.2 Nach Component Additive Method

#### Isolationszeiten

TABELLE 8: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [24]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Berechnung [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	16	18,6	+ 16,3
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	18,6	+ 16,3
Gipsfaserplatte	21	24,0	+ 14,3
OSB-Platte	14	10,7	- 23,6
Dreischichtholz- platte	23	17,7	- 23,0
Holzfaserplatte	12	11,7	- 2,5
Holzweichfaserplatte	24	Keine Berechnung möglich	

Das Berechnungsverfahren nach [24] bietet, bis auf die Dreischichtholzplatte, für alle Materialien eine Gleichung zur Berechnung der Isolationszeit. Für die Dreischichtholzplatte wird hier die Gleichung für Massivholzplatten verwendet. Im Gegensatz zu [1] kann hier jedoch nur bei der Holzfaserplatte ein Ergebnis im  $\pm 5\%$  Abweichungsrahmen festgestellt

werden. Dies kann auch daran liegen, dass Brandversuche Streuungen aufweisen können, die dazu führen, dass die Ergebnisse deutlich voneinander abweichen und so auch die Berechnungen große Unterschiede in den Genauigkeiten aufzeigen.

### Schutzzeiten

TABELLE 9: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [24]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Berechnung [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	24,1	+ 33,9
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	24,1	+ 41,8
Gipsfaserplatte	24	30	+ 25
OSB-Platte	17	16,7	- 1,8
Dreischichtholz- platte	24	28,4	+ 18,3
Holzfasерplatte	14	23,5	+ 67,9
Holzweichfaserplatte	51	Keine Berechnung möglich	
Holzfasерdämmung (fest)	41	Mit Integration [28] 38,7	- 5,6
Holzfasер- Einblasdämmung	41	Mit Integration [28] 38,7	- 5,6
Schafswolle	29	Keine Berechnung möglich	
Glaswolle	39	26,6	- 32,8
Steinwolle	120	114,6	- 4,5

Hier können bei OSB-Platten und Steinwolle sehr gute Übereinstimmungen mit Abweichungen innerhalb der festgelegten  $\pm 5\%$ -Toleranzgrenze festgestellt werden. Vergleicht man diese Ergebnisse mit der Berechnung nach [1], so werden die großen Unterschiede in den Berechnungsverfahren deutlich. Um Holzfaserdämmstoff in das Berechnungsverfahren integrieren zu können, wird [28] mit eingebunden. Die Berechnungen liefern für feste Holzfaserdämmstoffe und Holzfaser-Einblasdämmstoffe gute Ergebnisse, die ebenfalls nur leicht außerhalb der  $\pm 5\%$ -Grenze liegen.

### 5.5.3 Nach prEN 1995-1-2:2025

#### Isolationszeiten

TABELLE 10: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [29]

<b><u>Material</u></b>	<b><u>Brandversuch [min]</u></b>	<b><u>Berechnung [min]</u></b>	<b><u>rel. Abweichung [%]</u></b>
Gipskartonplatte	16	18,6	+ 16,3
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	18,6	+ 16,3
Gipsfaserplatte	21	24	+ 14,3
OSB-Platte	14	10,7	- 23,6
Dreischichtholz- platte	23	14,9	- 35,7
Holzfaserplatte	12	16,1	+ 34,1
Holzweichfaserplatte	24	42,5	+ 76,3

Das Verfahren nach [29] bietet für die untersuchten Bekleidungsmaterialien, bis auf Dreischichtholzplatten, entsprechende Gleichungen zur Berechnung der raumabschließenden Funktion. Allerdings können hier keine Ergebnisse mit weniger als  $\pm 5\%$  Abweichung zu den Brandversuchen festgestellt werden. Die Dreischichtholzplatte wurde mit der Gleichung für mehrschichtige Massivholzplatten berechnet. Eine genaue Angabe, welche Gleichung verwendet werden kann und nach welchen Parametern hier entschieden werden

sollte, ist in [29] ebenfalls wie in [24] nicht gegeben. Die gewählten Gleichungen sind in Anhang A aufgeführt.

### Schutzzeiten

TABELLE 11: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [29]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Berechnung [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	24,1	+ 33,9
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	24,1	+ 41,8
Gipsfaserplatte	24	30	+ 25
OSB-Platte	17	16,7	- 1,8
Dreischichtholz- platte	24	21,6	- 10
Holzfaserplatte	14	25,3	+ 80,8
Holzweichfaserplatte	51	45,4	- 11,8
Holzfaserdämmung (fest)	41	37,1	- 9,5
Holzfaser- Einblasdämmung	41	35,5	- 13,4
Schafswolle	29	35,5	+ 19,5
Glaswolle	39	32	- 19,2
Steinwolle	120	102,9	- 14,3

Auch hier wurde für die Berechnung der Dreischichtplatte die Gleichung für mehrschichtige Massivholzplatten verwendet. Da für Schafswolle ebenfalls keine Gleichung vorgegeben ist, wird diese mit der Gleichung von Zellulose berechnet. Hier kann die geringe Dichte der Schafswolle einfließen, ebenso wird das sehr lockere, offene Gefüge des Dämmstoffs berücksichtigt.

Bei der Berechnung nach [29] kann die untersuchte OSB-Platte Ergebnisse im festgelegten Abweichungsbereich von  $\pm 5\%$  liefern. Die Dreischichtholzplatte und die feste Holzfaserdämmung zeigen Ergebnisse mit einer Abweichung von  $\leq 10\%$ , die für die erforderliche Genauigkeit jedoch nicht ausreichend sind. Die größte Abweichung besteht hier bei der Holzfaserplatte mit  $+80\%$ , was das Ergebnis deutlich auf der unsicheren Seite liegen lässt. Auffällig ist, dass diese bei der Betrachtung der Isolationszeit nur bei  $+34,1\%$  liegt. Hier ist eine deutliche Schwächung der Genauigkeit zu erkennen. Die Gründe hierfür können an einer unzureichend berücksichtigten Wärmeübertragung von Holzfaserplatte und Trägerplatte liegen. Genauere Aussagen können hier jedoch nicht ohne weitere Untersuchungen getroffen werden. Auch in diesem Fall sind die möglichen Streuungen bei Bränden nicht zu vernachlässigen.

#### 5.5.4 Auswertung der Berechnungsverfahren

Die Ergebnisse aus den drei betrachteten additiven Berechnungsverfahren liegen in den meisten Fällen deutlich von den Zeiten aus den Brandversuchen entfernt. Dabei sind die Berechnungen der Gipswerkstoffplatten nach [1] die mit dem geringsten Abweichungsgrad. Bei den Holzwerkstoffen liefert dieses Berechnungsverfahren jedoch nur eine sehr begrenzte Auswahl an Materialgleichungen, weshalb hier besonders gründlich betrachtet werden muss, nach welcher Gleichung die Berechnung ausgeführt werden kann. Für die Entscheidung wurden sowohl die Dichte als auch die Struktur bzw. Zusammensetzung des Materials beachtet.

In vielen Fällen werden die Ergebnisse für die Schutzzeit ungenauer, als sie bei den jeweiligen Berechnungsverfahren für die Isolationszeit waren. Wie in [32] beschrieben, nehmen die Ungenauigkeiten mit Anzahl der Schichten zu. Grund hierfür kann eine unzureichende Betrachtung des Wärmeübergangs zwischen den Schichten, oder auch der Dämmwirkung der Trägerplatte sein. Dies ist besonders bei einer Berechnung der Raumabschlussfunktion für Bauteile mit mehr als drei Schichten negativ zu bewerten. Dabei schwanken die Isolationszeiten und Schutzzeiten bei allen drei Berechnungsverfahren zwischen dem sicheren und unsicheren Bereich, sodass nicht ein Verfahren pauschal als tendenziell konservativ oder unsicher bezeichnet werden könnte. Dies erschwert eine Aussage zu der



Eignung der Berechnungsverfahren. So liefert [1] für Gipsfaserplatten ein Ergebnis mit  $\pm 0,0\%$  Abweichung zu den Brandversuchen der Isolationszeit, jedoch  $-12,5\%$  bei der Schutzzeit. Die Schutzzeit der Steinwolldämmung weicht bei diesem Verfahren um  $-64,3\%$  von den Brandversuchen ab. Die Methode nach [24] zeigt beispielsweise für OSB-Platten eine deutliche Abweichung in der Isolationszeit mit  $-23,6\%$ , aber auch eine besonders gute Übereinstimmung dieser Baustoffs in der Schutzzeit mit  $-1,8\%$ . Ähnlich kann dies bei der [29] betrachtet werden. Hier wird bei einer Berechnung der Isolationszeit für OSB-Platten  $-23,6\%$  Abweichung ermittelt, für die Schutzzeit jedoch ebenfalls nur  $-1,8\%$ . Das verdeutlicht die großen Schwankungen der Genauigkeit innerhalb der Verfahren.

Ein grundsätzlich konservatives Verfahren führt zwar zu überdimensionierten Bauteilen, allerdings kann die Gefahr eines Bauteilversagens reduziert angenommen werden. Eine Berechnung, die auf der unsicheren Seite liegt, würde genau dieses Risiko verstärken, wodurch im extremen Fall die Sicherheit des Gebäudes als nicht gegeben angenommen werden müsste. Auf Basis von [20] und [86] wurde der zulässige Abweichungsrahmen für die Ergebnisse des additiven Nachweisverfahrens auf  $\pm 5\%$  festgelegt. Um die Bauwerkssicherheit nach §3 MBO [7] sicherstellen zu können, müssen die Ergebnisse jedoch ausschließlich auf der konservativen Seite liegen.

Vor allem können aber diese Ungenauigkeiten und Schwankungen ein Grund dafür sein, dass das additive Berechnungsverfahren nach [1] derzeit noch nicht weit verbreitet angewendet wird. Ziel von [29] sollte es daher sein, die Ungenauigkeiten zu reduzieren und ein sicheres, anwendbares Rechenverfahren für raumabschließende Bauteile in Holzrahmenbauweise aufzuführen.

## **5.6 Finite-Elemente-Simulationen zur Ermittlung geeigneter Materialparameter**

Die Nachweisführung über Brandversuche ist finanziell und arbeitstechnisch ein erheblicher Aufwand. Als Ersatz eignen sich computergestützte Berechnungsprogramme oder auch Simulationsprogramme, die die Wärmeverteilung innerhalb eines Bauteils nachbilden können und somit eine Beurteilung auch ohne Brandversuche ermöglichen. Die Programme arbeiten hierbei häufig mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM), die auf der Lösung von Differentialgleichungen, genauer gesagt auf der Wärmeleitgleichung nach Fourier für thermische Analysen, beruhen [87]. Dabei werden durch die FEM-Näherungslösungen für ein Problem gefunden, welches nicht direkt analytisch lösbar ist [4].

Das Programm ANSYS Workbench arbeitet mit solch einer FEM, weshalb es für diese Arbeit als Simulationsprogramm genutzt wurde. Die verwendete Programmversion ist hierbei ANSYS 2022 R2. Als Eingangswerte für eine Simulation zur Wärmeübertragung innerhalb

eines Bauteils sind die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Rohdichte der Materialien erforderlich. Dabei sind die Materialkennwerte temperaturabhängig einzugeben. Weitere physikalische Aspekte, wie Feuchtetransport, Rissbildung, Stoffumwandlungsprozesse etc., müssen ebenfalls über die Materialkennwerte berücksichtigt werden [20], die keine Messwerte, sondern effektive Werte darstellen. Diese ergeben sich aus Nachrechnungen von Brandversuchen, um den Ablauf bei solchen hinreichend genau nachbilden zu können [20, 24].

Die in Abschnitt 5.5 aufgeführten Verfahren zu additiven Berechnungsmethoden bieten auch in Teilen Materialkennwerte für die numerische Simulation, die mit Hilfe der FEM durchgeführt werden kann. Daher werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse nach den jeweiligen Materialkennwerten der [1], [24] und [29] in Bezug auf die beschriebenen Brandversuche aufgeführt. Betrachtet wird auch hierbei das Erreichen der Isolationszeit und Schutzzeit, wie es in Abschnitt 5.5 bei den Berechnungsverfahren ebenfalls angenommen wurde. Die verwendeten Materialparameter der einzelnen untersuchten Materialien sind in Anhang A beigefügt.

Die Wärmeübertragungskoeffizienten, die bei allen Simulationen gleichermaßen eingestellt wurden, lagen für den Übergang des Brandes auf das Bauteil bei  $25\text{W/m}^2\text{K}$  und für den Übergang des Bauteils an die brandabgewandte Außenluft bei  $9\text{W/m}^2\text{K}$ , wie in [55] angegeben.

Die Simulationen werden mit 3D-Modulen in einem einfachen, dreischichtigen Aufbau durchgeführt, wie auch die Probekörper der Brandversuche. Es werden weiterhin keine zusätzlichen Programmierungen ergänzt, die ein Abfallen/Versagen von Schichten einbinden würden. Somit werden Materialänderungen allein durch die Eingabe der verwendeten Materialparameter berücksichtigt.

#### 5.6.1 Nach DIN EN 1995-1-2:2010

In [1] werden Materialkennwerte für Nadelholz mit einer Holzfeuchte von 12% und für Holzkohle als ideale Werte angegeben. Eine genauere Differenzierung zwischen diesen beiden Zuständen erfolgt nicht. Für Holzwerkstoffe führt die [1] keine Materialkennwerte auf. In einem ersten Ansatz werden daher die gegebenen Werte ebenfalls für die untersuchten Holzwerkstoffe entsprechend verwendet. Eine Anpassung an das Material selbst erfolgt mit der materialspezifischen Eingabe der Rohdichte nach [1], die in Tabelle 12 aufgeführt wird. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ändern sich hingegen nicht.

TABELLE 12: ANPASSUNG DER ROHDICHTE NACH DIN EN 1995-1-2:2010 [1]

<u>Temperatur [°C]</u>	<u>Dichteverhältnis Rohdichte zur Darrohdichte</u>
20	$1 + \omega^a$
99	$1 + \omega^a$
99	$1 + \omega^a$
120	1,00
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

<sup>a</sup>  $\omega$  = Feuchtegehalt im Holz

Das Simulationsprogramm akzeptiert keine Rohdichte von „0“. Bei einer Parameterstudie im Zuge der Projektbearbeitung wurde festgestellt, dass die Eingabe der Rohdichte von „1“, „0,1“, „0,01“ und „0,001“ keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf hat. Daher kann der Wert der Rohdichte bei 1.200°C mit 0,1 angenommen werden.

Zur Simulation von Gipswerkstoffplatten oder Mineralwolle liefert [1] ebenfalls keine Materialkennwerte, weshalb für diese untersuchten Materialien keine Simulation nach [1] erfolgen kann. Da hier bewusst die Anwendbarkeit von [1] überprüft werden sollte, wurde keine weiteren Materialparameter aus anderen Quellen mit eingebunden.

## Isolationszeiten

TABELLE 13: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [1]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Simulation [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	16	Keine Simulation möglich	
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	Keine Simulation möglich	
Gipsfaserplatte	21	Keine Simulation möglich	
OSB-Platte	14	14,6	+ 4,3
Dreischichtholz- platte	23	18,3	- 20,4
Holzfaserplatte	12	15,5	+ 29,1
Holzweichfaserplatte	24	30	+ 24,4

Die Simulationen zu den Isolationszeiten zeigen nur bei der OSB-Platte eine Übereinstimmung mit  $<\pm 5\%$  Abweichung. Die weiteren Werte weichen zwischen 20% und 30% ab. Die großen Diskrepanzen zwischen den beiden Ergebnissen liegen an der ungenauen Abbildung der materiellen Eigenschaften in den Materialkennwerten. Die Werte werden in [1] für Holz und Holzkohle von Nadelholz angegeben. Ausgegangen wird hier von Vollholz. Bei Holzwerkstoffen kommt ein Klebstoff hinzu, der abweichende Eigenschaften zum Holzanteil aufweist. Dies wird in den Materialkennwerten nicht berücksichtigt. Zudem bestehen die Holzwerkstoffe aus einzelnen, je nach Baustoff in der Größe differierenden, Holzspänen. Auch hier muss ein zum Vollholz abweichendes Verhalten unter Brandbeanspruchung angenommen werden, was auch ausschlaggebend für die Abbrandgeschwindigkeit sein kann. Diese unberücksichtigten Eigenschaften von Holzwerkstoffen können die Ergebnisse der Simulation verfälschen.

## Schutzzeiten

TABELLE 14: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [1]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Simulation [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	Keine Simulation möglich	
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	Keine Simulation möglich	
Gipsfaserplatte	24	Keine Simulation möglich	
OSB-Platte	17	24,7	+ 45,3
Dreischichtholz- platte	24	29,8	+ 24,2
Holzfaserplatte	14	25,8	+ 84,3
Holzweichfaserplatte	51	60	+ 16,5
Holzfaserdämmung (fest)	41	Keine Simulation möglich	
Holzfaser- Einblasdämmung	41	Keine Simulation möglich	
Schafswolle	29	Keine Simulation möglich	
Glaswolle	39	Keine Simulation möglich	
Steinwolle	120	Keine Simulation möglich	

Für die Schutzzeiten konnten keine Ergebnisse mit  $<\pm 5\%$  Abweichung festgestellt werden. Die großen Abweichungen können, wie auch bei der Isolationszeit, damit begründet werden, dass die Materialkennwerte für Holz und Holzkohle die unterschiedlichen Eigenschaften von Holzwerkstoffen nicht vollständig abdecken können.

## 5.6.2 Nach Component Additive Method

Auch für die Simulation bietet die CAM nach [24] für Dämmstoffe aus Holzfaserprodukten keine Materialkennwerte, weshalb hier auf die Werte zu Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität nach [28] zurückgegriffen wird. Dies betrifft die Simulationen der Holzweichfaserplatte, der Holzfaserdämmung (Holzfaserdämmung fest) und der Holzfaser-Einblasdämmung (Holzfaserdämmung lose).

### Isolationszeiten

TABELLE 15: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [24]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Simulation [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	16	14,1	- 11,9
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	13,8	- 13,8
Gipsfaserplatte	21	17,8	- 15,2
OSB-Platte	14	12,4	- 11,4
Dreischichtholz- platte	23	18,3	- 20,4
Holzfaserplatte	12	14,3	+ 19,2
Holzweichfaserplatte	24	26,2	+ 8,7

Bei der Isolationszeit weist die Simulation zur Holzweichfaserplatte als einziges Material eine Abweichung <10% auf, den zulässigen Grenzwert von  $\pm 5\%$  kann keiner der Baustoffe in dem Simulationsverfahren nachweisen.

## Schutzzeiten

TABELLE 16: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [24]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Simulation [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	20,6	+ 14,4
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	20,7	+ 21,8
Gipsfaserplatte	24	25,7	+ 7,1
OSB-Platte	17	17,8	+ 4,7
Dreischichtholz- platte	24	28,7	+ 19,6
Holzfaserplatte	14	24,7	+ 76,4
Holzweichfaserplatte	51	32,2	- 37,5
Holzfaserdämmung (fest)	41	39,8	- 2,9
Holzfaser- Einblasdämmung	41	39,1	- 4,6
Schafswolle	29	Keine Simulation möglich	
Glaswolle	39	30,9	- 21,9
Steinwolle	120	131,4	+ 9,5

Bei der Simulation der Schutzzeiten konnte bei den Materialien OSB-Platte, Holzfaserdämmung (fest), und Holzfaser-Einblasdämmung gute Übereinstimmungen  $< \pm 5\%$  Abweichung erzielt werden. Die Gipsfaserplatte und die Steinwolldämmung zeigten Abweichungen von  $< 10\%$ . Auffällig ist auch hier, dass die Simulation zur Isolationszeit der

Holzweichfaserplatte gute Übereinstimmungen erreicht hat, sich diese bei der Schutzzeit jedoch nicht bestätigen lassen. Ebenso zeigt die Simulation der Holzfaserplatte in der Schutzzeit eine extrem große Abweichung mit +76% zu den durchgeführten Brandversuchen.

### 5.6.3 Nach prEN 1995-1-2:2025

#### Isolationszeiten

TABELLE 17: VERGLEICH ISOLATIONSZEIT NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [29]

<b><u>Material</u></b>	<b><u>Brandversuch [min]</u></b>	<b><u>Simulation [min]</u></b>	<b><u>rel. Abweichung [%]</u></b>
Gipskartonplatte	16	14,2	- 11,3
Gipskarton- Feuerschutzplatte	16	14,2	- 11,3
Gipsfaserplatte	21	13,3	- 36,7
OSB-Platte	14	12,2	- 12,9
Dreischichtholz- platte	23	17,6	- 23,5
Holzfaserplatte	12	15	+ 25
Holzweichfaserplatte	24	21,5	- 10,8

Bei [29] lieferte keines der gegebenen Materialkennwerte ein Ergebnis im Abweichungsrahmen von  $\pm 5\%$ .



## Schutzzeiten

TABELLE 18: VERGLEICH SCHUTZZEITEN NACH BRANDVERSUCH UND BERECHNUNGSVERFAHREN NACH [29]

<b>Material</b>	<b>Brandversuch [min]</b>	<b>Simulation [min]</b>	<b>rel. Abweichung [%]</b>
Gipskartonplatte	18	20,4	+ 13,3
Gipskarton- Feuerschutzplatte	17	20,7	+ 21,8
Gipsfaserplatte	24	19,9	- 17,1
OSB-Platte	17	17,7	+ 4,1
Dreischichtholz- platte	24	29,6	+ 23,3
Holzfaserplatte	14	25,3	+ 80,7
Holzweichfaserplatte	51	24,5	- 52,4
Holzfaserdämmung (fest)	41	93,0	+ 126,8
Holzfaser- Einblasdämmung	41	93,0	+ 126,8
Schafswolle	29	39,5	+ 32,9
Glaswolle	39	40,4	+ 2
Steinwolle	120	104,7	- 12,75

Hier weist neben der Simulation der OSB-Platte auch die Glaswolle eine sehr gute Übereinstimmung von  $<\pm 5\%$  Abweichung zu den Brandversuchen auf. Vor allem die Simulationen der Holzfaserdämmung sind mit erheblichen, ungenauen Ergebnissen auffällig.

Hier ist sehr stark anzunehmen, dass diese Abweichung aus dem fehlenden Abfallen der brandbeanspruchten Trägerplatte bei der Simulation resultiert.

Ein Vergleich aller angenommenen Materialkennwerte zu den betrachteten Verfahren und die zugehörigen Temperaturverläufe werden in Anhang A aufgeführt.

## **5.7 Fazit der Materialuntersuchungen**

Die Materialuntersuchungen zeigen deutlich, dass eine große Streuung zwischen den Feuerwiderstandsdauern aus den Brandversuchen und den untersuchten Nachweisverfahren besteht. Dabei kann kein Verfahren durchgängig als konservativ oder unsicher identifiziert werden. Da die Bedingungen der Brandversuche durch die Brandeinwirkung nach ETK in einem Brandofen kontrolliert werden konnten, können die Schwankungen mit den Materialparametern der untersuchten Produkte begründet werden. Diese unterliegen den natürlichen Streuungen der Baustoffe, vor allem bei Holz und Holzwerkstoffen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden die aufgeführten Versuche jeweils mit einem Brandversuch untersucht, weshalb die zu erwartenden Größen von Streuungen nicht direkt benannt werden können. Die Materialparameter berücksichtigen für die Nachweisverfahren nur einen „durchschnittlichen“ Wert. Daher sind für diesen Aspekt weitere Untersuchungen zu den Materialparametern und deren Auswirkungen bei der Durchführung von Nachweisverfahren erforderlich, damit die damit einhergehenden Streuungen der Ergebnisse reduziert und die Nachweisverfahren sicherer gestaltet werden können.

## **6 Entwicklung eines FE-Modells zur Simulation der Feuerwiderstandsdauer raumabschließender Holzrahmenbauteile**

### **6.1 Probleme „einfacher“ FEM-Simulationen**

Bei den Simulationen in Abschnitt 5.6 ist besonders auffällig, dass hier bei allen drei betrachteten Verfahren nur eine geringe Anzahl an Übereinstimmungen zu den Brandversuchen zu finden sind. Diese können auch hier nicht durchgängig für einen konservativen oder unsicheren Bereich erkannt werden. Vor allem bei den Dämmstoffen sind teilweise deutliche Abweichungen zu erkennen. Diese resultieren daraus, dass die Brandversuche mit einer vorgestellten Trägerplatte vor der Dämmung durchgeführt wurden. Die Trägerplatte schützt die Dämmung über einen längeren Zeitraum, wodurch nicht nur die Wärmeeinwirkung verzögert, sondern auch eine direkte Brandbeanspruchung verhindert wird. Vor allem bei den brennbaren Dämmstoffen verändert sich dadurch die Schutzzeit erheblich. Um dies bei der Simulation mit abzubilden, wurde die Trägerplatte brandzugewandt in der Simulation mitberücksichtigt. Das Programm kann diese jedoch nicht selbstständig bei Erreichen einer vorgegebenen Temperatur als „abgefallen“ ansehen, weshalb auch bei angepassten Materialkennwerten ein Schutz der Platte zur Dämmung hin angenommen wird. Ein Herabsetzen der Rohdichte auf  $0 \text{ kg/m}^3$ , was theoretisch als nicht mehr vorhandenes Material zu bewerten wäre, ist hierbei nicht zielführend, da das Programm die Schicht weiterhin als vorhanden ansieht. Zudem gibt das Programm eine Fehlermeldung bei einer Rohdichte von  $0 \text{ kg/m}^3$  an, was dazu führt, dass die Simulation nicht gelöst werden kann. Um diese Berücksichtigung zu umgehen, ist eine zusätzliche Programmierung in ANSYS erforderlich, die entweder in Form einer APDL (ANSYS Parametric Design Language) Programmierung oder einer zusätzlich eingefügten Kontakt-Schrittsteuerung eingebunden werden muss. Wird eine solche ergänzende Programmierung nicht durchgeführt, nehmen die Ungenauigkeiten in der Simulation mit jeder weiteren Schicht zu, was infolgedessen bei den Konstruktionen zu einer zu hohen Sicherheitsannahme führen würde. Veranschaulicht dargestellt wird dies in Abbildung 25 anhand des Probekörpers mit einer Holzfaserdämmung, welche einen Vergleich der Ergebnisse aus der Vorversuchsreihe von [22] aufzeigt. Dabei kann eine Simulation nach [1] aufgrund fehlender Materialparameter für den Dämmstoff nicht erfolgen.

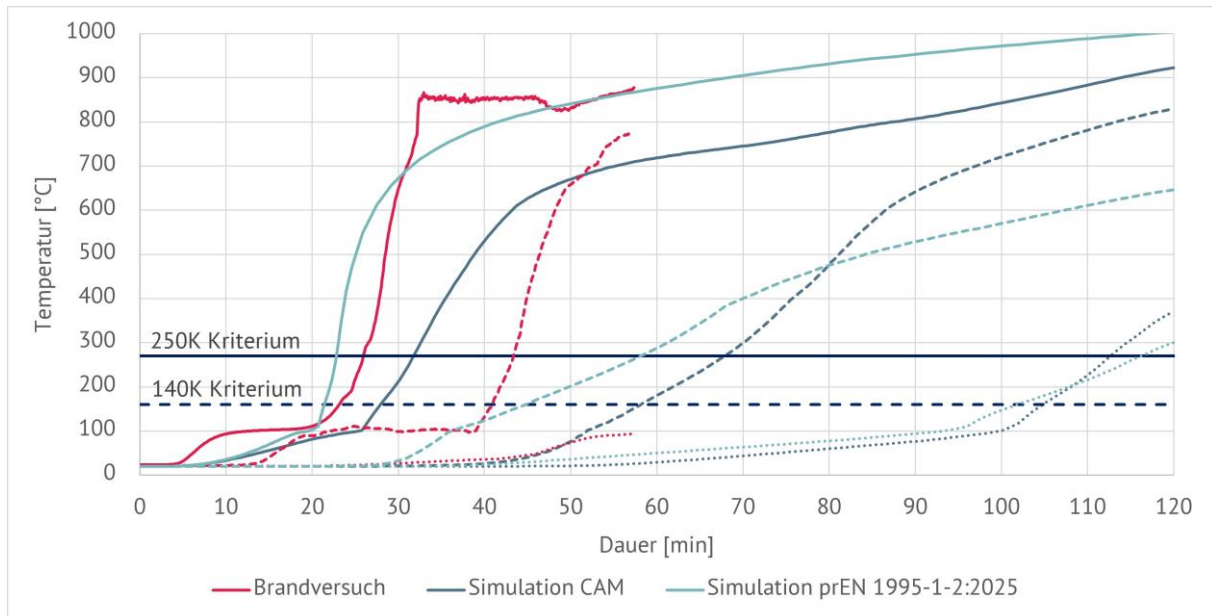


ABBILDUNG 25: TEMPERATURVERLAUFE BRANDVERSUCH UND SIMULATION GEGENÜBERGESTELLT (DURCHGEZOGEN = BRANDBEANSPRUCHE OSB-PLATTE; GESTRICHELT = BRANDABGEWANDTE SEITE DER DÄMMEBENE; GEPUNKTET = BRANDABGEWANDTE OSB-PLATTE)

## 6.2 Schrittweise FEM-Simulationsverfahren

### 6.2.1 Grundidee und Aufbau von FEM-Simulationen

Der Grundgedanke dieser Arbeit ist, ein Vorgehen zur Simulation zu bestimmen, welches es ermöglicht, genaue Schutz-/Isolationszeiten eines Bauteilaufbaus zu bestimmen und dabei auf eine zusätzliche APDL-Programmierung oder Kontakt-Schrittsteuerungen zu verzichten. Dadurch soll eine Bauteilbemessung allein mit den auf der GUI (grafischen Benutzeroberfläche) zur Verfügung stehenden Eingabemöglichkeiten ermittelt werden können.

Eine FEM-Berechnung, wozu eine Simulation mit dem hier gewählten Programm ANSYS gehört, ist im Grunde immer in die gleichen vier Schritte eingeteilt. Diese bestehen aus der Idealisierung des Problems, der Eingabe der Modelldaten, Definition der Randbedingungen und der Lösung und zum Schluss der Darstellung der Ergebnisse [88].

Im Schritt der „Idealisierung“ ist das vorliegende Problem so zu analysieren, dass festgelegt werden kann, wie das Bauteil vereinfacht in dem Programm darzustellen ist, um die geforderten Ergebnisse zu erhalten, aber dennoch die erforderliche Rechenleistung im Blick zu behalten. Grundsätzlich sollten die Bauteile so weit wie möglich abstrahiert, in den Dimensionen reduziert und unnötige Details, die keine Auswirkung auf die zu ermittelnden Ergebnisse haben, entfernt werden [88]. Dies spart erhebliche Rechenkapazitäten bei der Lösung des Problems. Gleichzeitig muss genau festgelegt werden, welche

Umgebungsbedingungen und Einwirkungen entscheidend sind und wie diese in das Modell mit eingebunden werden müssen. Die Idealisierung ist Aufgabe des Anwenders und erfordert eine gründliche Auseinandersetzung mit dem Problem und den Ergebnissen, die durch die Simulation erhalten werden sollen.

Der zweite Schritt, auch als „Preprocessing“ bezeichnet, dient zur Bestimmung der Daten, die zur Lösung des Modells erforderlich sind [88]. Hier sind die Geometrie, das Netz (Mesh) und die Materialdaten/-Kennwerte zu nennen. Vor allem bei der, in dieser Arbeit durchgeführten, thermisch-transienten Simulation sind die Materialkennwerte von entscheidender Bedeutung, da so das Verhalten der Materialien bei der Brandbeanspruchung mit eingebunden wird. Die Vernetzung kann entweder manuell durch die Eingabe der Knotenpunkte und Elemente oder automatisch nach erfolgter Eingabe der Geometrie durchgeführt werden.

Bevor mit der Lösung des Modells begonnen werden kann, sind die äußeren Einflussfaktoren zu definieren [88]. Hier ist zu entscheiden, welche Einwirkungen für die Lösung relevant sind. So können Krafteinwirkungen, Lasten oder auch Temperatureinwirkungen usw. von Bedeutung sein. Für den hier vorliegenden Fall wird eine reine Brandeinwirkung nach [18], ohne zusätzlich Lasten, angenommen. Um die Brandeinwirkung abbilden zu können, wird die Temperatur durch Konvektion und Strahlung auf das Bauteil übertragen. Randbedingungen wie die Eingabe der Zeitschritte sind erforderlich, um eine aussagekräftige Lösung zu erhalten, aber dennoch sind diese so zu wählen, dass die Rechenleistung so gering wie möglich gehalten wird.

Die Darstellung der Ergebnisse, oder auch „Postprocessing“ [88], dient der Auswertung der Berechnungsergebnisse. Diese können sowohl in grafischer Form als auch als Zahlenwerte ausgegeben werden. Die Entscheidung, inwieweit das Ergebnis als realistisch zu bewerten ist, liegt beim Anwender. Es ist ebenfalls bei jeder erfolgten Berechnung kritisch zu betrachten, ob die ausgegebenen Werte durch Eingabefehler verfälscht wurden. Hierfür ist ein ausreichendes Fachwissen des Anwenders im Verhalten der untersuchten Baustoffe im Brandfall ebenso erforderlich wie Erfahrungswerte in deren Funktionsdauer des Raumabschlusses. Sind die Ergebnisse plausibel, können diese meist direkt aus dem Programm heraus als farbliche Grafik oder in Textform zur Weiterverwendung in anderen Programmen übernommen werden. Die Abbildung 26 aus [88] zeigt diesen grundlegenden, vierstufigen Aufbau grafisch auf.

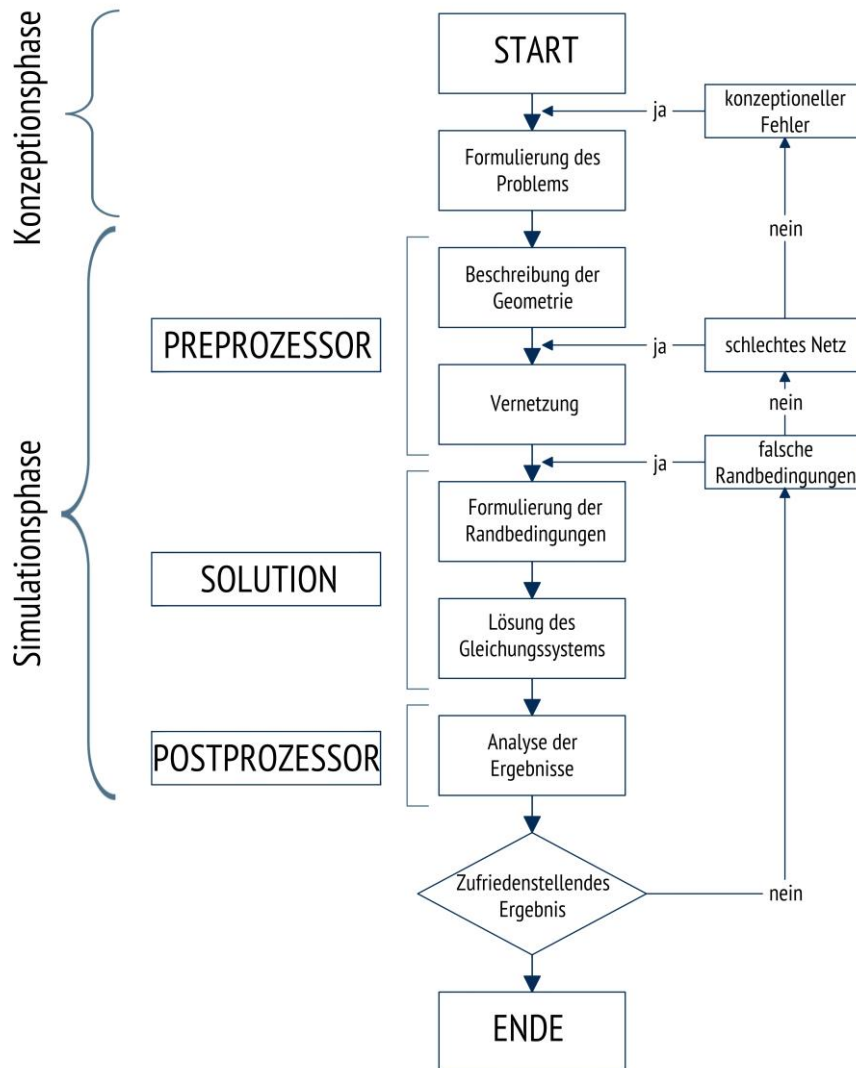


ABBILDUNG 26: GRAFISCHE DARSTELLUNG ABLAUF EINER SIMULATION NACH [88]

Das hier verwendete Programm ANSYS Workbench 2022 R1 bietet dem Nutzer eine GUI, die nicht den vollwertigen Umfang des ursprünglichen Programms ANSYS Classic wiedergibt. Es verbindet CAD-Programm und Simulationsprogramm, wodurch an CAD-Zeichnungen mithilfe der ANSYS-Classic-Verbindung einfache FE-Berechnungen durchgeführt werden können. Dieser Aufbau bietet zwar benutzerfreundliche Simulationsmöglichkeiten, allerdings sind komplexe Systeme nicht allein durch die Benutzeroberfläche abbildbar. In diesen Fällen ist die oben genannte APDL-Programmierung erforderlich. Die gegebene GUI berücksichtigt beispielsweise keine Rissbildung oder Abbauprozesse in der Holzverbrennung. Ein Ausgleich hierfür soll die Eingabe effektiver Materialkennwerte schaffen, die mit einer temperaturabhängigen Änderung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität diese Effekte aufnimmt. Dennoch wird die brandbeanspruchte Bauteilschicht durchgängig vom Simulationsprogramm als vorhanden angesehen, was mit jedem Rechenschritt zu einer Verfälschung der Temperatur im Bauteilinneren und als

Konsequenz hieraus zu ungenauen Ergebnissen bei der Feuerwiderstandsdauer des Bauteils führt. Durch APDL-Codes können Befehle aus ANSYS Classic direkt in ANSYS Workbench integriert werden. In dieser Arbeit wird, aufgrund der Vielzahl der möglichen APDL-Befehle, darauf verzichtet, diese hier aufzuführen. ANSYS bietet hierfür eigene Dokumente, in denen die APDL-Codes, die eingebunden werden können, aufgeführt sind, wie beispielsweise in [89].

### 6.2.2 Simulationsmodell

In ANSYS Workbench wurde eine Geometrie eingegeben, die auf das Nötigste reduziert wurde. In dem Programm wurden adiabate Bedingungen an den Rändern des Modells ausgewählt. Dies wirkt sich gleichermaßen aus, wie die Eingabe von Symmetrien, wodurch an Randbereichen des Modells Einstellungen so vorgesehen werden, dass bei der Lösung des Modells an diesen Knotenpunkten ein angrenzendes Feld, mit den gleichen Einstellungen wie das betrachtete, angenommen wird. Durch diese Annahme können die Modellgröße reduziert und Rechenzeit und -Leistung eingespart werden.

Überprüft wurde das Verfahren mit zwei Modellen, welche die Abmessungen 10mm x 10mm und 2mm x 2mm aufwiesen. Die Materialstärken wurden bei beiden Modellen nach tatsächlichen Werten eingegeben. Die Abweichungen in der Temperaturzeitkurve zwischen den Modellgrößen waren so minimal, dass diese ohne Konsequenzen vernachlässigt werden konnten, weshalb die folgenden Untersuchungen mit dem kleineren Modell durchgeführt wurden. Der Ausschnitt wird mittig aus dem Bereich der Gefache eines Holzrahmenbauteils angenommen. So können Einflüsse aus dem Randbereich unbeachtet bleiben, siehe hierzu auch Abbildung 27.

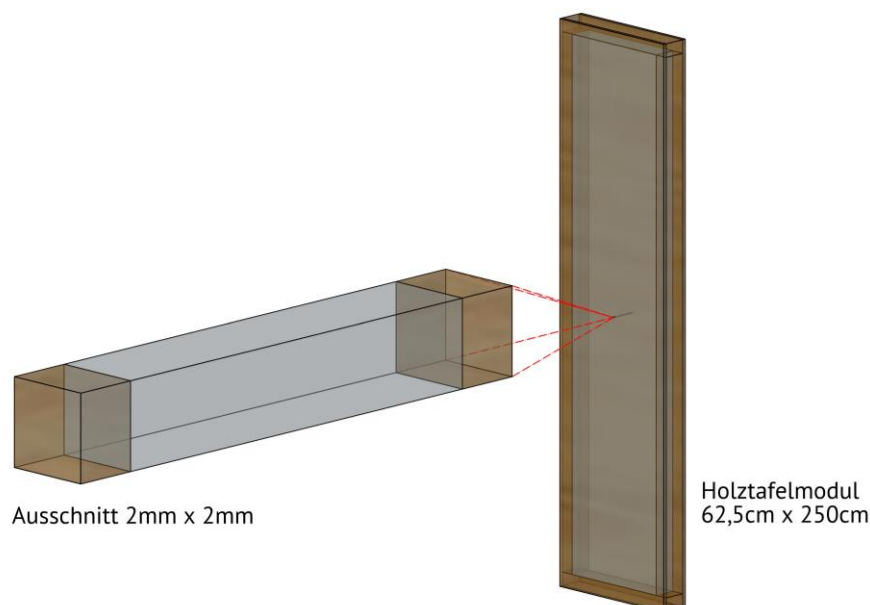


ABBILDUNG 27: MODELLAUSSCHNITT MIT ANGENOMMENER LAGE IN BAUTEIL

Zur Bestimmung der Temperaturen wurden zwischen den Schichten mittig Messstellen vorgesehen, wie in Abbildung 28 gezeigt. So konnte eine Auswertung der Temperaturentwicklung zwischen den Materialschichten bzw. für jede Schicht separat vorgenommen werden.

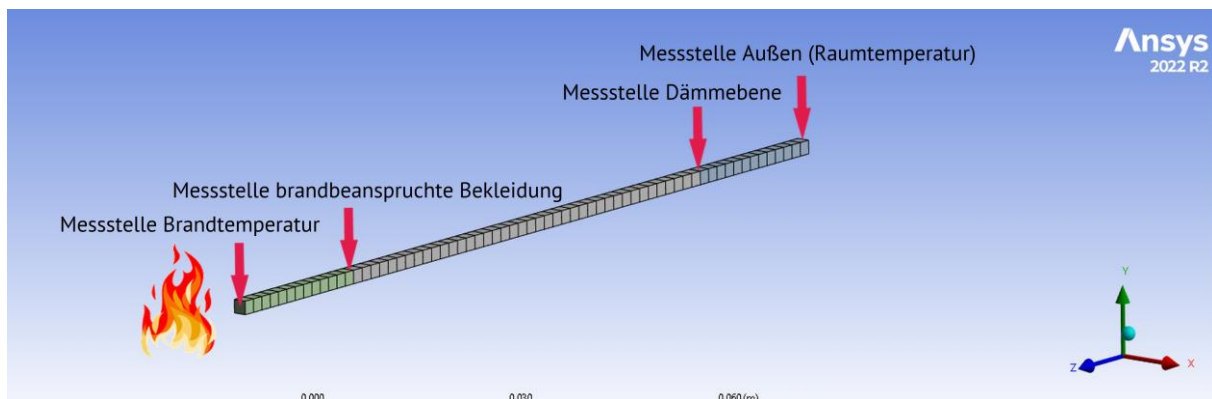


ABBILDUNG 28: ANSYS MODELL MIT MESH UND SCHICHTEN MIT TEMPERATURMESSUNG

Mit der adiabaten Annahme an den Modelrändern werden die Eigenschaften des Materials auch über das erstellte Modell hinaus an den Knotenpunkten angenommen. Dadurch kann die Geometrie deutlich in der Größe reduziert werden, ohne relevante Messungenauigkeiten zu erhalten. An den Übergängen zwischen den Materialien werden Kontakte/Verbindungen angegeben, sodass die Wärmeübertragung an diesen Stellen bei der Lösung umfänglich vorgenommen wird. Das Mesh ist mit einer Größe von 2 mm vorgesehen, was der Größe des betrachteten Bereichs entspricht.

Die Temperatureinwirkung wird mittels Konvektion und Strahlung auf das Bauteil übertragen. Hierzu wird die ETK nach [18] angenommen. Die Eingabe der erforderlichen Wärmeübergangskoeffizienten für die Warm- und Kaltseite erfolgt nach den Angaben im Abschnitt 4.3.2.2 dieser Arbeit.

Die Simulation ist auf eine Spanne von 5.400 Sekunden eingestellt. Dies entspricht einer Branddauer von 90 Minuten. Für Untersuchungen mit einer Steinwolldämmung muss die Simulationszeit auf 7.200 Sekunden (120 Minuten) erhöht werden, um die Temperaturentwicklung bis zum Ende der durchgeführten Brandversuche nachbilden zu können.

Die Problematik, das Modell mit den hier beschriebenen Einstellungen nachzusimulieren, wurde in Abschnitt 5.6 bereits beschrieben, daher werden im Folgenden mögliche Lösungsansätze aufgeführt.



### 6.2.3 Beschreibung APDL-Programmierung

Die Vorteile einer zusätzlichen APDL-Programmierung im Simulationsprogramm ANSYS Workbench liegen klar bei der Möglichkeit, die Ermittlung der raumabschließenden Funktion in nur einem Simulationsdurchgang auszuführen. Das Programm kann so selbstständig ein Versagen oder Abfallen der Schichten ab einer voreingestellten Bauteiltemperatur, bzw. Schichttemperatur berücksichtigen. Die Brandeinwirkung wird durch weitere Programmierungen ebenso selbstständig auf die darauffolgende Schicht eingestellt, sodass diese so beansprucht wird, wie es bei einem Brandversuch der Fall wäre. Dadurch können Ergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit ermittelt werden.

Für diese Arbeit ist es von Bedeutung, das Versagen der Schichten zu einem nicht bekannten Zeitpunkt abhängig von der Temperatur auf der brandabgewandten Schicht vorzusehen. Mittels einer APDL-Programmierung kann eine solche temperaturgesteuerte Simulation durchgeführt werden, was dem Verhalten des Materials bei einer Brandbeanspruchung nahekommt. Eine der Möglichkeiten ein solches Versagen einzelner Schichten vorzusehen ist der APDL-Befehl „ekill“. Mit diesem werden (vorher) definierte Elemente entfernt [87], bzw. deren thermische Eigenschaften auf 0 gesetzt [90]. Um festzulegen, welche Elemente entfernt werden sollen, sind diese in einem separaten Schritt zu benennen. Dies geschieht nach dem ersten Lösungsdurchlauf der Simulation im Postprozessor. Hier werden die Grenzkriterien der zu entfernenden Elemente festgelegt [90]. In einem weiteren Lösungsschritt werden die Elemente entfernt, woraufhin im Postprozessor die Temperaturverteilung der verbleibenden Elemente gezeigt wird [90]. Wichtig ist dabei, darauf zu achten, dass die Brandeinwirkung auf die verbleibenden Elementoberflächen aufgebracht werden muss.

Durch die zusätzliche Eingabe des ekill-Befehls und der dazugehörigen Eingaben, wie z.B. die Verlagerung der brandbeanspruchten Oberfläche werden die manuellen Schritte der Plausibilitätsprüfung und der potenziellen Fehlersuche erschwert. Die ergänzenden Programmierungen machen die Simulationsdatei unübersichtlicher und ohne tieferegreifende Kenntnisse ist das Auffinden der Fehlerquelle im Vergleich zur reinen Nutzung der GUI deutlich erschwert. Bei Simulationen, wie sie bei der Ermittlung des Raumabschlusses von mehrschichtigen Bauteilen erforderlich sind, ist diese Eingabe bislang jedoch unumgänglich, da die Temperatureinwirkungen auf eine Schicht, auch vor einer direkten Beflammung, essenziell bei der Schutz- und Isolationswirkung sind. Wird dies nicht berücksichtigt, folgt hieraus ein stark abweichendes Ergebnis, wie in Abbildung 25 erkennbar ist. Eine solche Ungenauigkeit ist auch für eine vorläufige oder überschlägige Beurteilung des Feuerwiderstandes eines Bauteils nicht akzeptabel.

#### 6.2.4 Vorgehen ohne zusätzliche Programmierschritte

Dieser Abschnitt beschreibt ein Vorgehen, nach welchem eine belastbare Berechnung einer raumabschließenden Funktion von Holztafelbauteilen durchgeführt werden kann, und dabei auf zusätzliche APDL-Programmierungen zu verzichten. Die Methode stützt sich dabei rein auf die GUI von ANSYS Workbench.

Der Modellaufbau wird aus Abschnitt 6.2.2 übernommen, ebenso wie die Einstellung in ANSYS Workbench. Eine Unterteilung der Lastschritte ist nicht erforderlich, kann aber auf Wunsch vorgenommen werden.

Die Simulationszeit sollte auf maximal 7200 Sekunden (120 Minuten) begrenzt werden, um Rechnerkapazitäten nicht unnötig auszulasten. Zudem ist die Anwendbarkeit des Verfahrens nach dieser Arbeit nur bis zu einer Brandbeanspruchung von 120 Minuten nachgewiesen, weshalb bei einer längeren Simulationsdauer die Genauigkeit nicht gewährleistet werden kann. Hierfür werden weitere Untersuchungen benötigt.

Für die hier beschriebene Methode der schichtweisen Bauteilsimulation sind drei Schritte erforderlich. Neben dem Simulationsprogramm erleichtert ein Kalkulationsprogramm, wie z.B. Excel von Microsoft Office, die Verarbeitung der Daten, welche aus dem Simulationsprogramm zu entnehmen sind.

Im ersten Schritt wird das vollständige Modell mit allen Schichten wie in Abbildung 29 aufgeführt, mit den Brandeinwirkungen nach [18] simuliert. Die Messstellen liegen ebenfalls wie in Abbildung 29 angegeben. Aus dieser Simulation ist die Zeit ( $t_1$ ) bis zum Erreichen von 270°C nach der ersten Schicht (Messstelle M1) relevant. Zusätzlich ist die Temperatur ( $T_2$ ) nach der zweiten Schicht (Messstelle M2) zu dieser Zeit ( $t_1$ ) entscheidend für die Ermittlung der raumabschließenden Funktion.

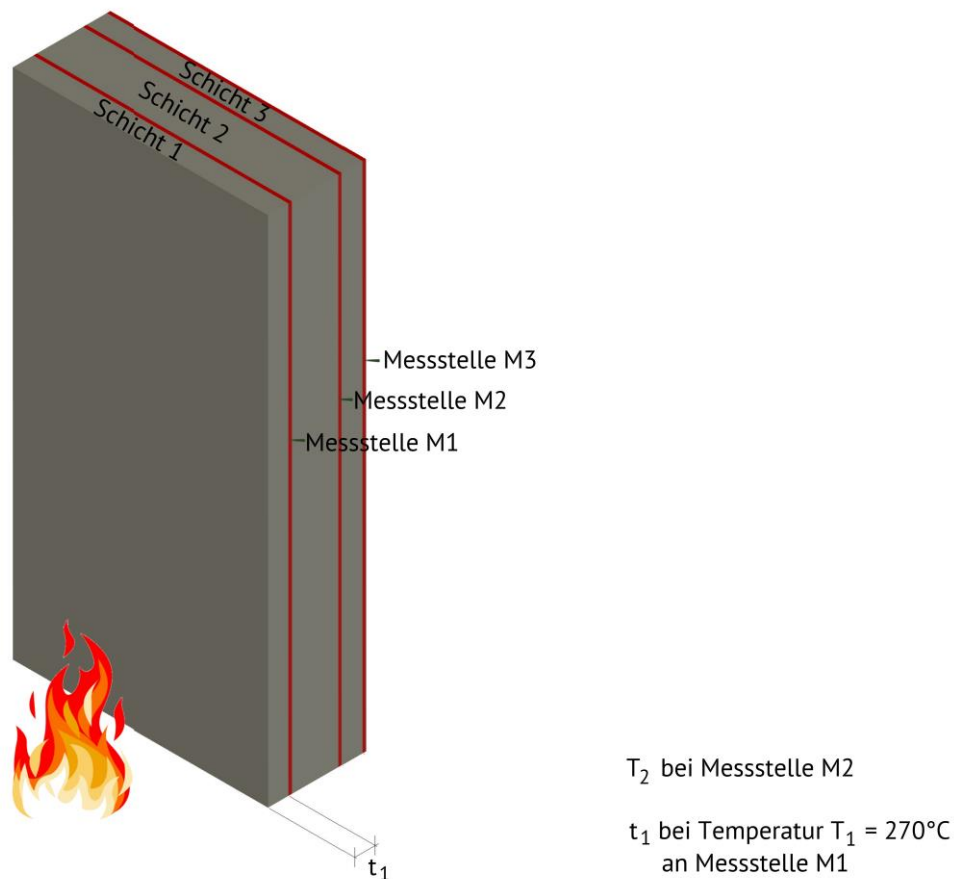


ABBILDUNG 29: SCHEMA-ZEICHNUNG 1. SIMULATION

Für die zweite Simulation ist die brandbeanspruchte Bekleidung (Schicht 1) zu unterdrücken, bzw. zu entfernen. Diese darf vom Simulationsprogramm nicht mehr berücksichtigt werden, da dies ansonsten die Ergebnisse verfälschen würde. Die Brandeinwirkung wird entsprechend auf die Dämmebene (Schicht 2) verlegt und die Simulation mit den gleichen Parametern erneut gestartet.

Hier ist die Zeit, bis nach der brandbeaufschlagten Schicht 2 an der Messstelle M2 eine Temperatur von  $270^\circ\text{C}$  erreicht ist, relevant ( $t_2$ ), ebenso wie die Temperatur der äußersten Schicht 3 an der Messstelle M3 nach diesem Zeitpunkt ( $T_3$ ). Bei diesem Schritt muss zusätzlich noch ein weiterer Wert entnommen werden. Eine wichtige Größe ist hier die Zeit ( $t_{2,1}$ ), wann die Temperatur ( $T_2$ ) aus der ersten Simulation an der Messstelle M2 nachgewiesen wird. Diese wird benötigt, um die Vorerwärmung der Schicht 2 aus der 1. Simulation mit in das Nachweisverfahren einzubinden, da diese bei der erneuten Simulation nicht mitberücksichtigt wird. Grafisch ist dies in Abbildung 30 dargestellt.

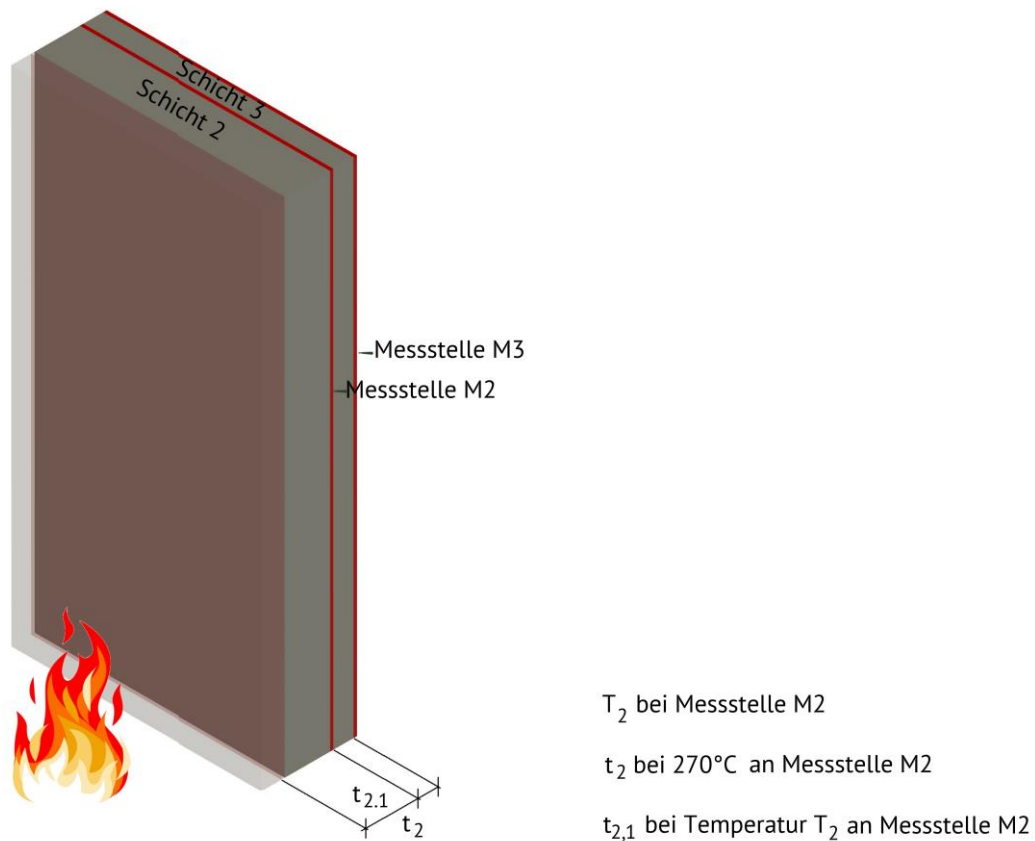


ABBILDUNG 30: SCHEMA-ZEICHNUNG 2. SIMULATION

Zuletzt wird die Simulation erneut ausgeführt, allerdings ist hier nur noch die äußerste brandabgewandte Bekleidung (Schicht 3) vorzusehen. Die Dämmebene (Schicht 2) muss ebenfalls so unterdrückt werden, dass eine Berücksichtigung dieser durch das Simulationsprogramm nicht erfolgt, siehe Abbildung 31.

Aus dieser Simulation sind die Zeiten  $t_3$  und  $t_{3,2}$  zu entnehmen. Dabei bestimmt die Zeit  $t_3$  das Erreichen der Temperatur von 160°C an der Messstelle M3 auf der brandabgewandten Seite der Schicht 3 und  $t_{3,2}$  den Zeitpunkt, bei der die Temperatur  $T_3$  an der Messstelle M3 erreicht wurde. Auch hier ist diese Zeitspanne bedeutend, da eine Vorerwärmung der Schicht 3 aus der zweiten Simulation im dritten Simulationsdurchlauf nicht mitberücksichtigt wird.

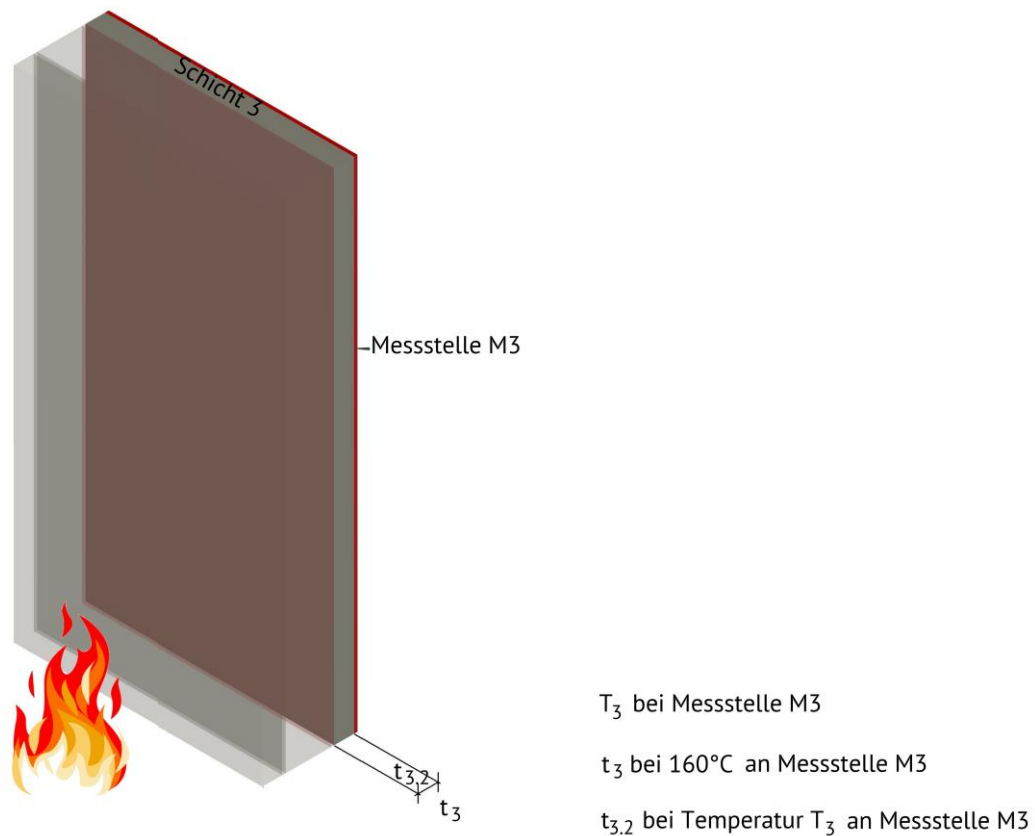


ABBILDUNG 31: SCHEMA-ZEICHNUNG 3. SIMULATION

Die Berechnung der Zeit, für die eine raumabschließende Funktion des Bauteils angenommen werden kann, erfolgt manuell, bzw. kann auch über eine automatische Funktion einer einfachen Excel-Tabelle erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine solche erstellt, die die Eingabe der benötigten Werte vereinfachen soll und automatisch die ermittelte Raumabschlussdauer ausgibt. Wie sich diese darstellt, ist in Abbildung 32 aufgezeigt und in Anhang C näher erläutert.

## Nachweismethode der raumabschließenden Funktion anhand schichtweiser Bauteilsimulation

**Bauteilaufbau:** (bitte auswählen)  Anzahl der Schichten (aktuell nur 3-schichtige Aufbauten möglich)

**Art der Schicht** (bitte auswählen)

OSB-Platte 25mm	Bekleidung	brandbeaufschlagte Schicht
Glaswolldämmung 80mm	Dämmung	Dämmschicht
OSB-Platte 25mm	Bekleidung	brandabgewandte Schicht

**Abbildung Messstellen**

T<sub>1</sub> bei Messstelle M1  
 T<sub>2</sub> bei Messstelle M2  
 T<sub>3</sub> bei Messstelle M3  
 t<sub>1</sub> bei 270°C an Messstelle M1  
 t<sub>2</sub> bei 270°C an Messstelle M2  
 t<sub>3</sub> bei 160°C an Messstelle M3  
 t<sub>2,1</sub> bei Temperatur T<sub>2</sub> an Messstelle M2  
 t<sub>3,2</sub> bei Temperatur T<sub>3</sub> an Messstelle M3

Einheit der Zeitangabe		Eingabe in Sekunden	
Werte aus Simulation		Berechnung ausführen	
t <sub>1</sub>	1460,29 sek	24,34 min	
T <sub>2</sub>	22,63 °C bei	24,34 min	
t <sub>2,1</sub>	221,13 sek	3,69 min	bei 22,63 °C
t <sub>2</sub>	1117,64 sek	18,63 min	
T <sub>3</sub>	28,13 °C bei	18,63 min	
t <sub>3,2</sub>	434,45 sek	7,24 min	bei 28,13 °C
t <sub>3</sub>	1370,28 sek	22,84 min	
<b>raumabschließende Funktion</b>		<b>54,88 min</b>	

Das Bauteil erfüllt die Feuerwiderstandsqualität: **feuerhemmend**

ABBILDUNG 32: EINGABE- UND AUSGABE EXCEL-SHEET ZUR BERECHNUNG DER RAUMABSCHLIEßENDEN FUNKTION (BEISPIEL)

Unter Gleichung (11) ist aufgeführt, wie die Berechnung in dem Verfahren der schichtweisen Bauteilsimulation aufgebaut ist:

$$t_R = t_1 + (t_2 - t_{2,1}) + (t_3 - t_{3,2}) \text{ [min]} \quad (11)$$

- mit:
- t<sub>R</sub> Dauer der raumabschließenden Funktion [min]
  - t<sub>1</sub> Zeit bis zum Erreichen von 270°C an der Messstelle M1 [min]
  - t<sub>2</sub> Zeit bis zum Erreichen von 270°C an der Messstelle M2 [min]
  - t<sub>3</sub> Zeit bis zum Erreichen von 160°C an der Messstelle M3 [min]
  - t<sub>2,1</sub> Zeit bis zum Erreichen der Temperatur T<sub>2</sub> an der Messstelle M2 im zweiten Simulationsdurchgang [min]
  - t<sub>3,2</sub> Zeit bis zum Erreichen der Temperatur T<sub>3</sub> an der Messstelle M3 im dritten Simulationsdurchgang [min]

Die Festlegung der Grenztemperaturen resultieren aus den Schutz- und Isolationszeiten der additiven Berechnungsverfahren. Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit hat sich gezeigt,

dass es nicht nur zielführend ist, die Isolationszeit (20°C Bauteiltemperatur zu Simulationsbeginn + 140K Temperaturerhöhung) zu übernehmen, sondern auch die Schutzzeit (20°C Bauteiltemperatur zu Simulationsbeginn + 250K Temperaturerhöhung) in die Ermittlung mit einzubinden. Die Schutzzeit markiert einen wesentlichen Grenzwert, bei deren Überschreiten das Holz in eine andere Phase der Verbrennung übertritt. Mit Einsetzen der Pyrolyse bei 270-300°C beginnt das Holz sichtbar mit der Zersetzung. Ab diesem Zeitpunkt reduziert sich die Querschnittsfläche, was nicht nur aus tragwerksplanerischen Gründen einen Nachteil darstellt, sondern auch aus brandschutztechnischer Sicht negativ für den Raumabschluss ist. Vor allem bei einer brennbaren Dämmung ist ab dieser Phase damit zu rechnen, dass durch die fehlende Masse des Dämmstoffs der Wärmedurchgang zunimmt. Daher wird der Verlust der Schutzwirkung aus den additiven Berechnungsverfahren bei dieser Nachweismethode mit übernommen.

Das vorgestellte Nachweisverfahren über die schichtweise Bauteilsimulation wurde bei den Untersuchungen bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten erfolgreich durchgeführt. Hier ist zu berücksichtigen, dass Werte, die über dieser Zeitspanne liegen, mit einer Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Funktion von 120 Minuten, aber nicht sicher mit der tatsächlich errechneten Feuerwiderstandsdauer angenommen werden können. Hierzu sind weitere Untersuchungen mit Brandversuchen über 120 Minuten Feuerwiderstandsdauer erforderlich, um die Genauigkeit des beschriebenen Verfahrens in diesem Zeitraum bestätigen zu können.

Die Brandversuche, die im Rahmen des Projektes [22] durchgeführt wurden, haben den deutlich längeren Verbleib eines nichtbrennbaren Bekleidungsmaterials bestätigt. Die dadurch längere Schutzwirkung vor der direkten Brandbeanspruchung ist auch in dem Nachweis durch die schichtweisen Bauteilsimulation zu berücksichtigen. Daher ist für den Fall einer Verwendung nichtbrennbaren Bekleidungsmaterials die Gleichung (11) entsprechend anzupassen.

$$t_R = 2 \cdot t_1 + (t_2 - t_{2,1}) + (t_3 - t_{3,2}) \text{ [min]} \quad (12)$$

Für den Fall einer Bekleidung aus nichtbrennbaren Materialien, wie z.B. Gipswerkstoffplatten, ist demnach zur Berechnung der raumabschließenden Funktion eines Holztafelbauteils die Gleichung (12) entsprechend zu verwenden. Der Faktor 2 wurde durch das Trial-and-Error-Prinzip festgelegt und konnte bei der Validierung der Gleichung mit den Brandversuchen bestätigt werden.

Die tragende und aussteifende Funktion der wesentlichen Holzbauteile hat sowohl für tragende als auch für nichttragende, raumabschließende Bauteile separat zu erfolgen. Eine Bemessung dieser Parameter ist mittels der schichtweisen Bauteilsimulation und auch anhand des erstellten Excel-Dokumentes nicht möglich. Diese befassen sich ausschließlich mit dem Raumabschluss in der Ebene der Dämmstoffe.

### 6.2.5 Beispiel

Das nachfolgend aufgeführte Beispiel soll die Genauigkeit des Nachweisverfahrens mit der schichtweisen Bauteilsimulation aufzeigen. Hierzu dient ein Versuch aus der Vorversuchsreihe von [22, 32]. Gewählt wurde das Modul mit einer Glaswolldämmung. Der Aufbau wurde mit einer 25 mm starken OSB 3-Platte, 80 mm Glaswolldämmung und einer weiteren 25 mm starken OSB 3-Platte vorgesehen. Diese Materialdicken werden 1:1 in dem Simulationsmodell übernommen. Der mittlere Temperaturverlauf jeder Schicht aus den Brandversuchen ist in dem folgenden Diagramm unter Abbildung 33 dargestellt.

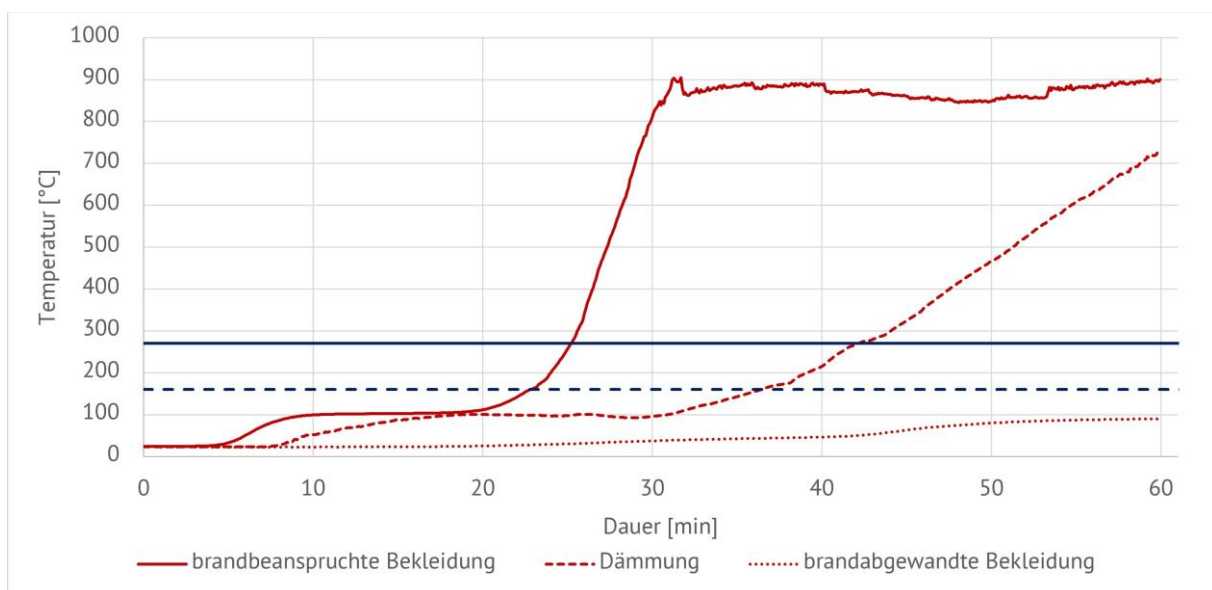


ABBILDUNG 33: VORVERSUCH GLASWOLLDÄMMUNG AUS [22], MITTLERE TEMPERATURVERLÄUFE BRANDVERSUCH

Die raumabschließende Funktion wurde bei diesem Versuch für 58 Minuten nachgewiesen. Das Versagen des Bauteils wurde durch einen Durchbrand im oberen Drittel des Probekörpers festgestellt. Durch die Berechnung mit der schichtweisen Bauteilsimulation sollte eine Funktionsdauer erreicht werden, die eine maximale Abweichung von  $\pm 5\%$  beim Raumabschluss nicht überschreitet.

Das Simulationsmodell wurde wie unter 6.2.2 aufgeführt angenommen. Die Materialparameter wurden nach den folgenden Quellen definiert:



## Material

OSB 3-Platte von [91]	CAM nach [24]
Glaswolldämmung von [70]	CAM nach [24]
OSB 3-Platte von [91]	CAM nach [24]

Die erste Simulation ergab bis zum Erreichen der Grenztemperatur von 270°C auf der brandabgewandten Seite der beanspruchten Bekleidungsplatte (Messstelle M1) eine Zeitspanne von  $t_1 = 24,34$  Minuten. Zu diesem Zeitpunkt erreichte die Messstelle M2 auf der brandabgewandten Seite der Dämmebene eine Temperatur von  $T_2 = 22,63$ °C, siehe auch Abbildung 34.

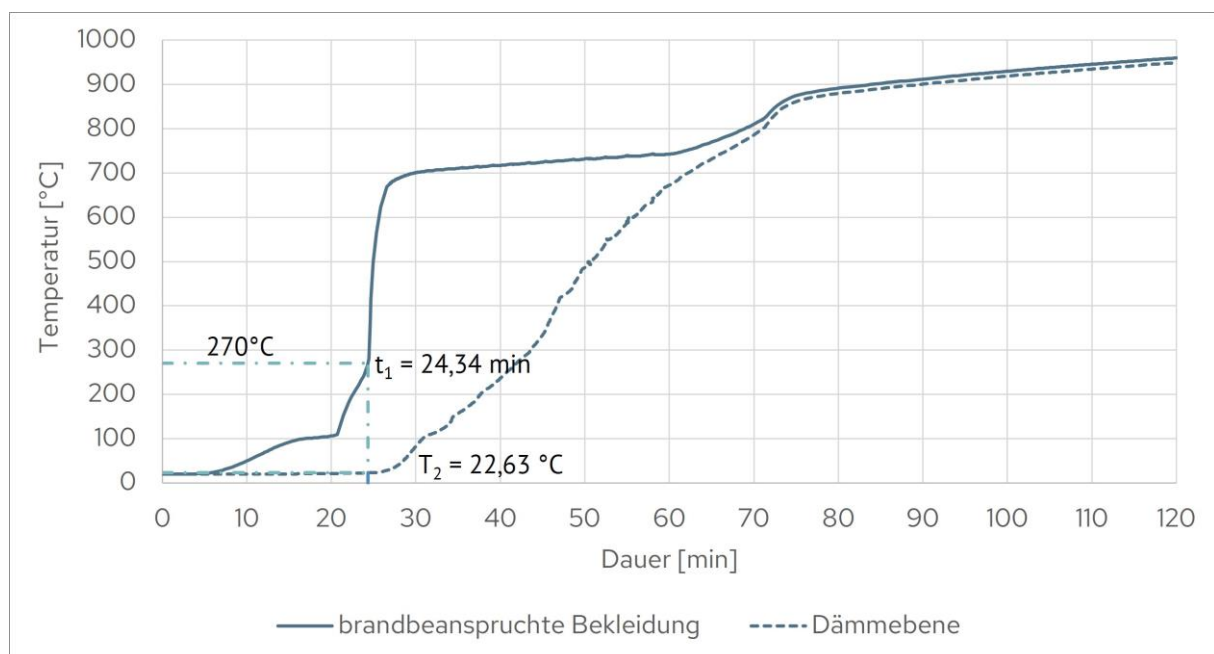


ABBILDUNG 34: GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ERSTEN SIMULATION

In der darauffolgenden Simulation wurde die brandzugewandte Bekleidungsschicht unterdrückt, sodass es hier keine Beeinflussung auf die nun freiliegende Dämmebene gab. Die Einwirkungen des Brandes durch Angaben von Konvektion und Strahlung ist auf die brandzugewandte Seite der Dämmschicht zu legen. Mit diesem Schritt wird das Versagen und Abfallen der brandzugewandten Bekleidungsschicht berücksichtigt. In Abbildung 35 sind die Einstellungen der zweiten Simulation ersichtlich.

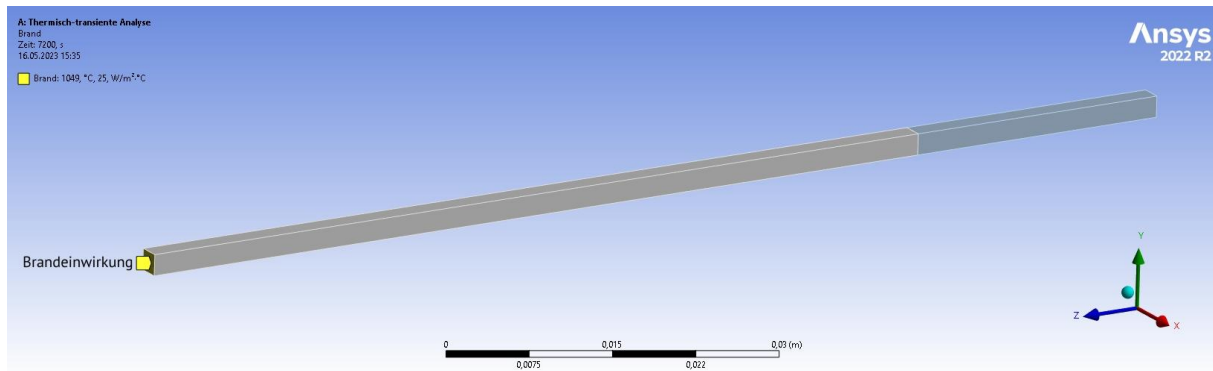


ABBILDUNG 35: ZWEITE SIMULATION, OHNE BRANDZUGEWANDTE BEKLEIDUNG

Aus den Ergebnissen dieser Simulation sind die Zeiten bis zum Erreichen der Temperatur  $T_2$ , in diesem Beispiel mit  $t_{2,1} = 4,41\text{min}$  sowie  $t_2 = 19,83\text{min}$  bis zum Erreichen von  $270^\circ\text{C}$  an der Messstelle M2 zu entnehmen. Um die Vorerwärmung der äußeren Bekleidung zum Zeitpunkt des Versagens der Dämmung und somit die direkte Brandbeanspruchung der äußeren Bekleidung zu berücksichtigen, ist aus den Simulationsergebnissen ebenso die Temperatur der Messstelle M3 mit  $T_3 = 28,13^\circ\text{C}$  zum Zeitpunkt des Erreichens von  $270^\circ\text{C}$  an der Messstelle M2 zu ermitteln. Eine grafische Darstellung der entnommenen Werte liefert Abbildung 36.

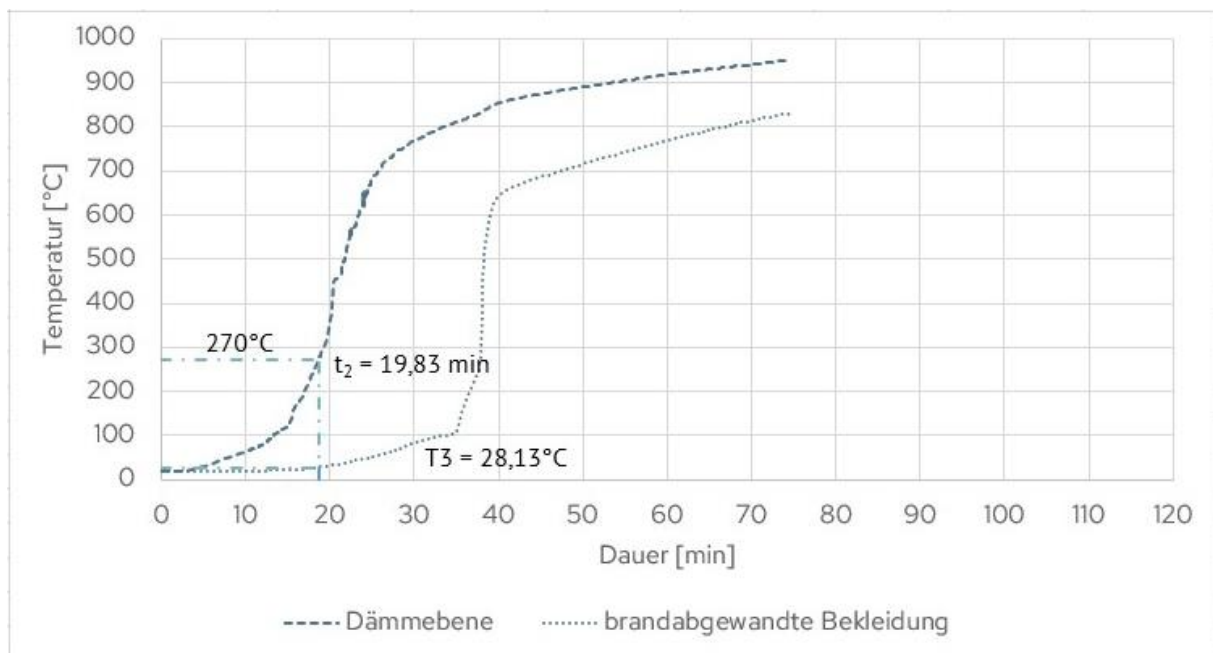


ABBILDUNG 36: GRAFISCHE DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERLÄUFE IM ZWEITEN SIMULATIONSSCHRITT

Für die dritte Simulation ist nun die Dämmebene im Modell zu unterdrücken und die Angaben so einzustellen, dass eine direkte Beflammung der äußeren Bekleidungsebene simuliert wird. Hier sind die Zeiten bis zum Erreichen der Temperatur  $T_3$  und  $160^\circ\text{C}$  an der Messstelle M3 zu entnehmen. Die Temperatur  $T_3$  mit  $28,13^\circ\text{C}$  ist nach  $t_{3,2} = 6,82\text{min}$  erreicht und das Isolationskriterium von  $160^\circ\text{C}$  ist nach  $t_3 = 22,84\text{min}$  erfüllt.

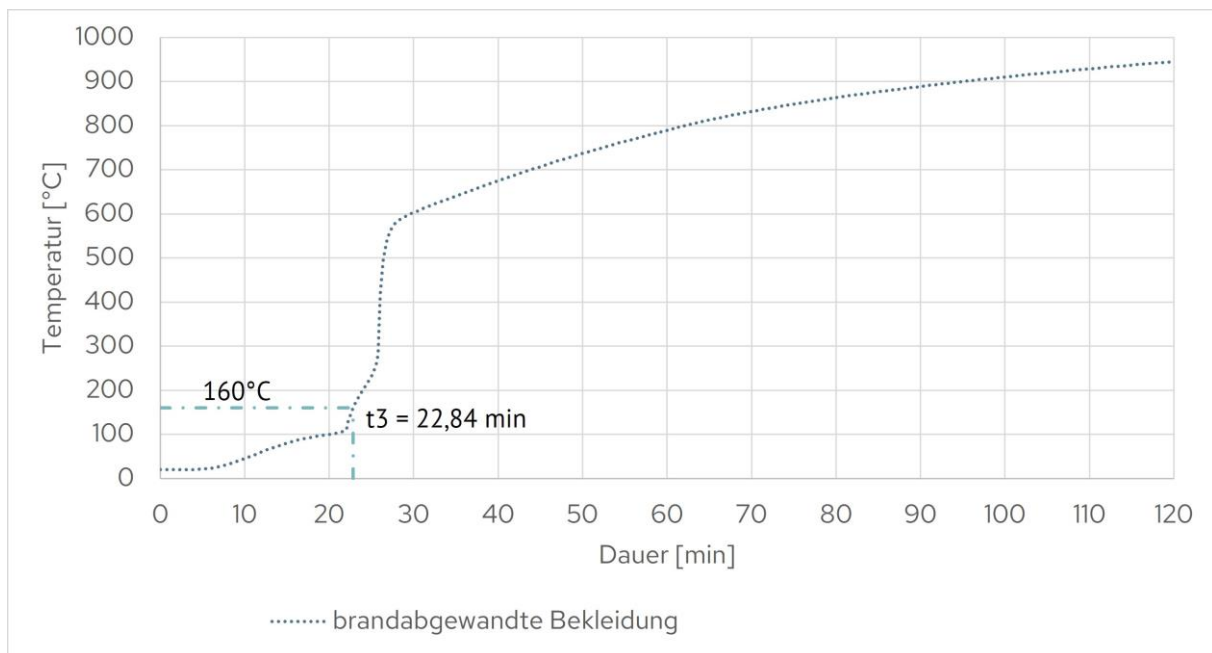


ABBILDUNG 37: GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ZEITEN AUS SIMULATION 3

Die auch aus Abbildung 37 zu entnehmenden Werte komplettieren die für eine nun folgende Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Funktion erforderlichen Zeiten unter Gleichung (13).

$$t_R = t_1 + (t_2 - t_{2,1}) + (t_3 - t_{3,2}) \text{ [min]} \quad (13)$$

$$t_R = 24,34 \text{ min} + (19,83 \text{ min} - 4,41 \text{ min}) + (22,84 \text{ min} - 6,82 \text{ min})$$

$$t_R = 55,78 \text{ min}$$

Eine Feuerwiderstandsdauer kann demnach für 55,78 Minuten angenommen werden. Das Ergebnis des Brandversuches liegt bei 58 Minuten. Damit weicht das errechnete Ergebnis aus den Simulationen um  $\sim 3,8\%$  von dem Brandversuch ab und liegt im angestrebten Genauigkeitsgrad von  $\pm 5\%$  auf der konservativen Seite. Wird die Simulation ohne eine schichtweise Bauteilsimulation einzig durch die GUI des Programms nachgebildet, ergibt sich hier eine Feuerwiderstandsdauer von 67,4 Minuten, welche eine deutliche Überschreitung der angestrebten  $\pm 5\%$  Genauigkeit aufweist.

Weitere Ergebnisse der Untersuchungen zur Genauigkeit der schichtweisen Bauteilsimulation sind in der folgenden Tabelle 19 aufgeführt. Dabei wird deutlich, dass das hier entwickelte Verfahren die Genauigkeiten im Vergleich zu einer einfachen Simulation ohne weitere Eingaben deutlich steigert.

TABELLE 19: GENAUIGKEIT SCHICHTWEISE BAUTEILSIMULATION

Aufbau	Brandversuch	Schichtweisen Bauteilsimulation	Simulation ohne weitere Eingaben
25mm OSB 80mm Glaswolldämmung 25mm OSB	$t_{ins} = 58 \text{ min}$	$t_{ins} = 55,78 \text{ min}$	$t_{ins} = 67,4$
25mm OSB 80mm Holzfaserdämmung 25mm OSB	$t_{ins} = 56 \text{ min}$	$t_{ins} = 58,08 \text{ min}$	$t_{ins} = 81,1 \text{ min}$
19mm Dreischichtholz 100mm Holzfaserdämmung 19mm Dreischichtholz	$t_{ins} = 73 \text{ min}$	$t_{ins} = 72,5 \text{ min}$	$t_{ins} = 94,1 \text{ min}$

Eine ausreichende Validierung der schrittweisen Bauteilsimulation hat noch zu erfolgen. Hierfür sind weitere, umfassende Brandversuche und deren Abgleich mit den Ergebnissen des Verfahrens erforderlich. Dabei kann auch die Anwendbarkeit auf 5- und mehrschichtige Bauteile, sowie für Feuerwiderstände >120 Minuten mit überprüft werden. Grundsätzlich sind für Nachweisführungen Ergebnisse bis zu einem Abweichungsgrad von 0% bis zu +5% anzustreben, um ein auf der konservativen Seite liegendes Bauteil zu erhalten.

### 6.3 Ermittlung von Feuerwiderstandsdauern von 90 Minuten anhand entwickeltem Simulationsverfahren

Die Ergebnisse aus den Brandversuchen von [22], welche auch in [32, 74] und [65] veröffentlicht wurden, lassen bereits eine Einschätzung zu, welche Aufbaukombinationen für eine Holztafelbauwand erforderlich wäre, um eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten zu erreichen. In diesem Abschnitt sollen drei Kombinationen aus den Versuchsreihen von [22] vorgestellt und ein optimierter Aufbau aufgezeigt werden, für den mittels der schichtweisen Bauteilsimulation eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten nachgewiesen werden kann.

Die Vorversuche und auch die Dämmstoffversuche aus [22] haben gezeigt, dass eine Hohlraumdämmung mit Steinwolle mit einer Schichtdicke von 80 mm oder 100 mm eine

Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten gewährleisten kann. Ausschlaggebend war bei beiden Versuchen die Rahmenstärke der Konstruktionshölzer, die infolge des Abbrandes an Tragfähigkeit verlieren. Dabei wurden beide Versuche mit einer Bekleidung aus einem brennbaren Material hergestellt. Bei den unter [65, 79] aufgeführten Großbrandversuchen wurde aus diesem Grund auf eine Dämmung aus Steinwolle verzichtet, da hier ebenso eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten angenommen werden könnte, bzw. die Stärke der Konstruktionshölzer die maßgebende Bauteilbemessung sein würde. Dennoch soll hier ein Aufbau gezeigt werden, der mit einer Dämmung aus Steinwolle und mit einer nichtbrennbaren Bekleidung die geforderte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht, um zu zeigen, dass ein solcher, von den geltenden Technischen Baubestimmungen [12, 15] abweichender Aufbau die erforderliche Feuerwiderstandsdauer leisten kann.

Der angenommene Aufbau besteht aus einer beidseitig vorgesehenen Bekleidung aus 19 mm starken Dreischichtholzplatten und einer Dämmung mit 100 mm Stärke aus Steinwolle. Die Dämmung soll den Hohlraum der Holztafelkonstruktion vollständig ausfüllen, woraus sich eine Stärke identisch zu der Dicke der Konstruktionshölzer von 100 mm ergibt. Bei den Modellen zur Ermittlung einer Raumabschlussfunktion von 90 Minuten wird die Standfestigkeit der Konstruktion nicht mitbeurteilt. Eine statische Bemessung von tragenden und nichttragenden Bauteilen auf deren erforderlichen Querschnitt hat immer zusätzlich zu erfolgen.

Vergleichbare Brandversuche, wie z.B. in [69] aufgeführt, mit einem Aufbau von 19mm Spanplatte, beidseitig als Trägerplatte und 100mm Steinwolle, ergaben eine Versuchsdauer von 120 Minuten, wobei der Versuch beendet wurde, als zwischen Dämmebene und brandabgewandter Bekleidung eine Temperatur von 270°C erreicht wurde. Eine Berechnung des hier vorgesehenen Aufbaus ergaben nach [1] – 51,27 Minuten, nach [24] – 104,02 Minuten und nach [29] – 89,45 Minuten. Die Streuung der Berechnungsverfahren macht deutlich, dass eine Aussage zu der tatsächlich zu erwartenden Feuerwiderstandsdauer schwierig ist.

Die Bewertung des Bauteils durch die entwickelte schichtweise Bauteilsimulation zeigen, dass eine Dauer von 120 Minuten angenommen werden kann. Hier konnte eine Feuerwiderstandsdauer von 139,9 Minuten festgestellt werden. Anhand der durchgeführten Versuche in [68, 69] kann dieses Ergebnis als realistisch angesehen werden. Voraussetzung ist hierfür neben der korrekten Bemessung der Rahmenhölzer, dass der Dämmstoff nicht vorzeitig aus der Konstruktion herausfallen kann. Dies kann z.B. durch ein Übermaß des Dämmstoffes oder durch das Vorsehen von Metalldrahtmatten sichergestellt werden. Die Ergebnisse aus den Berechnungsverfahren spiegeln ebenfalls die Erfahrungen aus den durchgeführten Versuchen [22] in Bezug auf deren Genauigkeit wieder. Die Funktionsdauer

für den Raumabschluss des betrachteten Bauteils ist auf Grundlage der durchgeführten schichtweisen Bauteilsimulation im Abgleich mit den Ergebnissen der durchgeführten Brandversuche mit 120 Minuten anzunehmen.

Ein weiteres Modul wurde mit einer Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten und einem vollständig ausgefüllten Hohlraum zwischen den Konstruktionshölzern mit Holzfaserdämmstoff untersucht. Der Aufbau, welcher bei den Brandversuchen [65, 79] getestet wurde, bestand aus einer einfachen Bekleidungsanlage mit 15 mm Gipskarton-Feuerschutzplatten und 100 mm Holzfaserdämmstoff und erreichte hiermit eine Feuerwiderstandsdauer von 73 Minuten. Der Aufbau des Probekörpers ist detailliert in Abbildung 38 zu sehen.



ABBILDUNG 38: ABBILDUNG PROBEKÖRPER GIPSKARTON-FEUERSCHUTZPLATTE UND HOLZFASERDÄMMUNG (BILDMONTAGE)

Um die Genauigkeit der schichtweisen Bauteilsimulation zu überprüfen, wurde in einem ersten Verfahren der Probekörper des Brandversuches nachsimuliert. Die Einstellungen des Simulationsprogramms wurden hierfür, wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, übernommen. Die Materialkennwerte können Anhang A entnommen werden. Hieraus ergab sich eine Feuerwiderstandsdauer von 72,5 Minuten. Damit kann die Genauigkeit als bestätigt angesehen werden.

Um für dieses Modell einen Feuerwiderstand von 90 Minuten zu erhalten, wurde die Simulation mit folgendem Aufbau erneut durchgeführt.

#### Aufbau Modul

---

2x Gipskarton-Feuerschutzplatte	2x 15 mm
Holzfaserdämmung	100 mm
2x Gipskarton-Feuerschutzplatte	2x 15mm

Dieser Aufbau, wie in Abbildung 39 dargestellt, erreicht über die drei betrachteten additiven Berechnungsverfahren eine Dauer der raumabschließenden Funktion von 88,17 Minuten nach [24] und [28], und 129,64 Minuten nach [29]. Die Berechnung nach [1] ist aufgrund der vorgesehenen Holzfaserdämmung nicht möglich, da hier keine entsprechenden Gleichungen zur Verfügung stehen.

Die schichtweise Bauteilsimulation ergab bei dem aufgeführten Aufbau eine Feuerwiderstandsdauer von 117 Minuten. Der Aufbau kann somit mit einer Feuerwiderstandsdauer über den zu erreichenden 90 Minuten angenommen werden. Die Raumabschlussfunktion nach dem in dieser Arbeit beschriebene Simulationsverfahren kann dabei als Richtwert angesehen werden.

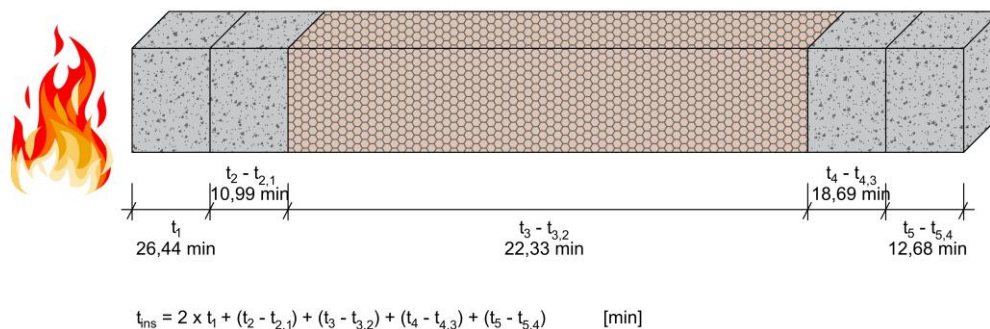


ABBILDUNG 39: SCHUTZ- BZW. ISOLATIONSZEITEN DES BAUTEILS ANHAND SCHICHTWEISER SIMULATION

Die vorangegangenen Module mit einer Steinwolldämmung und einer doppelagigen Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten haben beide das Ziel einer 90-minütigen Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen. Daher fiel die Entscheidung für das dritte Modul auf einen vollständigen Aufbau aus brennbaren Baustoffen. Für das dritte Beispiel wurde somit ein Aufbau aus einer zweifachen OSB-Bekleidung in einer Stärke von 2x15mm mit einer vollständig ausgefüllten Dämmebene aus Holzfaserdämmplatten gewählt. Im Versuch von [68, 69] wurde eine einfache Bekleidung mit einer OSB-Platte und 80mm Holzfaserdämmung

(fest) bzw. eine Bekleidung mit einer Trägerplatte mit 100mm starker Holzfaserdämmung (fest) gewählt und eine Raumabschlussfunktion von 57 Minuten bzw. 47 Minuten zzgl. der Isolationswirkung der Trägerplatte, die bei den Versuchen von [69] nicht mitberücksichtigt wurde, erreicht. Wird dieser Aufbau mit einfacher Bekleidung mit der schichtweisen Bauteilsimulation überprüft, ergibt sich hier eine Raumabschlussfunktion von 58,08 Minuten für den Versuch nach [68] mit dem Aufbau OSB und Holzfaserdämmung, sowie 60,69 Minuten für den Aufbau mit der Trägerplatte und der Holzfaserdämmung nach [69], inkl. Berücksichtigung der brandabgewandten Trägerplatte. Es kann also eine gute Übereinstimmung angenommen werden.

Die Simulation mit dem Verfahren der schichtweisen Bauteilsimulation ergab für den Aufbau mit 2 x 15mm OSB-Platten als Bekleidungsmaterial eine anzunehmende Feuerwiderstandsdauer von 66,45 Minuten. Das Ziel einer 90-minütigen Feuerwiderstandsdauer kann bei diesem Modul daher nicht nachgewiesen werden. Grund hierfür ist die schnelle Erwärmung der 2. OSB-Platten, die die Schutzzeiten deutlich minimiert. Der Aufbau kann optimiert werden, indem die äußersten Schichten mit einer 19mm starken Dreischichtholzplatte, gefolgt von einer 25mm starken OSB-Platte vorgesehen werden. Die Dämmebene mit 100mm Holzfaserdämmung (fest) bleibt bestehen. Der Aufbau wird symmetrisch vorgesehen und erreicht mit der schichtweisen Bauteilsimulation eine raumabschließende Funktion von 97,87 Minuten. Die Berechnungen geben hier Raumabschlusszeiten von 67,14 Minuten nach [24, 28] und 66,48 Minuten nach [29] an. Dies zeigt zum einen die breite Streuung in den additiven Berechnungsverfahren, zum anderen, dass durch ein Anpassen unterschiedlicher Parameter eines Aufbaus eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten für ein aus natürlichen Baustoffen bestehendes Bauteil möglich ist. Eine Übersicht zu allen in diesem Abschnitt untersuchten Aufbauten ist in Tabelle 20 aufgeführt.



TABELLE 20: ÜBERSICHT DER IN ABSCHNITT 6.3 UNTERSUCHTEN AUFBAUTEN

Aufbau	Schichtweise Bauteilsimulation	Berechnung nach		
		EN 1995-1-2: 2010	CAM	prEN 1995-1-2: 2025
19mm DSH 100mm SW 19mm DSH	$t_{ins} = 120 \text{ min}$	$t_{ins} = 51,27 \text{ min}$	$t_{ins} = 104,02 \text{ min}$	$t_{ins} = 89,45 \text{ min}$
2x15mm GKF 100mm HFD 2x15mm GKF	$t_{ins} = 117 \text{ min}$	nicht möglich	$t_{ins} = 88,17 \text{ min}$	$t_{ins} = 129,64 \text{ min}$
19mm DSH 25mm OSB 100mm HFD 25mm OSB 19mm DSH	$t_{ins} = 97 \text{ min}$	nicht möglich	$t_{ins} = 67,14 \text{ min}$	$t_{ins} = 66,48 \text{ min}$

## **7 Numerische Nachweisverfahren von Feuerwiderständen mehrschichtiger Holztafelbauteilen**

### **7.1 Möglichkeiten der Numerischen Nachweisverfahren**

#### 7.1.1 Automatisiertes numerisches Nachweisverfahren

Zusätzlich zur Eingabe des Simulationsmodells und der erforderlichen Angaben zu Materialität und Einwirkung kann durch die händische Einbindung von weiteren Befehlen in der Sprache des Simulationsprogramms der Nachweis über die Feuerwiderstandsdauer eines mehrschichtigen Holzrahmenbauteils in einem Simulationsdurchgang erbracht werden. Hierzu sind die Elemente, welche eine Grenztemperatur von 270°C überschreiten, automatisch zu entfernen (zu unterdrücken) und die Brandeinwirkung auf die nun außenliegenden, brandbeanspruchten Elemente umzulegen. Erforderlich sind hier tiefgreifendere Kenntnisse in der Programmsprache, um die Programmierungen vornehmen zu können. Eine solche Eingabe erschwert jedoch die Fehlersuche, sollten die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung nicht standhalten.

#### 7.1.2 Nachweisverfahren durch die schichtweise Bauteilsimulation

Um das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren sicher anwenden zu können, wird in Anhang C dieser Arbeit ein Leitfaden aufgeführt, wie bei einer solchen Simulation vorzugehen ist. Die Entwicklung der schichtweisen Bauteilsimulation erfolgte mit dem Simulationsprogramm *ANSYS Workbench 2022 R2*. Die Anwendung ist jedoch nicht hierauf begrenzt. Die Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer durch eine Simulation in mehreren Schritten und ohne eine zusätzliche manuelle Programmierung ermöglicht eine Übertragung des Vorgehens auch auf andere numerische Programme, die eine thermisch-transiente Simulation nach der FEM durchführen können. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit überprüft.

Die schichtweise Bauteilsimulation basiert rein auf einer Eingabe des Simulationsmodells durch die grafische Benutzeroberfläche des jeweiligen Programms. Die Nachweisführung erfolgt in mehreren Schritten. Hierzu wird in jedem Simulationsdurchgang die brandbeanspruchte Bauteilschicht entfernt und die Brandeinwirkung auf die dahinterliegende Bauteilschicht übertragen. Diese Schritte sowie die Entnahmen der Schutzzeit bis zum Erreichen von 270°C auf der brandabgewandten Seite der betrachteten Schicht sind manuell durchzuführen. Die Schutzzeiten der Schichten sowie die Isolationszeit der äußersten,

brandabgewandten Schicht sind zu addieren, um die anzunehmende Feuerwiderstandsdauer des Bauteils zu erhalten.

### 7.1.3 Automatisierte schichtweise Bauteilsimulation

Im Rahmen der Bearbeitung dieser Arbeit wurde die bereits genannt Excel-Datei so optimiert, dass in dieser das zur Simulation verwendete Programm *ANSYS Workbench 2022 R2* gestartet werden kann. Nachdem in ANSYS das entsprechende Modell eingegeben und die Simulation durchgeführt wurde, können die Ergebnisse in die Exceltabelle übertragen und durch einen weiteren Befehlsbutton die Berechnung ausgeführt werden. Dadurch können weitere Schritte automatisch durchgeführt werden. Einen Überblick über die erstellte Excel-Datei zeigt Anhang D dieser Arbeit.

## 7.2 Vor- und Nachteile der schichtweisen Bauteilsimulation

Wie bei jedem Verfahren zeigen sich auch bei der Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation potenzielle Fehlerquellen und Anwendungsgrenzen. Es ist aber auch deutlich zu machen, wo die Stärken des Verfahrens liegen. So kann durch die schrittweise Ausgabe der Funktionszeiten nach jeder Simulation für die betrachtete Schicht schon bei der Auswertung die mögliche Feuerwiderstandsdauer des Bauteils abgeschätzt werden. Somit kann ggf. schon vor Beendigung der Simulation aller Bauteilschichten eine Änderung im Aufbau und eine neue Nachweisführung gestartet werden. Dabei sind die Erfahrungen, die man im Laufe der Zeit bei der Benutzung der Nachweismethode erhält, durchaus von Vorteil. Da hier die Schutzzeiten der einzelnen Schichten aufgezeigt werden, können dann auch leichter grobe Abschätzungen zu anderen Aufbauten gegeben werden.

Zudem bietet die schichtweise Bauteilsimulation den Vorteil, dass Fehler bei der Eingabe meist schon nach wenigen Schritten erkennbar werden, da für jede Schicht die entsprechenden Zeiten und Temperaturen betrachtet werden müssen und nicht, wie bei der Simulation mit einer zusätzlichen Programmierung, ein Endergebnis dazu verleitet, die Zwischenschritte außer Acht zu lassen.

Dadurch, dass keine zusätzlichen Programmierungen zur Simulation des Materialversagens erforderlich werden, kann sich der Anwenderrahmen deutlich ausbreiten. Es werden keine speziellen Kenntnisse in der Programmiersprache des Simulationsprogramms benötigt. Gleichermaßen werden Fehlerquellen, die durch eine zusätzliche Programmierung entstehen können, ausgeschlossen. Ein sicherer Umgang mit dem Programm für thermisch-transiente Simulationen ist dennoch erforderlich. Es bietet sich vor allem für die Verwendung in der Praxis ein breiter Markt. Aber auch in Forschungseinrichtungen ist die Bedienung und somit

die Nachweisführung deutlich vereinfacht, was eine kurze Einarbeitungszeit und eine leichte Nachvollziehbarkeit bewirkt. Nachweise können auch durch Dritte deutlich besser kontrolliert oder dem Projektstand angepasst werden, auch wenn die ursprünglich zuständigen Personen nicht mehr am Projekt beteiligt sind.

Ein besonderes Augenmerk ist allerdings auf die Entnahme der entsprechenden Zeiten und Temperaturen zu legen. Da diese manuell aus den Ergebnissen der einzelnen Simulationsreihen entnommen werden müssen und ggf. händisch zu interpolieren und in die Gleichung einzusetzen sind, besteht hier ein höheres Fehlerpotenzial. Aus diesem Grund sind diese Schritte besonders aufmerksam durchzuführen, um keine falschen Werte zu verwenden. Es ist vor allem zur Reduzierung dieser Fehler ratsam, ein Tabellen-Kalkulationsprogramm zu verwenden, bei dem alle Zeiten und Temperaturen der Zwischenergebnisse eingefügt und abgespeichert werden. So können die Temperaturverläufe der einzelnen Schichten auch zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden, ohne die Simulation erneut starten zu müssen.

In diesem Zuge muss auch erwähnt werden, dass die Messpunkte genau zwischen den Bauteilschichten positioniert werden müssen, da es ansonsten zu fehlerhaften Schutzzeiten in den Bauteilschichten kommen kann.

Ebenso ist, auch bei der vermeidlich einfachen Methode, äußerst sorgsam zu arbeiten, um die korrekten Simulationseinstellungen vorzusehen und die erforderlichen Daten den zugehörigen Messpunkten zu entnehmen. Ein nicht deaktiviertes Bauteil führt zu erheblich abweichenden Simulationsergebnissen, was sich wiederum in der deutlich abweichenden Feuerwiderstandsdauer des Bauteils widerspiegeln kann. Daher sind die Bezugspunkte für die Messstellen, die aktivierten und deaktivierten Bauteile und auch die entnommenen Messdaten der betrachteten Schicht gründlich zu prüfen, bevor mit dem nächsten Schritt weiter gemacht werden kann.

Durch die Simulation in mehreren Schritten und das manuelle Herausschreiben der Daten ist ein Mehraufwand bei der Entnahme der Schutz- und der Isolationszeit zu erwarten. Zusätzlich benötigt auch die Berechnung der raumabschließenden Funktion Zeit, was bei einer Simulation mit automatischem Versagen der Bauteilschichten nicht erforderlich ist. Je mehr Schichten das zu bewertende Bauteil aufweist, desto mehr Aufwand erfordert die schichtweise Bauteilsimulation. Hier ist, je nach Kenntnisstand des Anwenders, eine Einbindung einer zusätzlichen Programmierung weniger aufwändig und der schichtweisen Bauteilsimulation vorzuziehen.

Das Abwägen, welches Verfahren für den Anwender geeignet ist, ist stark abhängig von den Simulationskenntnissen, die diese Person bereits aufweist, und ist daher immer individuell.

Es bieten sich sowohl für als auch gegen die Anwendung des hier beschriebenen Verfahrens Gründe, die auf jeden Fall bei einer Entscheidungsfindung zu berücksichtigen sind.

### **7.3 Anwendbarkeit und Anwendungsgrenzen des erarbeiteten Verfahrens**

Die Anwendungsmöglichkeiten des in dieser Arbeit beschriebenen Nachweisverfahrens über die schichtweise Bauteilsimulation sind sehr umfangreich. Jedoch müssen auch deutliche Grenzen abgesteckt werden, für welche Situationen dieses nicht geeignet ist. Dies ist für jede Nachweismethode erforderlich und hängt bei diesem Verfahren auch sehr stark von den Fähigkeiten des Anwenders im Umgang mit dem verwendeten Simulationsprogramm ab. Grundsätzlich müssen ausreichende Kenntnisse bei der Verwendung eines FEM-basierten Simulationsprogramms und bei der Durchführung thermisch-transienter Simulationen vorhanden sein, um eine sichere Anwendung des Verfahrens der schichtweisen Bauteilsimulation zu gewährleisten.

Das Nachweisverfahren bietet sich vor allem für Bauteile mit einer Anzahl von drei bis fünf Bauteilschichten an. Eine Verwendung bei mehr als fünf Schichten kann ohne Einschränkungen angenommen werden, jedoch ist hierbei mit einem hohen Aufwand bei den Simulationsdurchläufen und der Entnahme der benötigten Zeiten und Temperaturen zu rechnen. Die Genauigkeit des Verfahrens bei Verwendung von Aufbauten mit mehr als drei Schichten ist jedoch in weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Für Anwender, die eine regelmäßige Nutzung anstreben, erleichtert die Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen mit einer automatisierten Ermittlung der Daten die Bedienung. Eine solche Datei wurde im Rahmen der Bearbeitung erstellt und auf eine Anwendung von drei Bauteilschichten ausgelegt. Eine Erweiterung der Datei ist möglich. Jedoch kann es hier aus Zeitgründen sinnvoll sein, sich die Programmiersprache des Simulationsprogramms anzueignen und diese für Simulationen mit vielen Bauteilschichten anzuwenden.

Es kann eine Anwendung bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von bis zu 120 Minuten erfolgen. In den meisten Fällen einer erforderlichen Nachweisführung ist diese Zeitspanne ausreichend. Sollten dennoch Nachweise für eine höhere Feuerwiderstandsdauer erforderlich sein, sollte von der Verwendung dieser Methode abgesehen werden. Ebenso ist die Verwendung für Materialien, für die die erforderlichen Materialkennwerte zu Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Rohdichte vorliegen und die die Gesetze zur Wärmeleitung befolgen, möglich. Da hierzu keine weiteren Daten für eine Validierung vorliegen, sind die Ergebnisse äußerst sorgsam auf Plausibilität zu prüfen. Zur Integration einer ungedämmten Hohlraumschicht muss beachtet werden, dass die

Wärmeübertragung über die Luft zusätzliche Eingaben erfordert. Werden diese nicht berücksichtigt, verläuft die Berechnung fehlerhaft.

Mit der schichtweisen Bauteilsimulation wird rein die Feuerwiderstandsdauer für den Raumabschluss eines Holztafelbauteils im Bereich der Gefache beurteilt werden. Die Berechnung im Bereich der Konstruktionshölzer ist denkbar, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht behandelt. Nicht berücksichtigt wird die erforderliche Dimensionierung der Bauteile aus statischen Gründen, auch im Falle der Brandbeanspruchung. Dies gilt sowohl für tragende als auch für nichttragende Bauteile. Hier wird zwingend empfohlen, zuerst eine Ermittlung des benötigten Querschnitts der Konstruktionshölzer durchzuführen, um die Standfestigkeit für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer sicherzustellen. Mit diesen Angaben kann anschließend das Modell zur Simulation der Feuerwiderstandsdauer des Raumabschlusses erstellt und die Nachweisführung dieser Anforderung durchgeführt werden.

Die Genauigkeit bei der Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer ist sehr stark abhängig von der Qualität der bekannten bzw. verwendeten Materialparameter. Diese sind für die Wärmeübertragung zwischen den Bauteilschichten und der Wärmeleitung innerhalb einer Materialschicht ausschlaggebend. Daher ist es ratsam, vor allem neue, wenig erforschte Materialien genau auf deren Verhalten im Brandfall zu untersuchen und die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte temperaturabhängig für eine Brandbeanspruchung zu ermitteln.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Fazit

Eine Nachweisführung über brandschutztechnische Qualifikationen eines Bauteils kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. So stehen neben der rechnerischen Kalkulation auch Prüfungen mittels Brandversuche und numerische Simulationen zur Auswahl. Dies gilt für massiv errichtete Bauteile aus z.B. Mauerwerk ebenso wie auch für Holzbauteile. Für den Holzbau werden Forderungen zur Konstruktion von Bauteilen mit einem geforderten Feuerwiderstand auch in den Technischen Baubestimmungen [12, 14] aufgeführt. Rechnerische Nachweismethoden werden in der Norm DIN EN 1995-1-2:2010 [1] beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch erhebliche Abweichungen der Ergebnisse aus dem normativ beschriebenen additiven Berechnungsverfahren und erreichten Feuerwiderständen der durchgeführten Brandversuche. Auch die durchgeführten Simulationen mit Hilfe der GUI des Simulationsprogramms unter Berücksichtigung der erforderlichen Materialkennwerte aus der Norm [1] konnten den gesetzten Anspruch an die Genauigkeit nicht aufzeigen. Als Hauptursache wurde für die Abweichungen im numerischen Nachweisverfahren das fehlende oder nur über die Programmsprache einzugebende Versagen der Bauteilschichten bei einer Temperatur von 270°C auf der feuerabgewandten Seite festgestellt. Die Eingabe dieses Versagens hat durch dessen Berücksichtigung in den Materialparametern zu erfolgen. Diese Arbeit betrachtet die Übertragung der Brandeinwirkungen zwischen den einzelnen Schichten und die daraus resultierenden Schutzwirkungen vor Brand und auch Pyrolyse vorheriger Bauteilschichten. Die Zusammenhänge wurden mit Simulationen untersucht und nachgestellt. Es konnte festgestellt werden, dass das Versagen der brandbeanspruchten Bauteilschichten unzureichend bei den Materialparametern für Simulationen über die GUI Berücksichtigung findet. Daher wurde ein Verfahren entwickelt, bei welchem manuell die betrachteten Bauteilschichten entfernt und die Temperaturbeanspruchung auf die dahinterliegende Schicht übertragen und somit die Genauigkeit des Nachweisverfahrens erhöht wurde.

Die Methode der schichtweisen Bauteilsimulation ermöglicht eine Nachweisführung zur Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Funktion eines Holztafelbauteils auch ohne die Eingabe einer zusätzlichen Programmierung in der Programmsprache des Simulationsprogramms. Durch die Entwicklung und Validierung des Verfahrens anhand durchgeführter Brandversuche wurde gezeigt, dass mit dieser Modellbetrachtung die brandschutztechnischen Prozesse gut beschrieben werden können. Das Verfahren ist für Anwendungen von Holztafelbauteile bis zu drei Schichten validiert, wobei die Eignung für

Aufbauten bis zu einer Anzahl von fünf Schichten angenommen werden kann. Eine Verwendung zur Nachweisführung von mehr als fünfschichtigen Bauteilen ist nicht ausgeschlossen, wird allerdings aufgrund der erhöhten Zeitbeanspruchung durch wiederholte Simulationsdurchgänge nicht empfohlen und ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht experimentell bestätigt worden.

Das Verfahren eignet sich nicht nur für die Anwendung in der Praxis. Auch Forschungseinrichtungen können hiervon profitieren. Durch die gute Nachvollziehbarkeit des Modellaufbaus und die Möglichkeit, die Zwischenergebnisse nach jedem Simulationsschritt zu speichern, können die Bemessungen auch zu einem späteren Zeitpunkt in jeder Phase nachvollzogen werden. Auch bei einem Wechsel des Bearbeiters kann das Programm mit einfachen Kenntnissen in der Funktion bedient werden, ohne zusätzliche Weiterbildungen zu benötigen oder Abstriche in der Bedienung des erstellten Modells zur Nachweisführung zu befürchten.

Die Untersuchungen haben in vielen Versuchen gezeigt, dass die vorgestellte Methode der schichtweisen Bauteilsimulation deutlich genauere Ergebnisse bei der Nachweisführung zur raumabschließenden Funktion aufzeigen als bei dem bisherigen Stand der additiven Berechnungsverfahren gezeigt werden konnte. Somit stellt die Methode eine sichere Variante dar, den Feuerwiderstand von raumabschließenden Holztafelbauteilen bis zu einer Dauer von 120 Minuten nachzuweisen. Die Erweiterung um zusätzliche Materialien ist ohne Probleme möglich, wenn hier die erforderlichen Kennwerte zu Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Rohdichte für eine Brandbeanspruchung vorliegen. Damit bietet diese Methode eine gute Alternative bei der Bemessung raumabschließender Holztafelbauteile mit einem geforderten Feuerwiderstand von min. 90 Minuten zur Anwendung bei Gebäuden der Gebäudeklasse 5.

Das Verfahren einer Feuerwiderstandsbemessung mit schichtweiser Bauteilsimulation für den Nachweis einer raumabschließenden Funktion von Holztafelbauteilen hat sich in dieser Arbeit als eine sehr genaue Methode herausgestellt. Die Abweichungen zu den untersuchten Brandversuchen sind deutlich kleiner als dies bei den betrachteten additiven Bemessungsverfahren der Fall war. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Brände nie gleichermaßen verlaufen. Hier sind demnach immer Schwankungen in Temperatur und Zeitspanne zu erwarten. Die für die Bemessung von Bauteilen üblicherweise verwendete ETK spiegelt ein „worst-credible“-Szenario bei der Brandeinwirkung auf die Bauteile wider. Reale Brände (Naturbrandkurven) verlaufen dagegen unterschiedlich, was zu einer Streuung der Brandverläufe in der Realität führt. Die Ergebnisse der Nachweismethoden sollen auf der sicheren Seite liegen, um die Bauwerkssicherheit nach §3 MBO [7] gewährleisten zu können.



Um die Zusammenhänge der Brandeinwirkung und der Feuerwiderstandsdauer eines mehrschichtigen Holzrahmenbauteils untersuchen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit 28 Brandversuche durchgeführt. Darunter sechs Dämmstoff- und 15 Bekleidungsversuche zur Bestimmung der anzunehmenden Schutz- und Isolationszeiten, sowie zwei Großbrandversuche zur Untersuchung von Bauteilen in einem realen Maßstab. Die Genauigkeit der Ergebnisse aus Berechnungsverfahren wie auch der Simulationsverfahren der betrachteten Materialien mit deren Materialkennwerte aus [1, 24, 29] wurde mit den Schutz- und Isolationszeiten aus den Brandversuchen abgeglichen und bildete die Basis für das hier entwickelte Verfahren der schichtweisen Bauteilsimulation.

## 8.2 Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten deutliche Abweichungen zwischen den Brandversuchen und den Simulationsverfahren. Um numerische Nachweisverfahren weiterhin zu verbessern sind die Materialparameter der betrachteten Baustoffe ein entscheidendes Kriterium. Entsprechen diese in Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Rohdichte nicht den tatsächlichen Werten der Baustoffe, können hierdurch die Ergebnisse der Nachweisverfahren verfälscht werden. Daher sind Untersuchungen erforderlich, bei denen eine materialspezifische Anpassung vor allem von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität an den tatsächlich im Brandversuch verwendeten Baustoff erfolgt.

Damit der Akzeptanzbereich von  $\pm 5\%$  Abweichung auch im unsicheren Bereich für ein numerisches Nachweisverfahren wie das in dieser Arbeit beschriebene der schichtweisen Bauteilsimulation angenommen werden kann, sind weitere experimentellen Untersuchungen erforderlich, die die genauen Streuungen von Brandversuchen mit Probekörpern gleichen Aufbaus betrachten. Die aktuellen Daten aus der Literatur sind hierfür vor allem für Holzbaustoffe nicht ausreichend erforscht.

Um die Anwendbarkeit des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens weiter auszuweiten, sind vor allem weitere Untersuchungen im Bereich der mehrschichtigen Aufbauten erforderlich. Das bisherige Verfahren ist auf die Nachweisführung von 3-schichtigen Aufbauten bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten validiert. Um dieses auch für mehrere Schichten und unter einer längeren Beanspruchung sicher anwenden zu können sind experimentelle Versuche erforderlich, die mit den materialspezifischen Kennwerten numerisch nachgestellt werden können.



## Literatur

- [1] *DIN EN 1995-1-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2010.
- [2] N. Werther, "Technische Regeln zur Brandschutzbemessung im Holzbau - was bringen DIN 4102-4 und Eurocode 5 in Zukunft," in *Tagungsband FeuerTrutz Brandschutzkongress 2023*, Rudolf Müller Medien Gruppe, Hg., 1. Aufl. Köln: RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, 2023, S. 69–83.
- [3] *DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung*, 18009-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 2016.
- [4] Jochen Zehfuß, Hg., "Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes: vfdb TB 04-01," TWB der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Münster, Mrz. 2020. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.vfdb.de/media/doc/technischeberichte/TB\\_04\\_01\\_Leitfaden\\_IngMethoden\\_4Auflage\\_2020-03-26.pdf](https://www.vfdb.de/media/doc/technischeberichte/TB_04_01_Leitfaden_IngMethoden_4Auflage_2020-03-26.pdf)
- [5] S. Graf Bernstorff *et al.*, "50 Jahre ARGEBAU: Vom Wiederaufbau zur Stadtentwicklung," Bremen, Ein Teil Deutscher Geschichte - ein Stück Förderalismus, Dez. 1998. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiw5sGU48WDAxVg-gIHHUgZB78QFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bauministerkonferenz.de%2Fdokumente%2Ffestschrift.pdf&usg=AOvVaw1NnaZkvlp5tHxdqqi2ZDMk&opi=89978449>
- [6] "Bauministerkonferenz (IS-Argbau): Struktur und Aufgaben." Zugriff am: 24. Januar 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.bauministerkonferenz.de/verzeichnis.aspx?id=762&o=7590762>
- [7] Bauministerkonferenz (IS-ARGEBAU), *Musterbauordnung: MBO mit letzter Änderung vom 22./23.09.2022*. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/42324124-10.PDF>
- [8] *DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 1998.

## Literatur

- [9] *DIN 4102-2 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 2: Bauteile: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 1977.
- [10] *DIN EN 13501-1 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2019.
- [11] *DIN EN 13501-2 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2016.
- [12] Deutsches Institut für Bautechnik, *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen: MVVTB*, 2023. Zugriff am: 5. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/42324130.PDF>
- [13] U. Bayreuth. "Brandschutz geht uns alle an!" Zugriff am: 31. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.sicherheitswesen.uni-bayreuth.de/de/brandschutz/index.html>
- [14] Bauministerkonferenz (IS-ARGEBAU), *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise: MHolzBauRL*, 2021. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/42323504.PDF>
- [15] Bauministerkonferenz (IS-ARGEBAU), *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise: M-HFHolzR*, 2004. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/4234256.PDF>
- [16] S. Scheidel, S. Dienst und O. Kornadt, "Anwendungsmöglichkeiten der neuen „Muster-Holzbaurichtlinie“ für Holzrahmenbauteile," *Bauphysik*, Jg. 44, Nr. 1, S. 40–45, 2022, doi: 10.1002/bapi.202100042,
- [17] *DIN EN 13381-2 Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen Teil 2: Vertikal angeordnete Brandschutzbekleidungen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2014.
- [18] *DIN EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2020.

## Literatur

- [19] M. Tiso, "The Contribution of Cavity Insulations to the Load-Bearing Capacity of Timber Frame Assemblies Exposed to Fire," Dissertation, School of Engineering, Tallinn University of Technology, Estonia, Tallinn, 2018.
- [20] M. Rauch, "Beurteilung der raumabschließenden Funktion brandbeanspruchter Holzbauteile mittels einer "Component Additive Method", " Dissertation, TUM School of Engineering and Design, Technische Universität München, München, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1637514/1637514.pdf>
- [21] T. Engel *et al.*, "Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls - Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus: Verbundvorhaben (FSP-Brandschutz): Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen in Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus," 2022, doi: 10.14459/2022MD1661419,
- [22] S. Scheidel, S. Dienst, T. Götz und O. Kornadt, "Entwicklung einer nachweislich brandsicheren und ökologischen Auslegungssystematik für vielgeschossige Holzbauten," Schlussbericht, Nov. 2022.
- [23] *DIN EN 520 Gipsplatten: Begriffe, Anfordeurngen und Prüfverfahren*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2009.
- [24] V. Schleifer, "Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall," Dissertation, ETH Zurich, Zürich, Schweiz, 2009, doi: 10.3929/ethz-a-005771863,
- [25] L. Meyer, E. Schwabach und A. Lindorf, "Verbesserung der Eurocodes durch pränormative Forschung: 2. Phase: Entwurfsphase zur Qualitätsicherung und -kontrolle der Eurocode-Entwürfe," Stuttgart, Rep. F3070, 2018.
- [26] J. Niedermeyer *et al.*, *Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen durch pränormative Arbeit - Teilantrag 4: Holzbau: Abschlussbericht* (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3065). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-7388-0190-3, 2018.
- [27] K. N. Mäger, "Implementation of new materials to the component additive method for fire design of timber structures," Dissertation, Institut für Gebäudeplanung, Technische Universität Tallinn, Tallinn, 2016.

## Literatur

- [28] V. Hofmann, E. Kammerer, M. Rauch, N. Werther und S. Winter, "Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen," Technische Universität München, München, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, 2018.
- [29] *prEN 1995-1-2:2025 (E) - Eurocode 5 - Design of timber structures, Part 1-2: Structural fire design: SC5.T4 Final Draft, September 5, 2021 for Informal Enquiry*, EN 1995-1-2:2025, CEN TC250 SC5 WG4, Sep. 2021.
- [30] J. Norén, "Addition Method: Calculation of fire resistance for separating wood frame walls," Trätekt Institutet för träteknisk Forskning, Juni 1994, Rapport.
- [31] S. Scheidel, S. Dienst, T. Götz und O. Kornadt, "Berechnungsverfahren von Holzrahmenbauteilen mit brandschutztechnischer raumabschließender Funktion," in *Holzbau* (Bauphysik-Kalender 22. Jg. 2022), N. A. Fouad, Hg., Berlin: Ernst & Sohn, 2022, S. 465–496.
- [32] S. Scheidel, S. Dienst, T. Götz und O. Kornadt, "Brandschutztechnisches Verhalten von raumabschließenden Holzrahmenkonstruktionen," *Bauphysik* 43, Nr. 4, S. 211–221, 2021, doi: 10.1002/bapi.202100016,
- [33] K. N. Mäger *et al.*, "Procedure for implementing new materials to the component additive method," *Fire Safety Journal*, Jg. 107, S. 149–160, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.09.006,
- [34] P. Niemz und W. U. Sonderegger, *Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte*, 2. Aufl. Carl Hanser Verlag GmbH&Co.LG, ISBN: 978-3-446-46749-1, 2021.
- [35] Autor unbekannt, "Waldfläche und Waldzustand weltweit," *Statista*, 08. November 2021. Zugriff am: 7. Februar 2023. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/themen/7066/waelder/#topicOverview>
- [36] K. Lißner und W. Rug, *Holzbausanierung beim Bauen im Bestand*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-662-50376-8, 2018.
- [37] D. Alfter, M. Knauf, J. Lüdtker und C. Maack, "Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen.: Charta für Holz 2.0," Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn, Apr. 2018. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ChartafuerHolz20.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ChartafuerHolz20.pdf?__blob=publicationFile&v=7)

## Literatur

- [38] Holzbau-Offensive Baden-Württemberg, Hg., "Holzbau - Offensive Baden-Württemberg: Nachhaltiges Bauen für die Zukunft," 2018. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mlr/intern/dateien/PDFs/Wald/Strategie\\_Holzbau-Offensive\\_BW\\_final-v.pdf](https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mlr/intern/dateien/PDFs/Wald/Strategie_Holzbau-Offensive_BW_final-v.pdf)
- [39] H. Kaufmann, S. Krötsch und S. Winter, "Atlas Mehrgeschossiger Holzbau," München, Edition Detail, 2017.
- [40] J. F. Field, *London, Londoners and the Great Fire of 1666: Disaster and Recovery*. Milton, Oxfordshire: Routledge, ISBN: 978-1-138-20714-1, 2017.
- [41] Geschichtsbuch Hamburg. "1842 Hamburg brennt! - Geschichtsbuch Hamburg." Zugriff am: 7. Februar 2023. [Online.] Verfügbar: <https://geschichtsbuch.hamburg.de/epochen/restauration-revolution-reform/1842-hamburg-brennt/>
- [42] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. "Klimaabkommen von Paris." Zugriff am: 31. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>
- [43] G. Estermann, "Effizientes Bauen und flexible Gebäudekonzepte," in *OPTIMIERUNGSSTRATEGIEN IM NUTZUNGSZYKLUS VON IMMOBILIEN: Handlungsempfehlungen*, M. King und M. Trübestein, Hg., [Place of publication not identified]: GABLER, 2018, S. 107–117. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23757-85>
- [44] Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, Hg. *DW Die Wohnungswirtschaft: Sonderheft Ergänzendes Bauen im Bestand (Nachverdichtung)*. Hamburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, 2015.
- [45] Fraunhofer-Institut für Holzforschung br/Wilhelm-Klauditz-Institut WKI. "Presseinfo 2019/10: Fraunhofer WKI simuliert Holzbau im Klimawandel: Holzbauten halten der Erderwärmung stand - Fraunhofer WKI." Zugriff am: 14. April 2023. [Online.] Verfügbar: [https://www.wki.fraunhofer.de/de/presse-medien/2019/PI\\_2019-10\\_Fraunhofer-WKI-simuliert-Holzbau-im-Klimawandel.html](https://www.wki.fraunhofer.de/de/presse-medien/2019/PI_2019-10_Fraunhofer-WKI-simuliert-Holzbau-im-Klimawandel.html)
- [46] ZDF Heute, "Studie: 2023 fehlen 700.000 Wohnungen: Sozialer Wohnungsbau," *Wirtschaft*, 12. Januar 2023. Zugriff am: 14. April 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/wohnungsmarkt-mieterbund-100.html>

## Literatur

- [47] A. Lingens, "Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbauten," Dissertation, Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, Technische Universität München, München, 2003.
- [48] K. L. Friquin, "Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber," *Fire Mater.*, Jg. 35, Nr. 5, S. 303–327, 2011, doi: 10.1002/fam.1055,
- [49] N. Werther, "Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren," Dissertation, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, München, 2016.
- [50] T. Scherer, *Untersuchungen zu Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile im Brandfall: Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen*. Technische Universität Kaiserslautern, ISBN: 978-3-95974-148-4, 2021.
- [51] A. Pfeiffer, *Löschmittel in der Brandbekämpfung*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-12971-2, 2016. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: file://C:/Users/Admin/Downloads/978-3-658-12971-2-1.pdf
- [52] P. Häupl *et al.*, *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-16073-9, 2017.
- [53] "Rauchmelderpflicht in Deutschland › Rauchmelderpflicht.net." Zugriff am: 14. April 2023. [Online.] Verfügbar: <https://rauchmelderpflicht.net/rauchmelderpflicht-deutschland/>
- [54] D. Carter. "Rauchgasvergiftung - Verletzungen und Vergiftung - MSD Manual Ausgabe für Patienten." Zugriff am: 12. Juli 2023.
- [55] *DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2010.
- [56] A. Frangi, *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken* (Zugl.: Zürich, Univ., Diss) (IBK-Bericht Nr. 269). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, ISBN: 3764366818, 2001.
- [57] A. Frangi und M. Fontana, "Zum Brandverhalten von Holzdecken aus Hohlkastenelementen," Zürich, Schweiz, 1999, doi: 10.3929/ethz-a-004179577,



## Literatur

- [58] FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. "Aufbau des Holzes." Zugriff am: 15. Februar 2023. [Online.] Verfügbar: <https://holz.fnr.de/was-ist-holz/holz-als-rohstoff/aufbau-des-holzes>
- [59] M. Lache, "Untersuchung zur Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz und zur Feuerwiderstandsdauer biegebeanspruchter Brettschichtholzträger," Dissertation, Institut für Holzforschung, Ludwigs-Maximilians-Universität München, München, 1992.
- [60] E. Mikkola, "Charring of Wood," Research Reports, Espoo, Finland, Rep. ISBN 951-38-3711-4, 1990.
- [61] M. Tuve und T. Koch, "Brände in Holzbauten: Aus der Sicht des Brandursachenermittlers," Rep. 3/98, 1998. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1998/sp\\_1998\\_3\\_2.pdf](https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1998/sp_1998_3_2.pdf)
- [62] P.-M. Weinspach, J. Gundlach, H.-G. Klingelhöfer, K. Nitschke, R. Ries und U. Schneider, "Analyse des Brandes am 11. April 1996: Empfehlungen und Konsequenzen für den Rhein-Ruhr-Flughafen Düsseldorf," Düsseldorf, Bericht Teil 1, Apr. 1997.
- [63] *DIN 4102-8 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 8: Kleinprüfstand*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Okt. 2003.
- [64] Kronospan CR spol. s.r.o., Hg., "Spanplatte P3,"
- [65] S. Scheidel, S. Dienst, T. Götz und O. Kornadt, "Bauteiluntersuchung von Holzrahmenwänden mit Verwendung brennbarer Dämmstoffe," Rep. 3.2023 // 3, Jun. 2023, doi: 10.1002/bapi.202300004,
- [66] URSA Deutschland GmbH, Hg., "Ursa Geo Spanfilz SF 32/ SF 35: unkaschierter Wärmedämmfilz aus Mineralwolle mit oberseitiger Strichmarkierung," Technisches Datenblatt und Sicherheitsdatenblatt, Feb. 2023. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ursa.de/produkt/geo-sf-35/>
- [67] Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Hg., "Dachdämmplatte Masterrock 035: Technisches Datenblatt," Jan. 2019. Zugriff am: 24. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rockwool.com/de/produkte/produktuebersicht/masterrock-035/>

## Literatur

- [68] S. Scheidel und O. Kornadt, "Versuchsbericht 1 - Vorversuche: Entwicklung einer nachweislich brandsicheren und ökologischen Auslegungssystematik für vielgeschossige Holzbauten," Mrz. 2021.
- [69] S. Scheidel und O. Kornadt, "Versuchsbericht 3 - Dämmstoffversuche: Entwicklung einer nachweislich brandsicheren und ökologischen Auslegungssystematik für vielgeschossige Holzbauten," Nov. 2022.
- [70] Knauf Insulation GmbH, Hg., "Knauf Insulation Trennwand-Dämmplatte TP 115," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.knaufinsulation.de/produkte/knauf-insulation-trennwand-daemmplatte-tp-115>
- [71] Steico SE, Hg., "Steico flex 038," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.steico.com/fileadmin/user\\_upload/importer/downloads/produktinformationen\\_holzfaser-dmmstoffe/STEICOflex\\_038\\_de\\_i.pdf.pdf?\\_gl=1\\*1m2q577\\*\\_up\\*MQ.&gclid=EAIaIQobChMIzsS9nobGgwMVUJJoCR2UuQqgEAAYAAAEgL8mPD\\_BwE](https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/produktinformationen_holzfaser-dmmstoffe/STEICOflex_038_de_i.pdf.pdf?_gl=1*1m2q577*_up*MQ.&gclid=EAIaIQobChMIzsS9nobGgwMVUJJoCR2UuQqgEAAYAAAEgL8mPD_BwE)
- [72] Steico SE, Hg., "STEICOzell Holzfaser-Einblasdämmstoff," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.steico.com/fileadmin/user\\_upload/importer/downloads/4028b6097384810e017496c6dcf14d6f/STEICO\\_Produnktblatt\\_Einblasdaemmung\\_de\\_i.pdf](https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b6097384810e017496c6dcf14d6f/STEICO_Produnktblatt_Einblasdaemmung_de_i.pdf)
- [73] ISOLENA Naturfaservliese GmbH, Hg., "ISOLENA Schafswolle," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.naturanum.de/media/pdf/5b/9e/81/IW-Brosch-ure-DE\\_V1\\_Ansicht\\_Einzel\\_300dpi\\_2021.pdf](https://www.naturanum.de/media/pdf/5b/9e/81/IW-Brosch-ure-DE_V1_Ansicht_Einzel_300dpi_2021.pdf)
- [74] S. Scheidel, T. Götz, S. Dienst und O. Kornadt, "Untersuchung zur Genauigkeit additiver Berechnungsverfahren für raumabschließende Holzrahmenbauteile," in *Bauphysiktage Kaiserslautern 2022*, Kaiserslautern, O. Kornadt, S. Carrigan, M. Hofmann und C. Völker, Hg., 2022.
- [75] Knauf Bauprodukte GmbH & Co.KG, Hg., "Miniboard GKB 12,5mm," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.knauf.de/diy/produkte/miniboard-gkb.html#showtab-tab\\_9471\\_4](https://www.knauf.de/diy/produkte/miniboard-gkb.html#showtab-tab_9471_4)
- [76] Knauf Gips AG, Hg., "Feuerschutzplatte Knauf Piano GKF," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.knauf.de/profi/sortiment/produkte/feuerschutzplatte-knauf-piano-gkf.html#showtab-tab\\_5801\\_4](https://www.knauf.de/profi/sortiment/produkte/feuerschutzplatte-knauf-piano-gkf.html#showtab-tab_5801_4)

## Literatur

- [77] James Hardie Europe GmbH, Hg., "fermacell Gipsfaser-Platte," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/Admin/Downloads/0050-fermacell-Gipsfaser-Platten.PDF
- [78] S. Scheidel und O. Kornadt, "Versuchsbericht 2 - Bekleidungsversuche: Entwicklung einer nachweislich brandsicheren und ökologischen Auslegungssystematik für vielgeschossige Holzbauten," Jul. 2021.
- [79] S. Scheidel und O. Kornadt, "Versuchsbericht 4 - Großbrandversuche: Entwicklung einer nachweislich brandsicheren und ökologischen Auslegungssystematik für vielgeschossige Holzbauten," Dez. 2022.
- [80] T. Engel *et al.*, *Realbrandversuche als Grundlage neuer Forschungserkenntnisse für den Brandschutz im Holzbau*, Brandschutz-Tagung 2021. Düsseldorf. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/Admin/Downloads/210520\_te\_nw\_TIMpuls-1.pdf
- [81] FRITZ EGGER GmbH & Co. OG und EGGER Holzwerkstoffe Wismar, Hg., "Egger OSB 3," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.egger.com/de/building/product-detail/OSB3TG?country=DE>
- [82] Nordpan GmbH-SRL, Hg., "Dreischichtholzplatte," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rubner.com/de/nordpan/downloadbereich/>
- [83] AGEPAN System, Hg., "Holzfaserplatte," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/Admin/Downloads/AGEPAN%20DWD%20600%20Technisches%20Datenblatt%20DE.pdf
- [84] SOPREMA GmbH, Hg., "pavatex Isolair," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.pavatex.de/fileadmin/produkt/Leistungserklaerung\\_DoP/PAVATEX/ISOLAIR\\_INSEU0001.b.DE.pdf](https://www.pavatex.de/fileadmin/produkt/Leistungserklaerung_DoP/PAVATEX/ISOLAIR_INSEU0001.b.DE.pdf)
- [85] Unifrax LLC, Hg., "Insulfrax LTX Matte," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.unifrax.com/wp-content/uploads/2018/09/18107-Unifrax-Insulfrax-Form-U\\_216\\_DE.pdf](https://www.unifrax.com/wp-content/uploads/2018/09/18107-Unifrax-Insulfrax-Form-U_216_DE.pdf)
- [86] V. Schleifer, A. Frangi und M. Fontana, "Experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Plattenelementen," Zürich, 2007, doi: 10.3929/ETHZ-A-005475303,

## Literatur

- [87] C. Groth, *FEM für Praktiker: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung - Lösungen mit dem FE-Programm ANSYS*, 5. Aufl. (Edition expertsoft 45). Renningen-Malmsheim: expert-Verl., ISBN: 978-3-8169-2714-3, 2009.
- [88] M. Hochmuth, "Einführung in das FEM-Programm ANSYS Classic mit ANSYS Parametric Design Language (ADPL)," FEM Labor, Regensburg, Statische und dynamische Simulationen, 2008.
- [89] ANSYS, Inc., "ANSYS Mechanical ADPL Command Reference," Release 13.0, 2010. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/ansys\\_13\\_command\\_reference.pdf](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/ansys_13_command_reference.pdf)
- [90] G. Albrecht, *Verifizierung der Modelldaten für das Materialmodell mit einem Referenzkörper*. Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ww3.cad.de/foren/ubb/uploads/stephan22/FEM-Ansys-Skript1.pdf>
- [91] Nordbord, Hg., "SterlingOSB/3-Zero," Zugriff am: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.westfraser.de/wp-content/uploads/2020/07/SterlingOSB-Zero\\_Produktinfo\\_052023.pdf](https://www.westfraser.de/wp-content/uploads/2020/07/SterlingOSB-Zero_Produktinfo_052023.pdf)
- [92] J. Wolfsgruber, "Untersuchung der Prinzipien des Brandverhaltens von Holz-Stahl-Verbundkonstruktionen," Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, 2011.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Gebäudeklassen, eigene Abbildung mit Inhalten nach [7]	9
Abbildung 2: Wärmedurchgangswege durch Holztafelbauteil nach [1]	20
Abbildung 3: Aufbau der Holztafelbauweise	29
Abbildung 4: Einflussfaktoren zur Pyrolyse und Verbrennung nach [52] am Beispiel eines festen Stoffes	31
Abbildung 5: Brandphasen mit Angaben zu bauaufsichtlichen Anforderungen nach [52]	32
Abbildung 6: Analyse der toxischen Gase und Temperaturentwicklung im Nachbarraum des Brandraumes [52] (Messungen von Sauerstoff O <sub>2</sub> ; Kohlendioxid CO <sub>2</sub> , Kohlenmonoxid CO und der Temperatur)	33
Abbildung 7: Einheitstemperaturzeitkurve nach [18]	34
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungswege vgl. [52]	35
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungswege nach [19]	36
Abbildung 10: oben: Übersicht Wärmeleitfähigkeit [47]; unten: Wärmeleitfähigkeit Vollholz nach [1]	41
Abbildung 11: oben: übersicht spez. Wärmekapazität [47]; unten: Wärmekapazität Vollholz nach [1]	43
Abbildung 12: oben: überblick Dichteverlauf [47]; unten: Dichteverlauf Vollholz mit Anfangsfeuchte 12% nach [1]	45
Abbildung 13: Beispiel Auswirkung eines unentdeckten Schwelbrandes aus [62]	48
Abbildung 14: Probekörper Vorversuchsreihe Hohlraum [32] – Aufbauzeichnung (Messstellen in rot) und Foto	51
Abbildung 15: Aufbau Probekörper und Versuchsergebnis – Luft; mit entsprechendem Temperaturverlauf [32]	52

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 16: Probekörper Dämmstoffversuche –(v.l.) Holzfaserdämmung (fest), Schafswolle, Steinwolle	53
Abbildung 17: Temperaturverlauf unter Brandbeanspruchung bei a) Steinwolle und b) Glaswolle	54
Abbildung 18: Temperaturverläufe unter Brandbeanspruchung (Dämmstoffversuche): a) Holzfaserdämmung fest; b) Holzfaserdämmung lose; c) Schafswolldämmung	56
Abbildung 19: Temperaturverlauf brandabgewandte Seite Gipswerkstoffplatte unter ETK-Beanspruchung	57
Abbildung 20: Vergleich Schutzzeit nichtbrennbare und brennbare Bekleidung (15mm GKF; 15mm GFP; 15mm OSB; 19mm DSH)	58
Abbildung 21: Temperaturverlauf brennbare Bekleidung beispielhaft an OSB-Platte	59
Abbildung 22: Probekörper Bekleidungselemente, mit Messstellen (beispielhaft für Bekleidung mit 15mm dicke)	62
Abbildung 23: Probekörper Dämmstoffversuche, mit Messstellen	63
Abbildung 24: Schemazeichnung Schutzwirkung von Dämmstoff, am Beispiel Glaswolle	65
Abbildung 25: Temperaturverläufe Brandversuch und Simulation gegenübergestellt (durchgezogen = brandbeanspruchte OSB-Platte; gestrichelt = brandabgewandte Seite der Dämmebene; gepunktet = brandabgewandte OSB-Platte)	85
Abbildung 26: grafische Darstellung Ablauf einer Simulation nach [89]	87
Abbildung 27: Modellausschnitt mit angenommener Lage in Bauteil	88
Abbildung 28: ANSYS Modell mit Mesh und Schichten mit Temperaturmessung	89
Abbildung 29: Schema-Zeichnung 1. Simulation	92
Abbildung 30: Schema-Zeichnung 2. Simulation	93
Abbildung 31: Schema-Zeichnung 3. Simulation	94

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 32: Eingabe- und Ausgabe Excel-Sheet zur Berechnung der raumabschließenden Funktion (Beispiel)	95
Abbildung 33: Vorversuch Glaswolldämmung aus [22], mittlere Temperaturverläufe Brandversuch	97
Abbildung 34: grafische Darstellung der ersten Simulation	98
Abbildung 35: zweite Simulation, ohne brandzugewandte Bekleidung	99
Abbildung 36: grafische Darstellung der Temperaturverläufe im zweiten Simulationsschritt	99
Abbildung 37: grafische Darstellung der Zeiten aus Simulation 3	100
Abbildung 38: Abbildung Probekörper Gipskarton-Feuerschutzplatte und Holzfaserdämmung (Bildmontage)	103
Abbildung 39: Schutz- bzw. Isolationszeiten des Bauteils anhand schichtweiser Simulation	104

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung des Brandverhalten nach [7], [8] und [10], ausgenommen Bodenbeläge und Rohrisolierungen .....	10
Tabelle 2: Übersicht Grenzkriterien.....	18
Tabelle 3: Auswahl der untersuchten Baustoffe.....	61
Tabelle 4: Isolations- und Schutzzeiten der untersuchten Baustoffe.....	64
Tabelle 5: Schutzzeiten der untersuchten Dämmstoffe, inkl. Abfallzeiten der brandbeanspruchten Trägerplatte .....	65
Tabelle 6: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [1] .....	67
Tabelle 7: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [1] .....	68
Tabelle 8: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [24].....	69
Tabelle 9: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [24].....	70
Tabelle 10: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [29] ..	71
Tabelle 11: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [29] ...	72
Tabelle 12: Anpassung der Rohdichte nach DIN EN 1995-1-2:2010 [1].....	76
Tabelle 13: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [1].....	77
Tabelle 14: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [1].....	78
Tabelle 15: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [24] ..	79
Tabelle 16: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [24] ...	80
Tabelle 17: Vergleich Isolationszeit nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [29] ..	81
Tabelle 18: Vergleich Schutzzeiten nach Brandversuch und Berechnungsverfahren nach [29] ...	82
Tabelle 19: Genauigkeit schichtweise Bauteilsimulation.....	101



Tabellenverzeichnis


Tabelle 20: Übersicht der in Abschnitt 6.3 untersuchten Aufbauten..... 106

## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

Für die Simulationen zu den Verfahren der schichtweisen Bauteilsimulation wurden die Materialparameter gewählt, welche bei der Isolationszeit und der Schutzzeit die geringsten Abweichungen aufwiesen. Bei den Dämmstoffen wurden hier entsprechend nur die Werte der Schutzzeiten berücksichtigt.

Zeigte der Abweichungsgrad keine eindeutigen Ergebnisse zur Entscheidung zwischen zwei Quellen der Materialparameter, wurde der Verlauf in der Erwärmungsphase mitberücksichtigt. Als Quellen dienten hierzu die DIN EN 1995-1-2:2010 [1], die Component Additive Method (CAM) [24] unter Berücksichtigung der Arbeit von [28] für brennbare Dämmstoffe und die prEN 1995-1-2:2025 [29]. Sind für ein Material keine Parameter gegeben, so wurden die Materialkennwerte des mit den Eigenschaften am besten übereinstimmenden Materials verwendet. In den Diagrammen zeigen die durchgezogenen Linien die Ergebnisse zu den Isolationszeiten (Erreichen 140K-Kriterium), gestrichelte Linien geben die Zeiten der Schutzfunktion (Erreichen 250K-Kriterium) wieder.

Zur Simulation der Spanplatte als Trägerplatte wurden anhand der durchgeführten Brandversuche eigene Materialkennwerte auf Basis von [24, 49, 56, 92] ermittelt und bei der Simulation als Trägerplatte für die weiteren untersuchten Materialien angewendet.

Die für die Untersuchungen zu der hier vorgestellten numerischen Nachweismethode der schichtweisen Bauteilsimulation gewählten Materialkennwerte sind mit einem  gekennzeichnet.

## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Spanplatte (Trägerplatte)

#### EN 1995-1-2:2010

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	650	0,12	1530
99	650	--	1770
99,1	650	--	13600
--	623,17	--	13500
120,1	623,17	--	2210
200	623,17	0,15	2000
250	579,54	--	1620
300	473,61	--	710
350	324,05	0,07	850
400	236,80	--	1000
500	--	0,09	--
600	162,02	--	1400
800	162,02	0,35	1650
1200	--	1,5	1650

#### CAM

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	660,56	0,12	--
100	660,56	0,3	1790
110	641,86	0,23	30796
120	623,17	0,15	1790
200	623,17	0,18	1790
275	386,36	0,14	6173
350	149,56	0,09	690
500	137,10	0,11	690
800	112,17	0,35	690
1200	74,78	2	690

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	650	0,12	1530
99	650	0,13	1770
100	650	0,13	13600
120	650	0,14	13500
121	578,5	0,14	2120
200	578,5	0,15	2000
250	539,5	0,12	1620
300	442	0,10	710
350	299	0,07	850
400	221	0,11	1000
500	191,75	0,19	1200
600	162,5	0,37	1400
800	149,5	0,74	1650
1200	1	3,15	1650

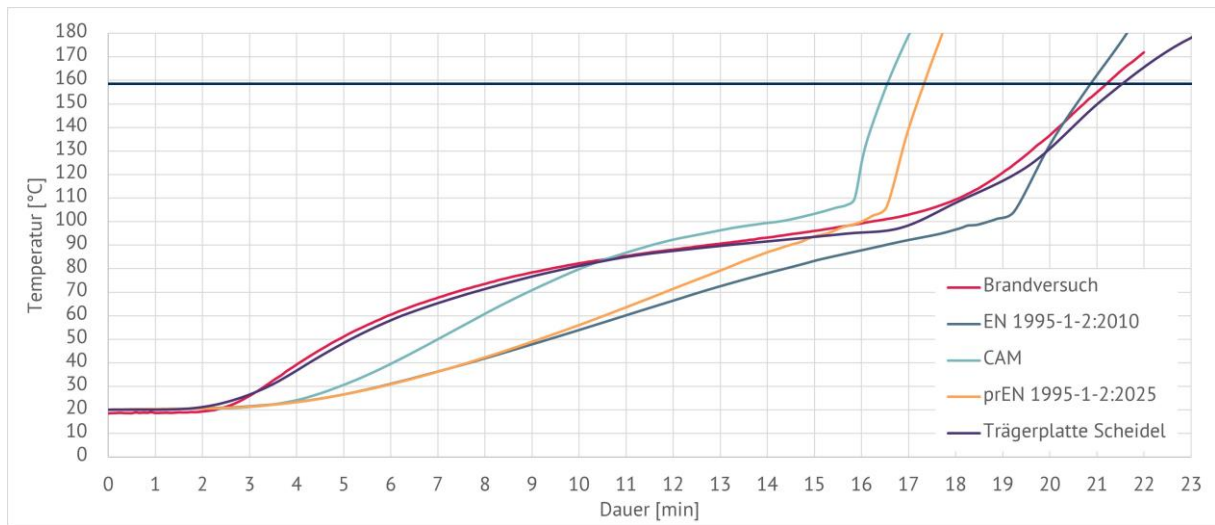
#### Trägerplatte Scheidel



T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	650	0,1708	1250
30	650	0,1791	1250
40	650	0,1875	950
50	650	0,1958	950
60	650	0,2042	950
70	650	0,2125	1200
80	650	--	1600
95	650	--	400
99	650	--	32800
100	--	0,3	--
101	636,58	--	32594
105	623,17	--	1950
110	--	--	5000
120	623,17	0,23	5900
150	623,17	--	1900
180	623,17	--	750
200	623,17	0,15	700
230	623,17	--	1300
250	623,17	--	2076
275	487,5	--	2160
300	419,92	--	7198,3
350	216,67	0,07	7513,3
400	216,67	--	2790
500	--	0,09	--
550	216,67	--	3420
800	216,67	0,35	4470
1000	216,67	--	5310
1200	216,67	1,5	6150

## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Ergebnisdiagramm zu Spanplatte (Trägerplatte)



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Gipskartonplatte

#### EN 1995-1-2:2010

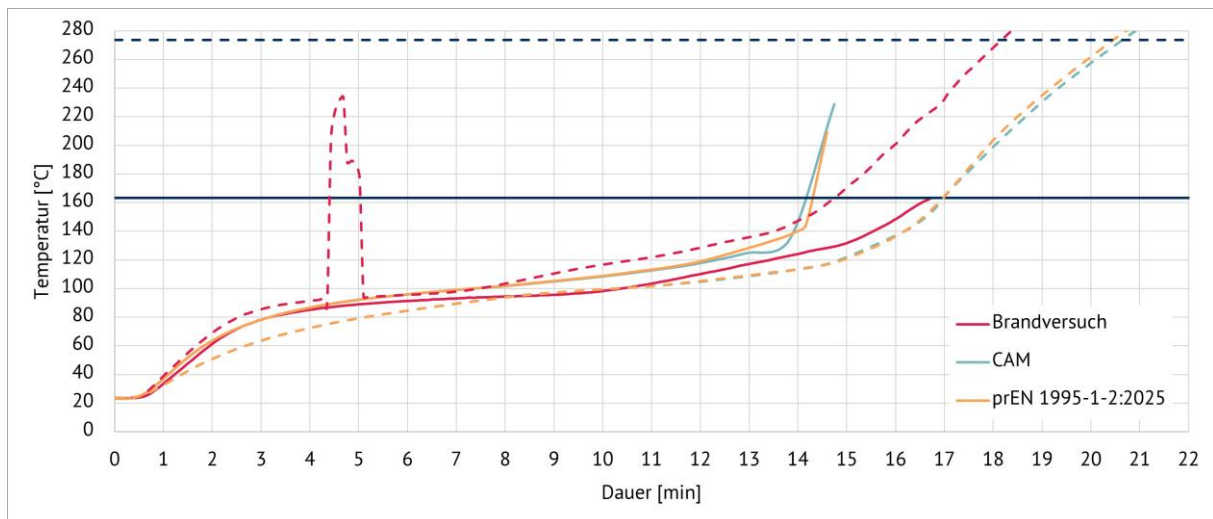
T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

#### CAM

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	680	0,4	960
70	680	0,4	960
100	680	0,27	960
130	629,68	0,13	14915
140	613,36	0,13	25207
150	596,36	0,13	21764
170	563,04	0,13	960
600	562,36	0,13	960
720	534,48	0,33	4359
750	527,68	0,38	960
1000	527,68	0,8	960
1200	527,68	2,37	960

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	680	0,40	960
70	680	0,40	960
100	680	0,27	960
130	629,68	0,13	14915
140	613,36	0,13	25207
150	596,36	0,13	21764
170	563,04	0,13	960
600	562,36	0,13	960
720	534,48	0,33	4359
750	527,68	0,38	960
1000	527,68	0,80	960
1200	527,68	2,37	960



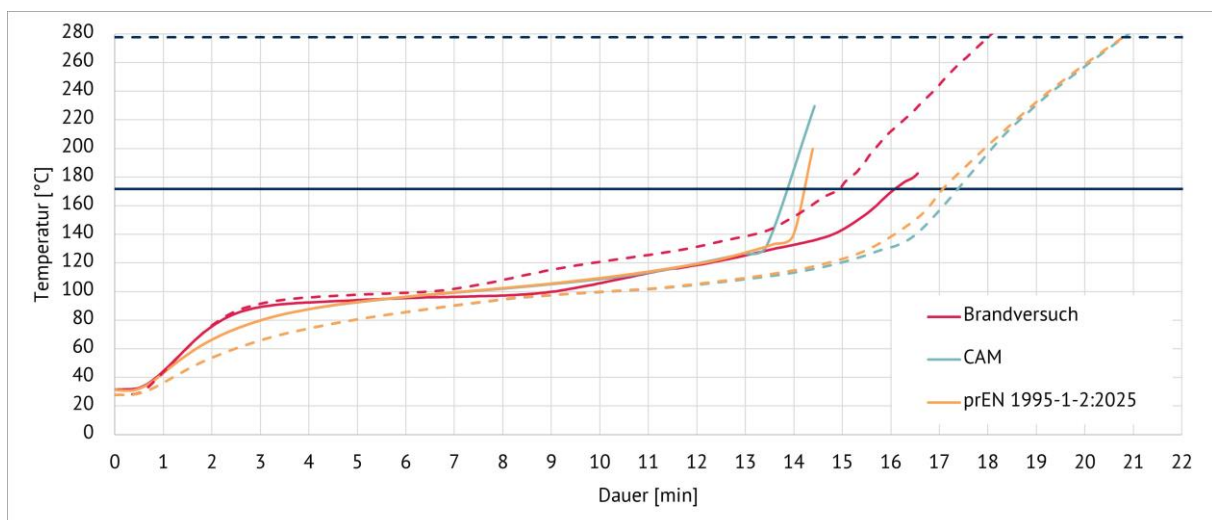
## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Gipskarton-Feuerschutzplatte

EN 1995-1-2:2010				CAM			
T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben				20	680	0,4	960
				70	680	0,4	960
				100	680	0,27	960
				130	629,68	0,13	14915
				140	613,36	0,13	25207
				150	596,36	0,13	21764
				170	563,04	0,13	960
				600	562,36	0,13	960
				720	534,48	0,33	4359
				750	527,68	0,38	960
				1000	527,68	0,8	960
				1200	527,68	2,37	960

### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	680	0,40	960
70	680	0,40	960
100	680	0,27	960
130	629,68	0,13	14915
140	613,36	0,13	25207
150	596,36	0,13	21764
170	563,04	0,13	960
600	562,36	0,13	960
720	534,48	0,33	4359
750	527,68	0,38	960
1000	527,68	0,80	960
1200	527,68	2,37	960



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Gipsfaserplatte

#### EN 1995-1-2:2010

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

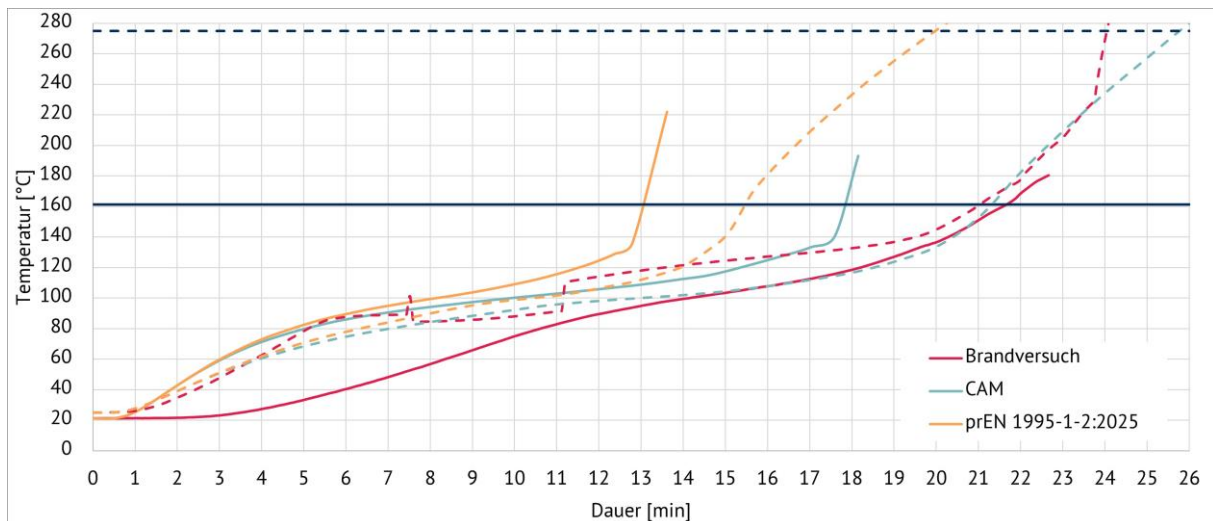
#### CAM



T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	800	0,4	960
70	800	0,4	960
100	800	0,27	960
130	740,80	0,13	9169
140	721,60	0,13	17545
150	701,60	0,13	16657
170	662,40	0,13	960
600	661,60	0,13	960
720	628,80	0,39	4359
750	620,80	0,46	960
1000	620,8	1	960
1200	620,8	2,37	960

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	800	0,40	960
70	800	0,40	960
100	800	0,27	960
130	740,8	0,13	9169
140	721,6	0,13	17545
150	701,6	0,13	16657
170	662,4	0,13	960
600	661,6	0,13	960
720	628,8	0,39	4359
750	620,8	0,46	960
1000	620,8	1,00	960
1200	620,8	2,37	960



# Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

## OSB-Platte

### EN 1995-1-2:2010

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	612	0,12	1530
99	612	--	1770
99,1	612	--	13600
120	588,46	--	13500
120,1	588,46	--	2120
200	588,46	0,15	2000
250	547,27	--	1620
300	447,23	--	710
350	306,00	0,07	850
400	223,62	--	1000
500	--	0,09	--
600	164,77	--	1400
800	153,00	0,35	1650
1200	1	1,5	1650

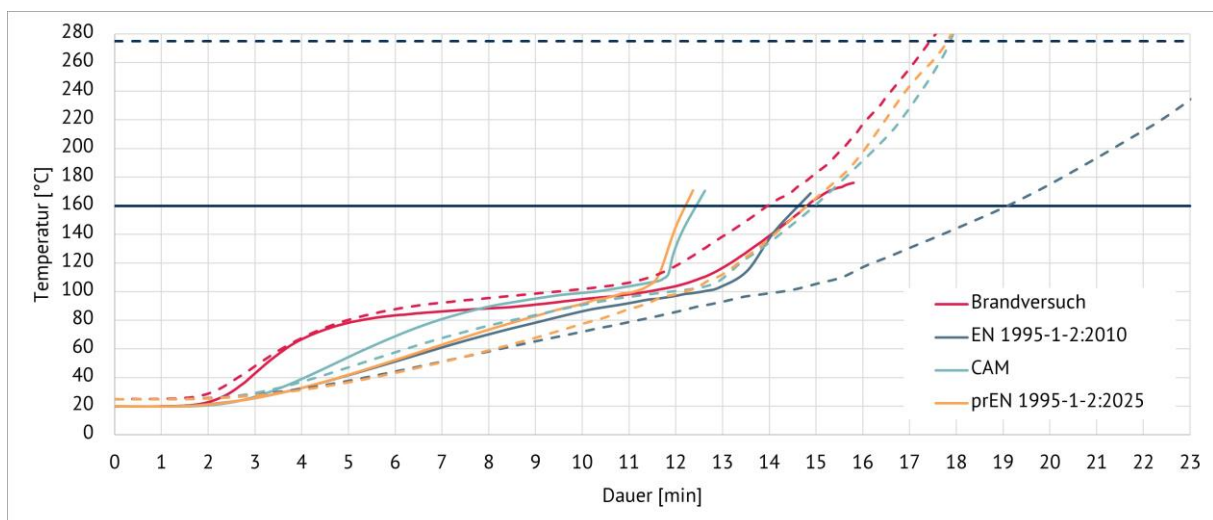
### CAM



T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	624	0,12	1790
100	624	0,3	1790
110	606	0,23	30796
120	588,46	0,15	1790
200	588,46	0,18	1790
275	364,85	0,14	6173
350	141,23	0,09	690
500	129,46	0,23	690
800	105,92	0,74	690
1200	70,62	4,2	690

### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	600	0,12	1530
99	600	0,13	1770
100	600	0,13	13600
120	600	0,14	13500
121	534	0,14	2120
200	534	0,15	2000
250	498	0,12	1620
300	408	0,10	710
350	276	0,07	850
400	204	0,11	1000
500	197	0,19	1200
600	150	0,37	1400
800	138	0,74	1650
1200	1	3,15	1650





# Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

## Dreischichtholzplatte



EN 1995-1-2:2010

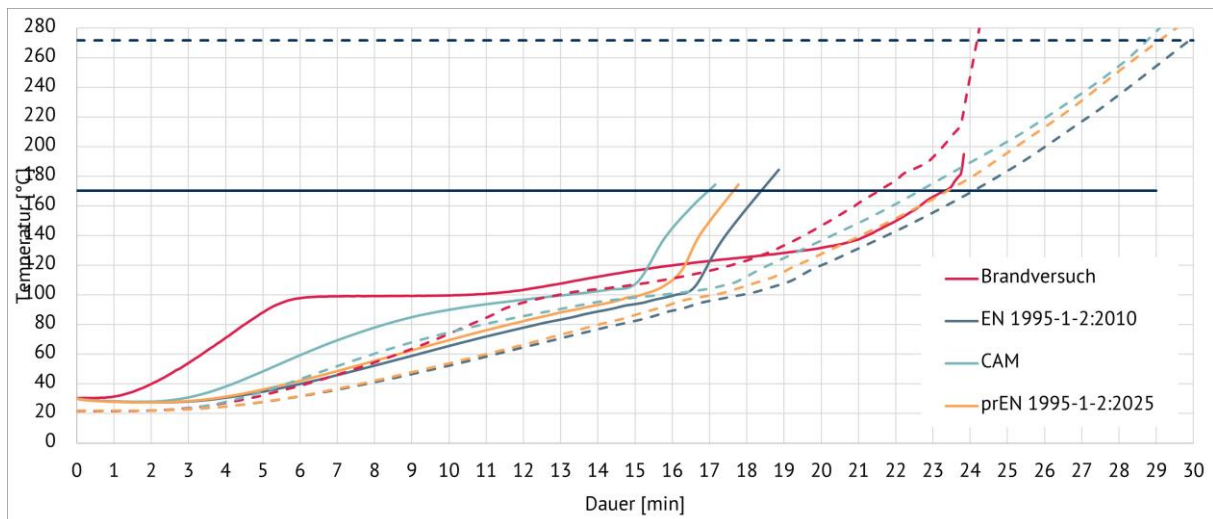
T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	530	0,12	1530
98	530	--	1770
99	530	--	13600
120	473,21	--	13500
121	473,21	--	2120
200	473,21	0,15	2000
250	440,09	--	1620
300	359,64	--	710
350	246,07	0,07	850
400	179,82	--	1000
500	--	0,09	--
600	132,50	--	1400
800	123,04	0,35	1650
1200	1	1,5	1650

CAM

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	502	0,12	1790
100	502	0,3	1790
110	487	0,23	30796
120	473,21	0,15	1790
200	473,21	0,18	1790
275	293,39	0,14	6173
350	113,57	0,09	690
500	104,11	0,11	690
800	85,18	0,35	690
1200	56,79	2	690

prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	500	0,12	1530
99	500	0,13	1770
100	500	0,13	13600
120	500	0,14	13500
121	445	0,14	2120
200	445	0,15	2000
250	415	0,12	1620
300	340	0,10	710
350	230	0,07	850
400	170	0,08	1000
500	122,5	0,09	1200
600	125	0,18	1400
800	115	0,35	1650
1200	1	1,50	1650



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Holzfasерplatte

EN 1995-1-2:2010

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	590,425	0,12	1530
98	590,425	--	1770
99	590,425	--	13600
120	527,17	--	13500
121	527,17	--	2120
200	527,17	0,15	2000
250	490,26	--	1620
300	400,65	--	710
350	274,13	0,07	850
400	200,32	--	1000
500	--	0,09	--
600	147,61	--	1400
800	137,06	0,35	1650
1200	0	1,5	1650

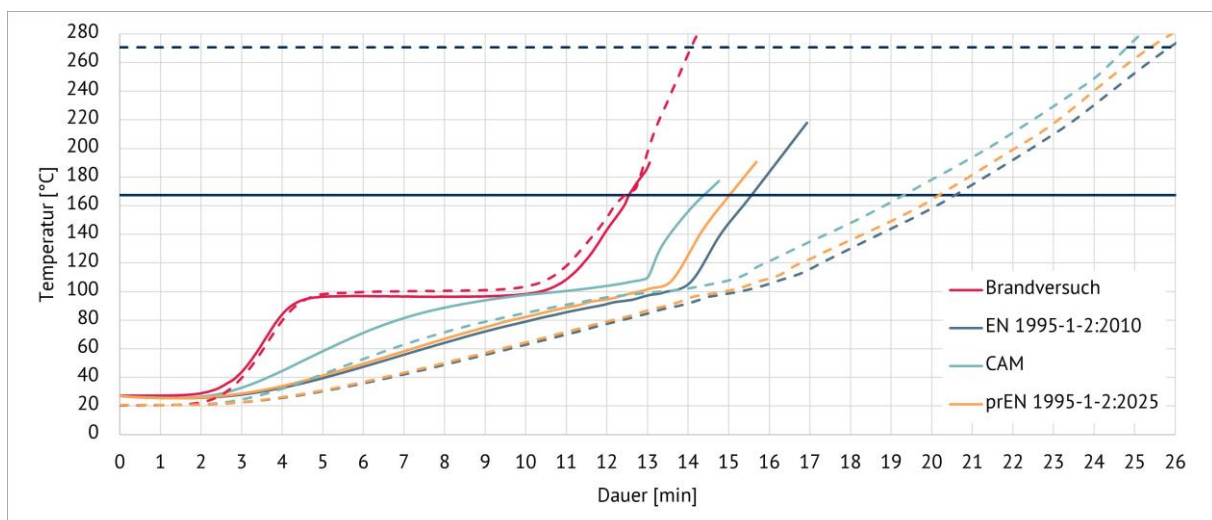
CAM



T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	590	0,12	1790
100	590	0,3	1790
110	558	0,23	30796
120	541,67	0,15	1790
200	541,67	0,18	1790
275	335,84	0,14	6173
350	130,00	0,09	690
500	119,17	0,11	690
800	97,50	0,35	690
1200	65,00	2	690

prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	598,90	0,12	1530
98	590,43	--	1770
99	590,43	--	13600
120	541,67	--	13500
121	541,67	--	2120
200	541,67	0,15	2000
250	503,76	--	1620
300	411,67	--	710
350	281,67	0,07	850
400	205,84	--	1000
500	178,75	0,09	--
600	151,67	--	1400
800	140,84	0,35	1650
1200	0	1,50	1650



# Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

## Holzweichfaserplatte



EN 1995-1-2:2010

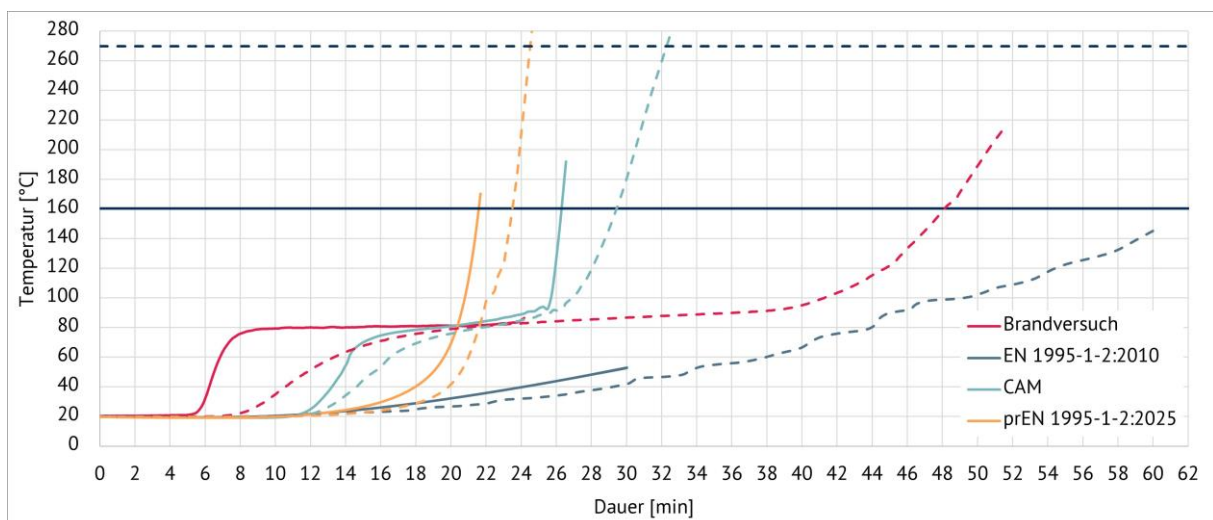
T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	208,214286	0,12	1530
98	208,214286	--	1770
99	208,214286	--	13600
120	189,29	--	13500
121	189,29	--	2120
200	189,29	0,15	2000
250	176,04	--	1620
300	143,86	--	710
350	98,43	0,07	850
400	71,93	--	1000
500	--	0,09	--
600	53,00	--	1400
800	49,21	0,35	1650
1200	1	1,5	1650

CAM

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	203	0,039	2100
60	--	0,13	--
79	--	--	2275
80	191,25	1,5	8360
99	189,38	--	--
100	187,50	0,13	8360
101	--	--	2630
110	--	0,044	--
120	187,50	0,044	3094
150	187,50	0,046	3136
200	178,125	0,132	1856
400	82,5	0,432	3801
600	69,375	0,339	4831
800	56,25	3,35	5412
1200	1	3,5	4158

prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	200,00	0,04	1200
100	196,60	0,068	1340
200	192,20	0,11	1380
300	188,00	0,151	1382
400	188,00	0,192	1384
510	188,00	0,24	1386
660	188,00	0,3	1389
665	1,00	0,3	1389
1200	1,00	100,00	1400



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Holzfaserdämmung (fest)

#### EN 1995-1-2:2010

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

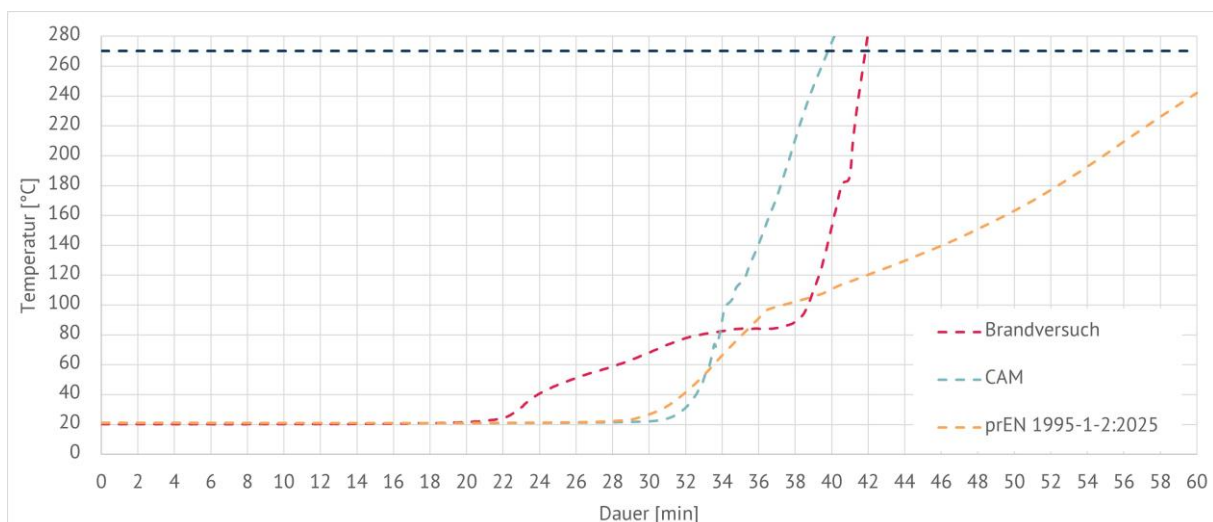
#### CAM



T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	51	0,039	2100
60	--	0,13	--
79	47,8125	--	2275
80	47,81	0,15	8360
99	47,34	--	8360
100	46,88	0,13	8360
101	46,875	--	2630
110	--	0,044	--
120	46,88	0,044	3094
150	46,88	0,046	3136
200	44,53125	0,132	1856
400	20,625	0,432	3801
600	17,34375	0,339	4831
800	14,0625	3,35	5412
1200	1	3,5	4158

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	50,00	0,04	880
100	50,00	0,047	1040
200	49,00	0,08	1160
400	48,85	0,25226415	1280
600	48,65	0,42044025	1355
800	48,50	0,64	1430
925	48,00	0,8408805	1477
1200	44,35	1,26132074	1580



# Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

## Holzfaserdämmung (lose)

### EN 1995-1-2:2010

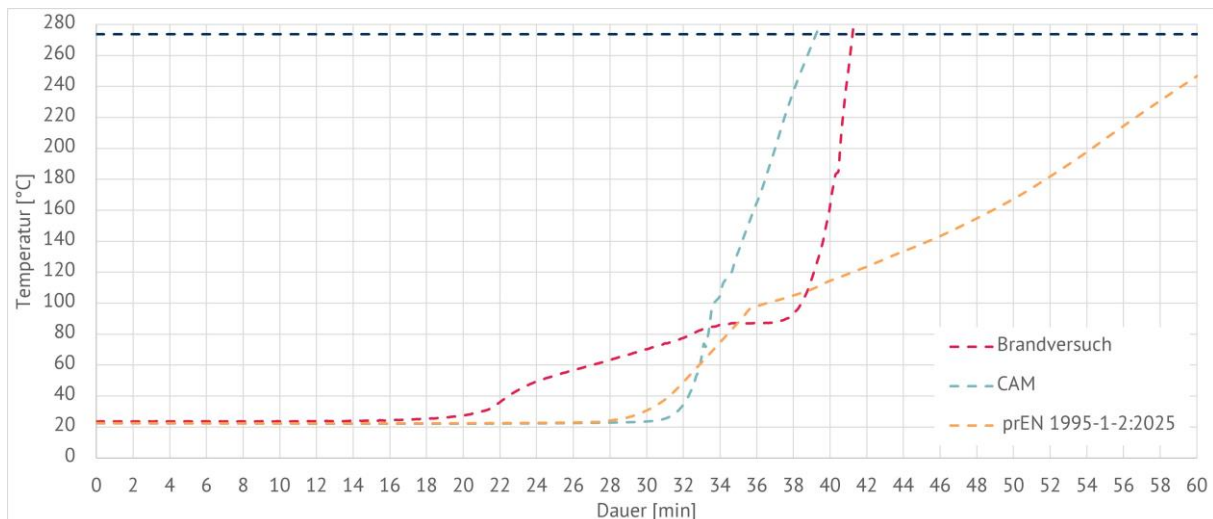
T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

### CAM

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	51	0,039	2100
60	--	0,13	--
79	47,81	--	2275
80	47,81	0,15	8360
99	47,34	--	8360
100	46,88	0,13	8360
101	46,88	--	2630
110	--	0,044	--
120	46,88	0,044	3094
150	46,88	0,046	3136
200	44,53	0,132	1856
400	20,63	0,432	3801
600	17,34	0,339	4831
800	14,06	3,35	5412
1200	1	3,5	4158

### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	50,00	0,04	880
100	50,00	0,047	1040
200	49,00	0,08	1160
400	48,85	0,25226415	1280
600	48,65	0,42044025	1355
800	48,50	0,64	1430
925	48,00	0,8408805	1477
1200	44,35	1,26132074	1580



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Schafswolle

#### EN 1995-1-2:2010

T [°C]      ρ [kg/m³]    λ [W/mK]    c [J/kgK]

keine Materialparameter gegeben

#### CAM

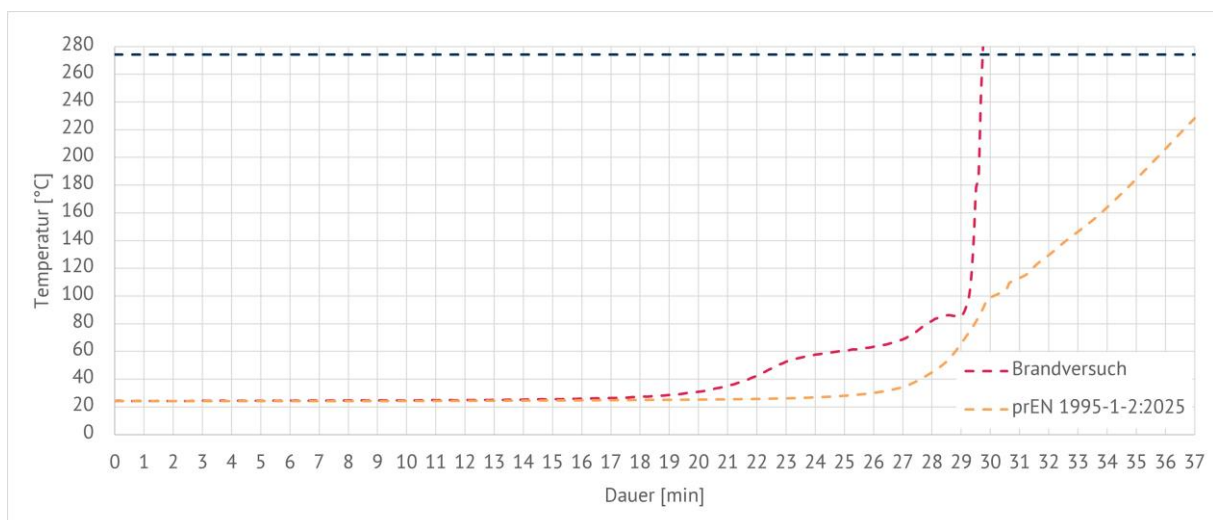
T [°C]      ρ [kg/m³]    λ [W/mK]    c [J/kgK]

keine Materialparameter gegeben

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
20	22	0,036	880
100	22	0,047	1040
200	21,56	0,08	1160
400	21,49	0,50054237	1280
600	21,41	0,83423729	1355
800	21,34	1,27916384	1430
925	21,12	1,66847458	1477
1200	19,514	2,50271186	1580

*Werte von Holzfaserdämmung (lose)  
mit angepasster Rohdichte*





## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Glaswolle

#### EN 1995-1-2:2010

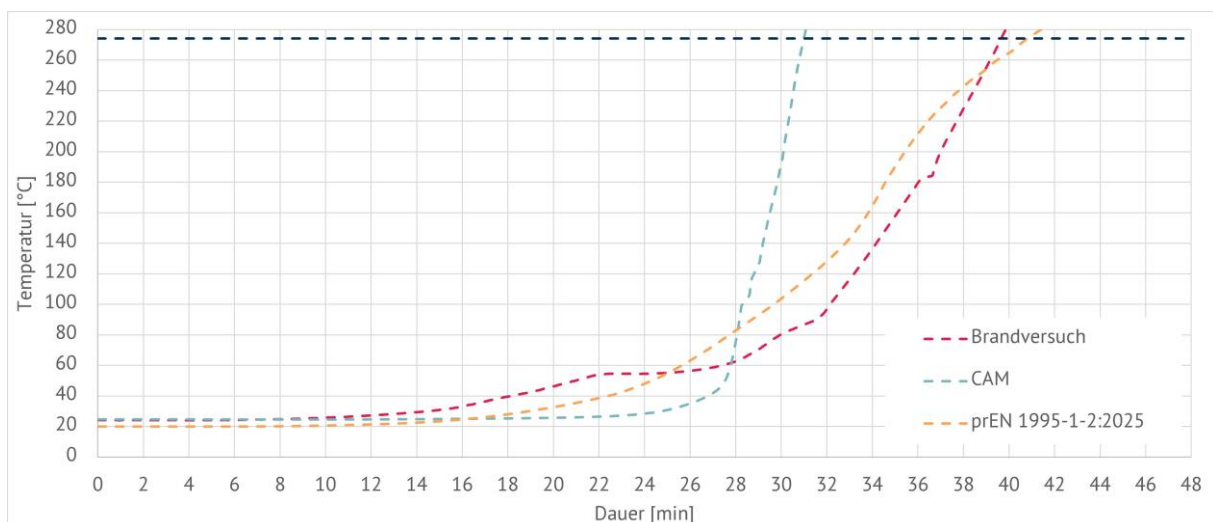
T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

#### CAM

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	17	0,035	1200
100	16,71	0,068	1340
200	16,34	0,11	1380
300	15,98	0,151	1382
400	15,98	0,192	1384
510	15,98	0,238	1386
660	15,98	0,3	1389
1200	15,98	100	1400

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	17	0,035	1200
100	16,711	0,068	1340
200	16,34	0,11	1380
300	15,98	0,151	1382
400	15,98	0,192	1384
510	15,98	0,238	1386
660	15,98	0,3	1389
665	0,017	0,3	1389
1200	0,02	100,00	1400



## Anhang A: Materialkennwerte Simulationen

### Steinwolle

#### EN 1995-1-2:2010

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
keine Materialparameter gegeben			

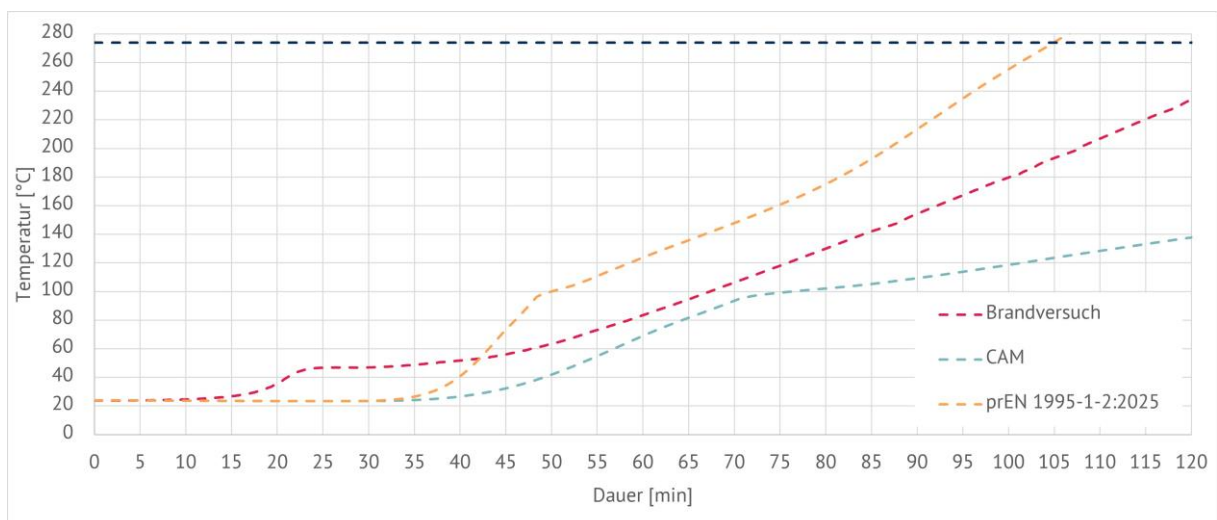
#### CAM



T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	95	0,036	880
100	95	0,047	1040
200	93,1		1160
400	92,815	0,09	1280
600	92,435	0,15	1355
800	92,15	0,23	1430
925	91,2	0,3	1477
1200	84,265	0,45	1580

#### prEN 1995-1-2:2025

T [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]
20	95	0,036	880
100	95	0,047	1040
200	93,10	0,08	1160
400	92,82	0,17104495	1280
600	92,44	0,28507491	1355
800	92,15	0,43711486	1430
925	91,20	0,57014982	1477
1200	84,265	0,85522473	1580





## **Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren**

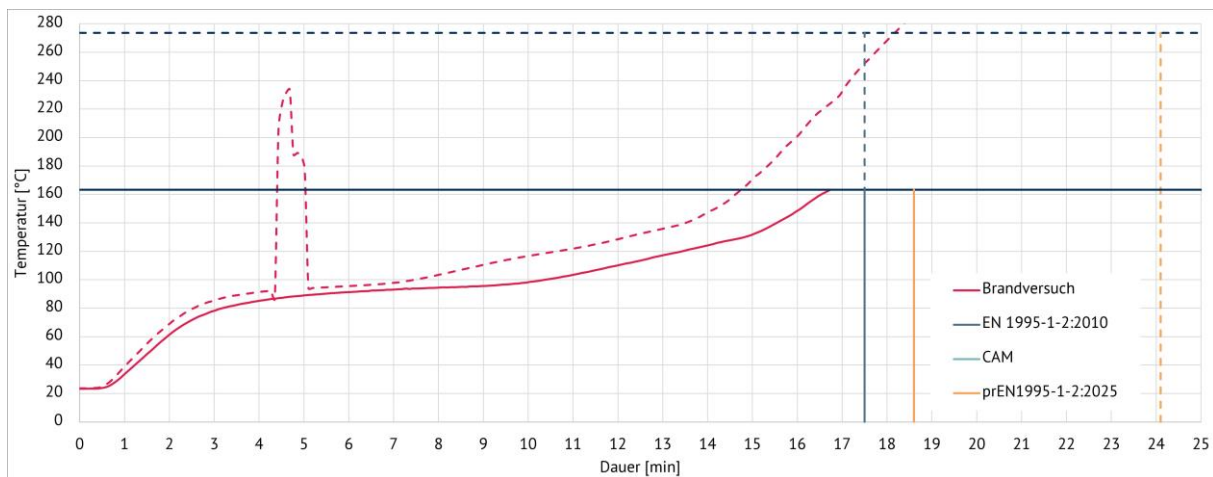
Die Berechnungen der raumabschließenden Funktion erfolgten mit den im Folgenden aufgeführten Gleichungen zu den Materialien. Wurde in einer Quelle für das untersuchte Material keine Gleichung gezeigt, wurde die Gleichung des Materials gewählt, welches anhand der Struktur und des Aufbaus die größte Ähnlichkeit mit dem untersuchten Material aufwies. Dabei sind die Gleichungen aus der DIN EN 1995-1-2:2010 [1], der Component Additiv Method (CAM) nach Schleifer [24] mit Einbindung der Arbeit [28] für brennbare Dämmstoffe und den Gleichungen aus der prEN 1995-1-2:2025 [29] entnommen.

Bei allen Diagrammen zeigen die durchgezogenen Linien die Zeiten der Isolationszeit (Erreichen des 140K-Kriteriums) und die gestrichelten Linien die Zeiten der Schutzzeit (Erreichen des 250K-Kriteriums) der jeweiligen Schichten.

Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Gipskartonplatte

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0} = 1,4h_p$ Gipsplatten Typen A, F, R, H	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten und Gipsfaserplatten
	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatten	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatten und Gipsfaserplatten

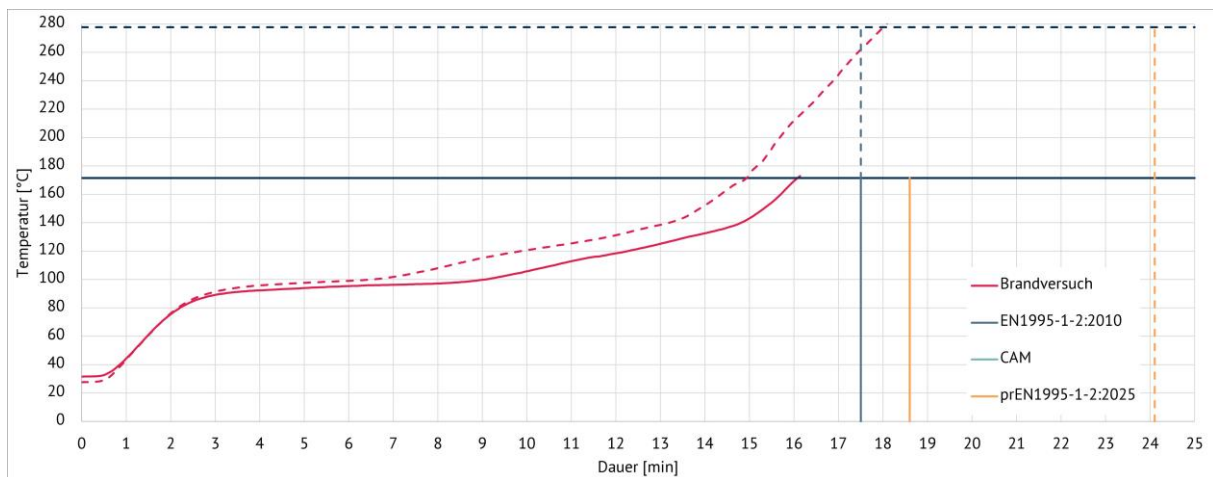


Die Zeiten der CAM und der prEN 1995-1-2:2025 liegen übereinander, weshalb nur die Zeit der prEN 1995-1-2:2025 zu sehen ist.

Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Gipskarton-Feuerschutzplatte

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0} = 1,4h_p$ Gipsplatten Typen A, F, R, H	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten und Gipsfaserplatten
	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatten	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatte und Gipsfaserplatten

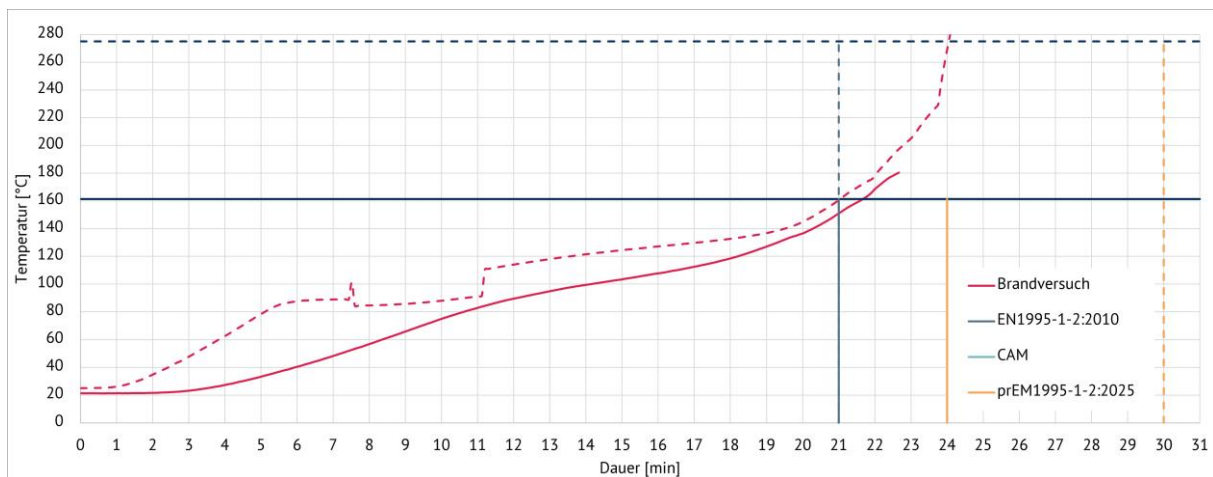


Die Zeiten der CAM und der prEN 1995-1-2:2025 liegen übereinander, weshalb nur die Zeit der prEN 1995-1-2:2025 zu sehen ist.

Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Gipsfaserplatte

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0} = 1,4h_p$ Gipsplatten Typen A, F, R, H	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten	$t_{ins,0} = 24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ Gipsplatten und Gipsfaserplatten
	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatten	$t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ Gipsplatte und Gipsfaserplatten

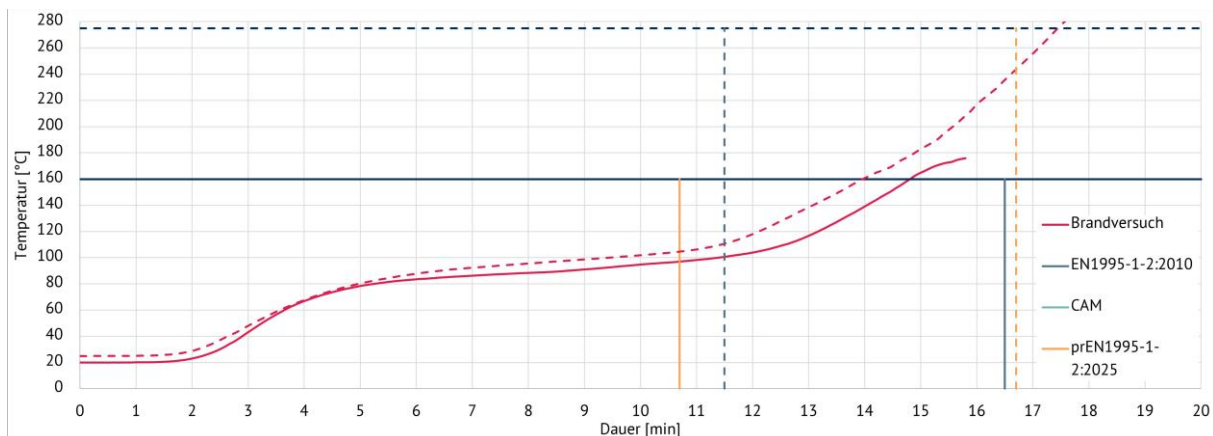


Die Zeiten der CAM und der prEN 1995-1-2:2025 liegen übereinander, weshalb nur die Zeit der prEN 1995-1-2:2025 zu sehen ist.

Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

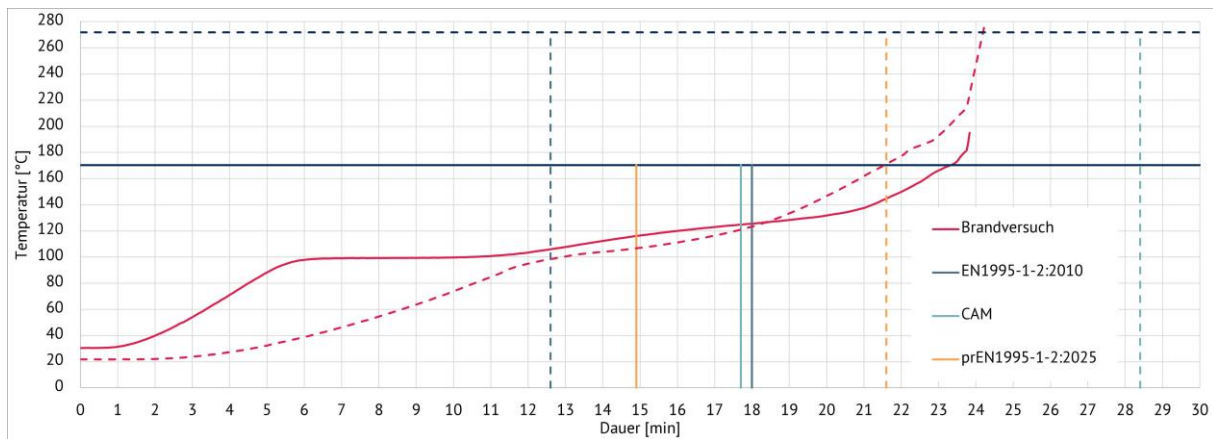
OSB-Platte

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0} = 1,1h_p$ Span- und Faserplatten	$t_{ins,0} = 16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ OSB-Platten	$t_{ins,0} = 16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ OSB, Sperrholz, Massivholzplatte mit mehreren Schichten
	$t_{prot,0} = 23 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1}$ OSB-Platte	$t_{prot,0} = \frac{h_i}{k_p \cdot k_h \cdot \beta_0}$ OSB, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten,



Dreischichtholzplatte

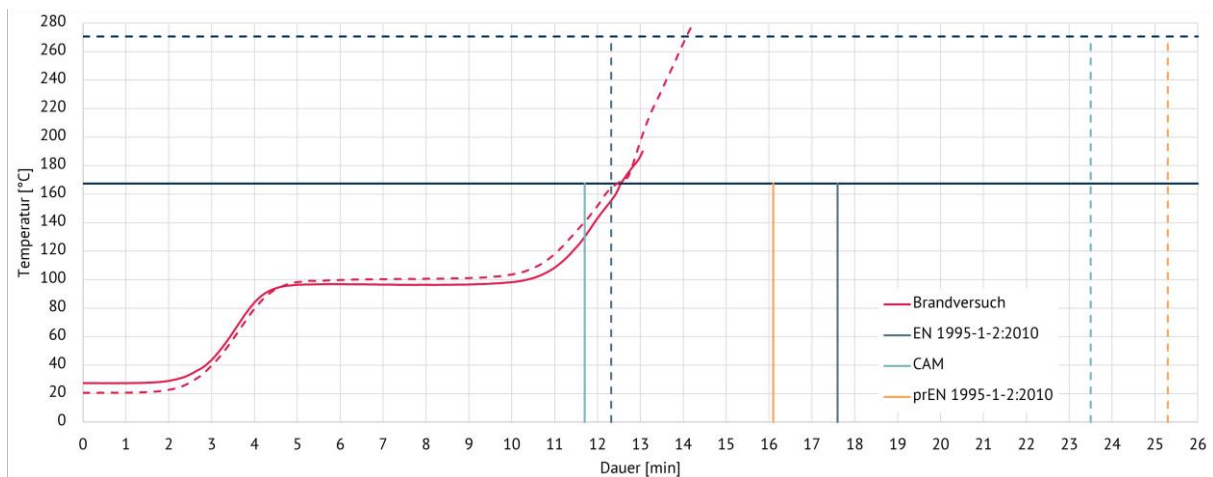
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins} =$	$t_{ins,0} = 19 \cdot (h_i/20)^{1,4}$ Massivholzplatten	$t_{ins,0} = 16 \cdot (h_i/20)^{1,4}$ OSB, Sperrholz, Massivholzplatte mit mehreren Schichten
	$t_{prot,0} = 30 \cdot (h_i/20)^{1,1}$ Massivholzplatten	$t_{prot,0} = h_i/k_h \cdot \beta_o$ Funierschichtholzplatte, Massivholzverkleidung, Massivholzplatte



## Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

### Holzfaserverplatte

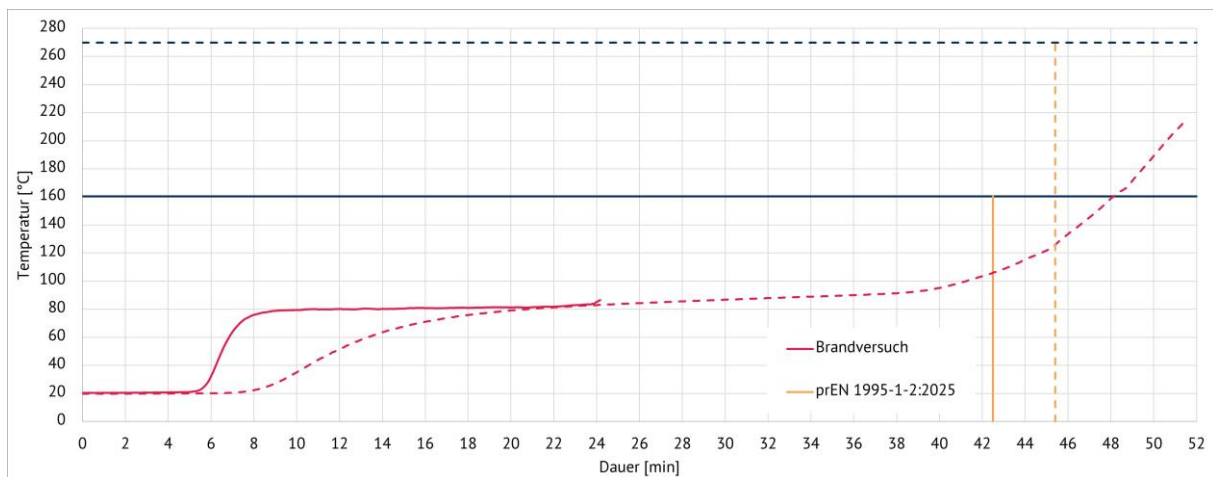
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0} = 1,1h_p$ Span- und Faserplatten	$t_{ins,0} = 16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ OSB-Platten	$t_{ins,0} = 16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ OSB, Sperrholz, Massivholzplatte mit mehreren Schichten
	$t_{prot,0} = 23 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1}$ OSB-Platte	$t_{prot,0} = \frac{h_i}{k_\rho \cdot k_h} \cdot \beta_0$ OSB, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten,



Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Holzweichfaserplatte

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{ins,0} = 0,47 \cdot h_n^{1,1}$ Holzfaserdämmplatte
	Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{prot,0} = 0,74 \cdot h_i + 1$ Holzfaserdämmplatte mit $35mm \leq h_i \leq 240mm$

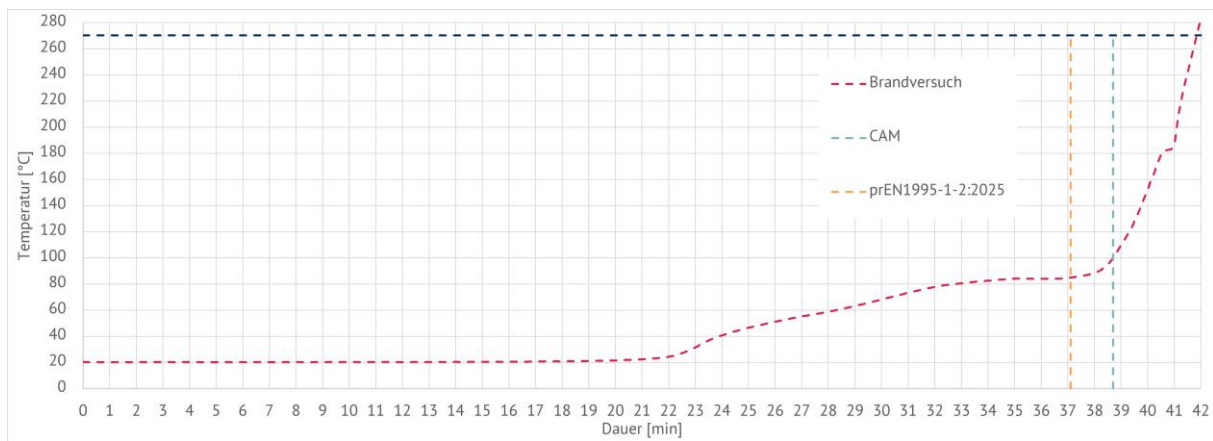




Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Holzfaserdämmung (fest)

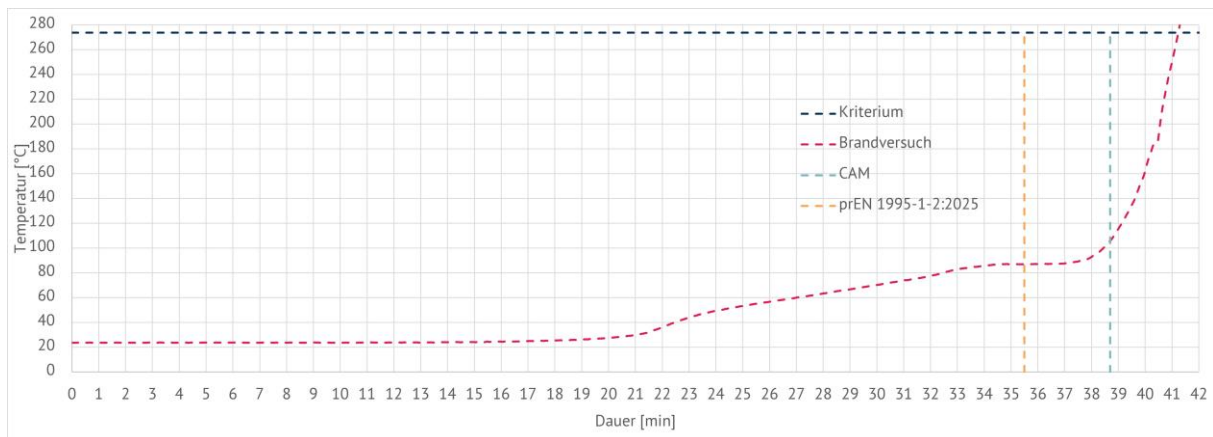
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{ins,0}$ = nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung	$t_{ins,0}$ = nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung
	$t_{prot,0} = 0,56 \cdot h_i - 22$ flexible Holzfaserdämmung	$t_{prot,0} = 0,56 \cdot h_i - 22$ Holzfaserdämmung



Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Holzfaserdämmung (lose)

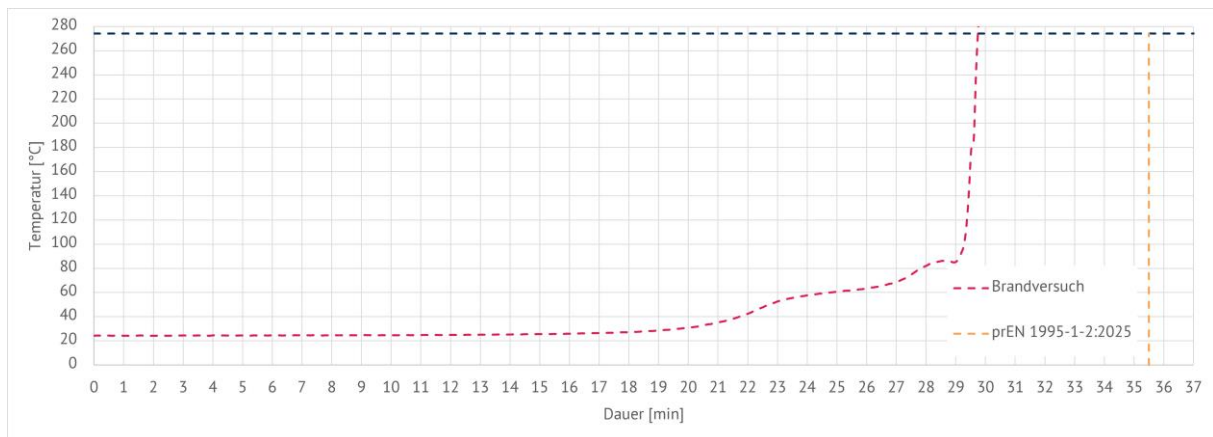
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{ins,0}$ = nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung	$t_{ins,0}$ = nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung
	$t_{prot,0} = 0,56 \cdot h_i - 22$ flexible Holzfaserdämmung	$t_{prot,0} = 19 \cdot \left(\frac{h_i}{60}\right)$ lose Zellulosedämmung und lose Holzfaserdämmung



Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Schafswolle

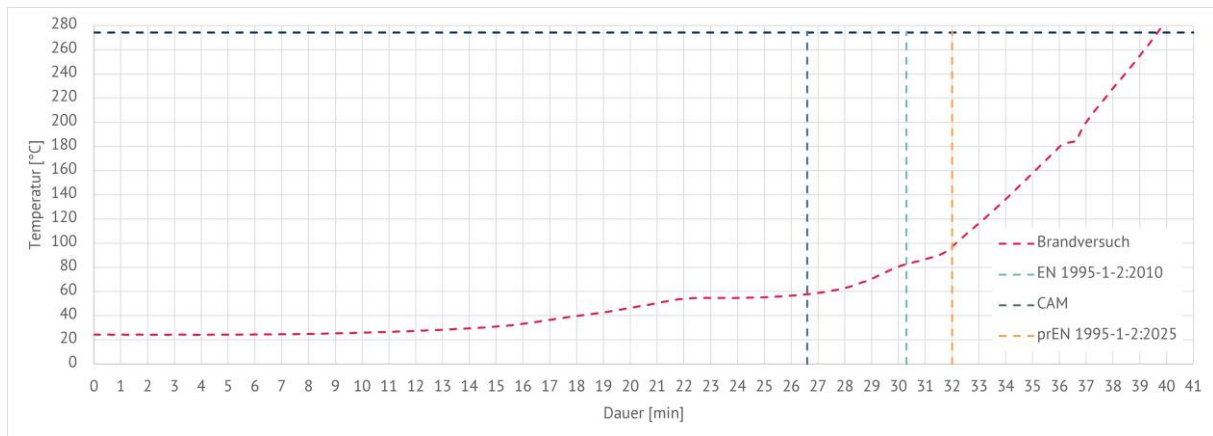
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{ins,0}$ = nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung
	Keine Gleichung gegeben, keine passende alternative Gleichung	$t_{prot,0} = 19 \cdot \left(\frac{h_i}{60}\right)$ lose Zellulosedämmung und lose Holzfaserdämmung



Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

Glaswolle

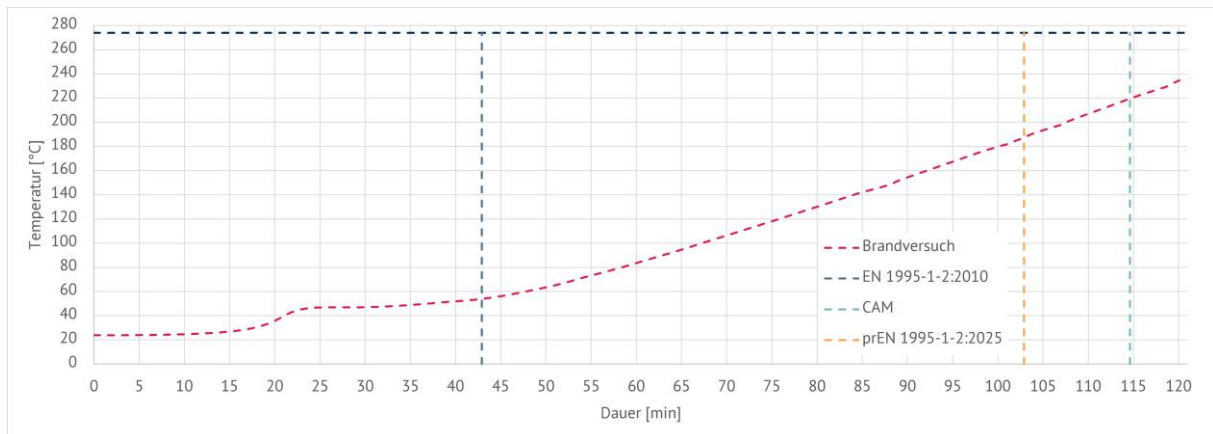
DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0,i} = 0,1h_{ins}k_{dens}$ Glaswolle	$t_{ins,0} = (0,001 \cdot \rho_i + 0,035) \cdot h_i + 8,5 \leq 30$ Glaswolle $h_i \leq 40\text{mm}$	$t_{ins,0} =$ nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung
	$t_{prot,0} = (0,0007 \cdot \rho_i + 0,046) \cdot h_i + 13 \leq 30$ Glaswolle $h_i \leq 40\text{mm}$	$t_{prot,0} = (\rho_i/1430 + 0,046) \cdot h_i + 13 \leq 30$ Mineralwolle Dämmgruppe PL2



## Anhang B: Vergleich Raumabschlussfunktion Brandversuch zu additiven Berechnungsverfahren

### Steinwolle

DIN EN 1995-1-2:2010	CAM	prEN 1995-1-2:2025
$t_{ins,0,i} = 0,2h_{ins}k_{dens}$ Steinwolle	$t_{ins,0} = (0,01 \cdot \rho_i^{0,224} - 0,02) \cdot h_i^2$ Steinwolle	$t_{ins,0} =$ nicht gegeben flexible Holzfaserdämmung
	$t_{prot,0} = 0,3 \cdot h_i^{0,75 \cdot \log(\rho_i) - \rho_i / 400}$ Steinwolle	$t_{prot,0} = 0,3 \cdot h_i^{(0,75 \log(\rho_i) - \rho_i / 400)}$ Mineralwolle Dämmgruppe PL 1



## Anhang C: Leitfaden zur Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation

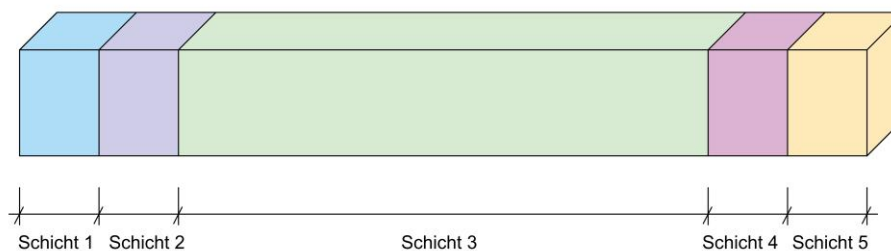
Um das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren sicher anwenden zu können, wird in diesem Abschnitt ein Leitfaden aufgeführt, wie bei einer solchen Simulation vorzugehen ist. Um eine belastbare Aussage treffen zu können, ist es wichtig, sich genau an die Definitionen der zu entnehmenden Werte zu halten und gleichermaßen die Anwendungsgrenzen zu berücksichtigen. Ebenso müssen, wie auch bei anderen ingenieurmäßigen Nachweisverfahren, die erhaltenen Ergebnisse auf deren Plausibilität hin überprüft werden.

Der Leitfaden ist als eine Schritt-für-Schritt-Anleitung aufgebaut, weshalb es hier zu Überschneidungen zu den Kapiteln der Arbeit kommen wird. Dies ist beabsichtigt und soll die Vollständigkeit des Leitfadens für die Anwendung in der Praxis gewährleisten.

### Aufbau des Simulationsmodells

#### Schritt 1: Eingabe der Modellgeometrie

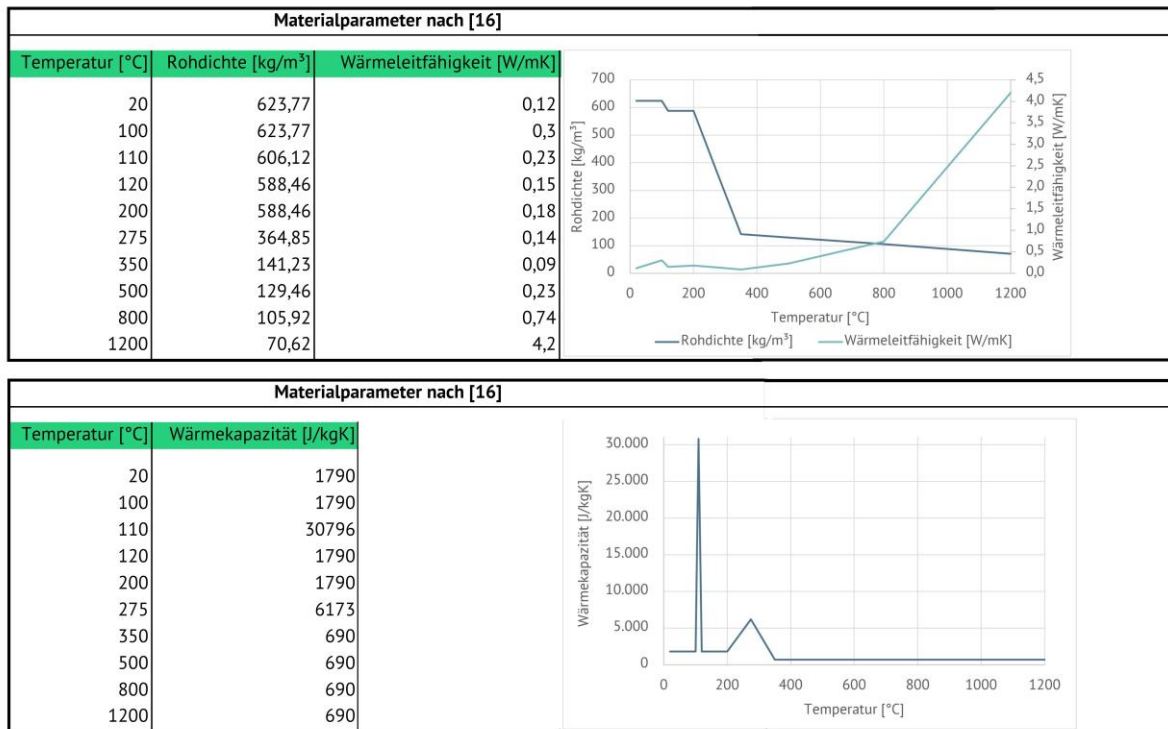
Das Simulationsmodell ist so aufzubauen, dass die Bauteilschichten unabhängig voneinander unterdrückt und aktiviert werden können (vergleiche nachfolgende Abbildung). Dies ist für die korrekte Durchführung der Simulationen und somit für die Genauigkeit der ermittelten Feuerwiderstandsdauer zwingend erforderlich. Eine Simulation der einzelnen Schichten nacheinander führt nicht zu einem korrekten Ergebnis, da hierbei weder die wärmedämmende Eigenschaft des folgenden Baustoffs noch die Vorerwärmung des betrachteten Baustoffs aus einem vorherigen Schritt berücksichtigt wird.



#### Schritt 2: Eingabe der Materialkennwerte

Zur thermisch-transienten Simulation sind die Eingabe der Materialkennwerte für Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität jedes verwendeten Materials essenziell. Hierbei ist darauf zu achten, dass produktspezifische Angaben, wie z.B. die Rohdichte berücksichtigt werden. Folgend sind in der Abbildung die benötigten Materialparameter am Beispiel von OSB-Platten nach [24] aufgeführt.

## Anhang C: Leitfaden zur Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation



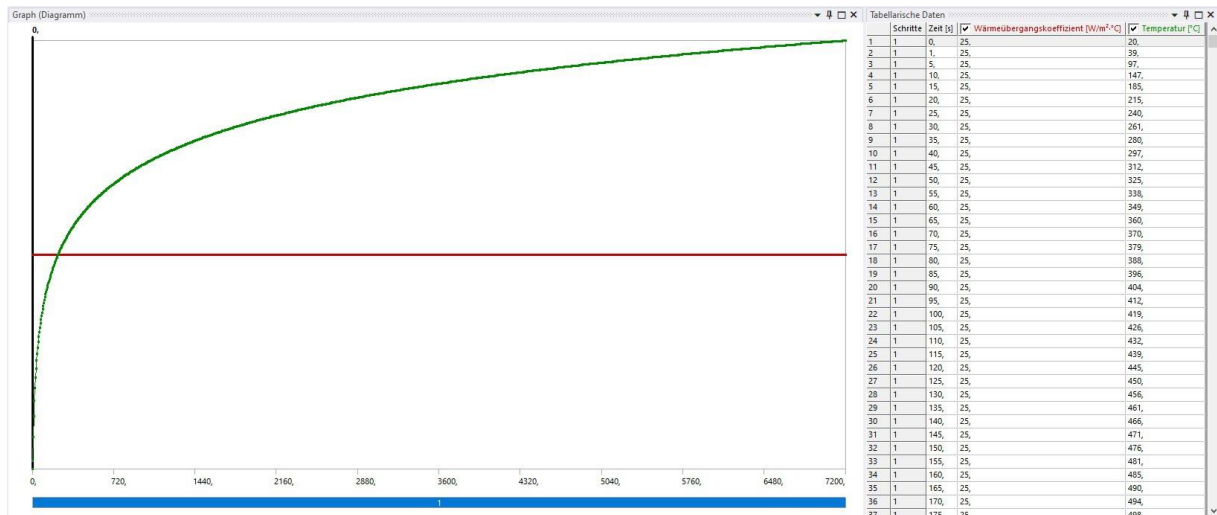
In Anhang A befinden sich die in dieser Arbeit verwendeten Materialkennwerte, ebenso wie die Angaben zu den Kennwerten mit den geringsten Abweichungen in den durchgeführten Untersuchungen.

### Schritt 3: Eingabe der Temperaturbeanspruchung

Neben den Materialkennwerten ist die Eingabe der Einheitstemperaturzeitkurve nach [18] zwingend vorzunehmen. Diese berücksichtigt die Brandeinwirkungen auf das betrachtete Bauteil und führt so zu einer Normbeanspruchung für die Bemessung im Brandfall. Für die Simulationen ist eine Raumtemperatur zur Startzeit von 20°C vorzusehen. Dementsprechend wird die Bauteiltemperatur zur Startzeit der Brandbeanspruchung ebenfalls mit 20°C angenommen. Die Eingabe der Temperatur erfolgt in der Regel in Sekunden und °C. Vorgeschlagen wird ein Zeitschritt von 5 Sekunden.

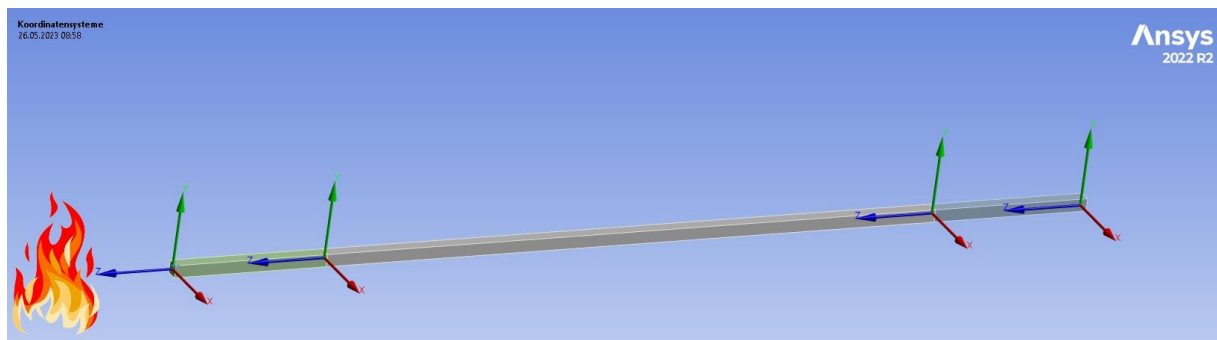
Die Einwirkung des Brandes wird durch Konvektion und Strahlung vorgesehen. Für die Konvektion ist ein Wärmeübergangskoeffizient von 25W/m<sup>2</sup>K einzugeben. Der Übergang der Temperatur des erwärmten Bauteils an die Raumluft an der brandabgewandten Bauteilseite ist ebenfalls mit der Angabe einer Konvektion mit 20°C und einem Wärmeübergangskoeffizienten von 9W/m<sup>2</sup>K anzugeben. Die Werte zu den Koeffizienten stammen aus [55] und werden in nachfolgender Abbildung grafisch dargestellt. Das Emissionsvermögen wird auf der brandbeanspruchten Seite mit  $\varepsilon = 1,0$  für die Flammeneinwirkung und an den Bauteiloberflächen mit  $\varepsilon = 0,8$  berücksichtigt.

## Anhang C: Leitfaden zur Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation



### Schritt 4: Eingabe der Temperaturmessstellen bzw. Entnahmestellen

Die Lage der festgelegten Messstellen nach den Bauteilschichten ist bei dem beschriebenen Modell identisch mit den Koordinatensystemen aus nachfolgender Abbildung.



Das Modell selbst sollte auf das Mindeste reduziert und auch im Querschnitt möglichst gering ausgeführt werden. Die Stärke der einzelnen Schichten entlang der Z-Achse ist im Originalmaßstab vorzusehen.

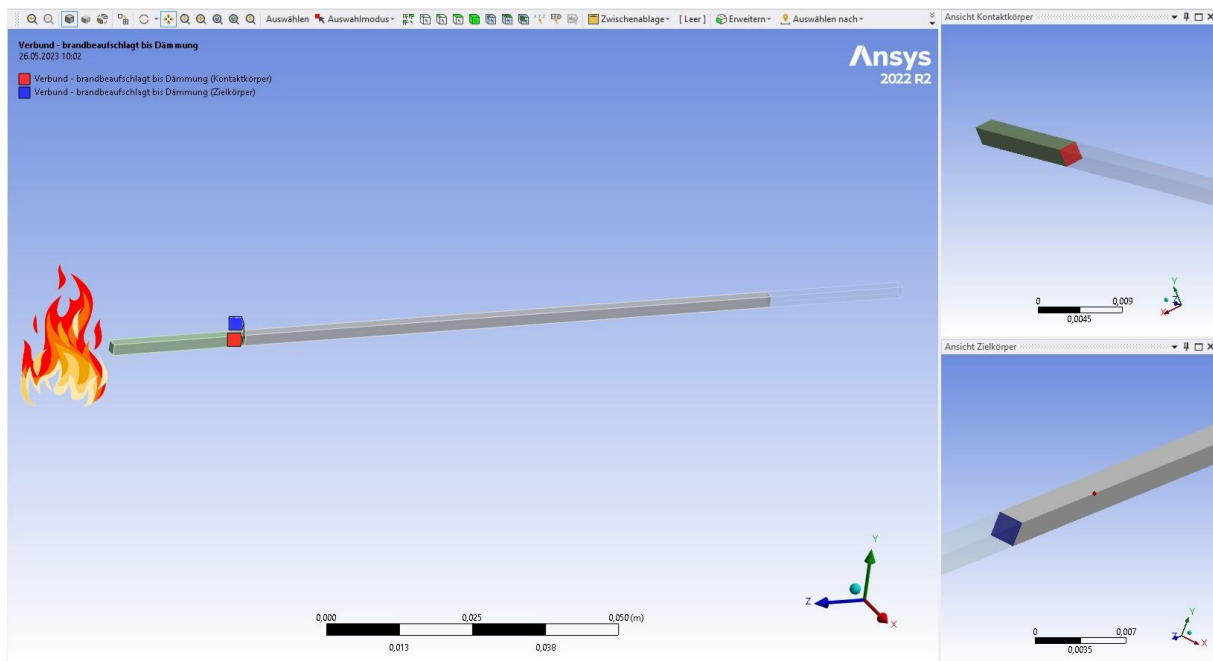
### Schritt 5: Zuweisen der Eigenschaften und Eingabe des Rasters

Bevor die Simulation gestartet werden kann, sind die Bauteilschichten mit den zuvor eingegebenen Materialien zu definieren und ein geeignetes Raster (Mesh) für das Modell festzulegen. Auch hier ist es ratsam, ein möglichst großes Raster zu wählen, um die Rechenkapazität so gering wie möglich zu halten, jedoch auch zwingend darauf zu achten, dass diese eine ausreichende Genauigkeit bei der Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bietet. In diesem Beispiel, mit einem Querschnitt des Modells von 2mm x 2mm auf der X- und Y-Achse, wurde das Mesh auf eine Größe von 2mm eingestellt.



### Schritt 6: Kontrolle der Kontaktschnittstellen

Zuletzt ist zu überprüfen, dass die einzelnen Bauteilschichten durch Kontaktschnittstellen miteinander in Verbindung stehen. Dabei hat die Wärmeübertragung, wie in nachfolgender Abbildung beispielhaft am Übergang der brandbeaufschlagten Bekleidung zur Dämmebene gezeigt, von Kontaktfläche (erwärmte Bauteilschicht) auf Zielfläche (zu erwärmende Bauteilschicht) zu erfolgen.



Nach erfolgter Eingabe der aufgeführten Angaben kann die erste Simulation gestartet werden.

*Hinweis: Diese Auflistung bezieht sich auf die Angaben von ANSYS Workbench 2022 R2. Es ist möglich, dass bei anderen Simulationsprogrammen weitere Einstellungen erforderlich werden.*

### **Durchführung der Bemessung anhand schrittweiser Bauteilsimulation**

Das Vorgehen wird an einem 3-schichtigen Aufbau erläutert. In weiteren Forschungen ist zu überprüfen, ob dieses Verfahren auch für mehrschichtige Aufbauten angewendet werden kann. In den meisten Fällen sind die Grenztemperaturen nicht genau in den Daten aufgeführt, weshalb eine Interpolation des nächst kälteren und des nächst wärmeren Wertes erfolgen muss. Daher kann die Verwendung eines Kalkulationsprogramms, wie z.B. Microsoft Office Excel zur Erleichterung hilfreich sein, jedoch ist dies nicht erforderlich. Die Berechnungen können auch händisch durchgeführt werden.

Schritt 7: 1. Simulation – komplettes Bauteil

Zur ersten Simulation sind alle Bauteilschichten zu aktivieren. Die Brandeinwirkung erfolgt demnach auf der vordersten, brandzugewandten Bauteiloberfläche. Aus dieser Simulationsreihe sind die Werte  $t_1$  an Messstelle M1 und  $T_2$  an Messstelle M2 zu entnehmen. Da die Simulationsergebnisse selten exakt den benötigten Zeitpunkt angeben, sind die Werte mittels Interpolation zu bestimmen. In nachfolgender Abbildung wird dies beispielhaft aufgezeigt.  $t_1$  gibt die Zeit an, zu der an M1 eine Temperatur von 270°C erreicht wird. Interpoliert wird hier zwischen den Werten der Zeilen 178 und 179. Zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur  $T_2$  an der Messstelle M2 abzulesen, bzw. für diesen Zeitpunkt aus den Werten der 1. Simulation Dämmung zu interpolieren.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	M
1	<b>Glaswolle Simulation Vorversuch</b>									
2										
3	<b>1. Simulation brandbeanspruchte Bekleidung</b>					<b>1. Simulation Dämmung</b>				
4										
5	Sek	Min	Temp	$t_1$		Sek	Min	Temp	$T_2$	
172	1228,60	20,48	107,31			1228,60	20,48	20,83		
173	1249,00	20,82	115,21			1249,00	20,82	20,91		
174	1269,30	21,16	142,60			1269,30	21,16	20,99		
175	1289,70	21,50	164,45			1289,70	21,50	21,07		
176	1310,00	21,83	185,48			1310,00	21,83	21,16		
177	1330,30	22,17	206,88			1330,30	22,17	21,26		
178	1350,70	22,51	235,63	270,00 °C		1350,70	22,51	21,36	22,74 min	
179	1371,00	22,85	286,87	22,74 min		1371,00	22,85	21,49	21,44 °C	
180	1391,30	23,19	346,76			1391,30	23,19	21,63		
181	1411,70	23,53	409,41			1411,70	23,53	21,82		
182	1450,30	24,17	493,93			1450,30	24,17	22,56		
183	1500,90	25,02	572,99			1500,90	25,02	25,04		
184	1564,40	26,07	634,66			1564,40	26,07	31,97		
185	1653,40	27,56	679,80			1653,40	27,56	49,43		

Schritt 8: 2. Simulation – Definition neuer brandbeanspruchter Schicht

Nachdem die entsprechenden Daten entnommen wurden, muss die direkte, brandbeaufschlagte Bauteilschicht deaktiviert werden. Um die Brandeinwirkung weiterhin beizubehalten, sind die Konvektion und die Strahlung auf die nun folgende Bauteilschicht aufzubringen. Mit diesen Einstellungen ist die nächste Simulation zu starten. Von deren Ergebnissen sind die Werte  $t_2$ ,  $t_{2,1}$  und  $T_3$  zu entnehmen. Wie auch in der ersten Simulationsrunde zeigt der Wert  $t_2$  die Zeit an, an der nach Beginn der Brandbeanspruchung an der Messstelle M2 eine Temperatur von 270°C erreicht wird. Für  $t_{2,1}$  ist die Zeit entscheidend, zu der an der Messstelle M2 die Temperatur  $T_2$  erreicht wird. Dies wird in nachfolgender Abbildung veranschaulicht. Zuletzt wird die Temperatur  $T_3$  an der Messstelle M3 zum Zeitpunkt  $t_2$  entnommen.

## Anhang C: Leitfaden zur Anwendung der schichtweisen Bauteilsimulation

1. Simulation Dämmung				2. Simulation Dämmung			
Sek	Min	Temp	$T_2$	Sek	Min	Temp	$t_{2,1}$
1330,30	22,17	21,26		138,63	2,31	20,18	
1350,70	22,51	21,36	22,74 min	170,31	2,84	20,66	21,44 °C
1371,00	22,85	21,49	21,44 °C	207,99	3,47	22,01	3,20 min
1391,30	23,19	21,63		252,33	4,21	25,07	
1411,70	23,53	21,82		301,63	5,03	30,35	
1450,30	24,17	22,56		352,57	5,88	37,34	

2. Simulation Dämmung				2. Simulation brandabgewandte Bekleidung			
Sek	Min	Temp	$t_2$	Sek	Min	Temp	$T_3$
1070,00	17,83	269,68		1070,00	17,83	25,54	
1070,20	17,84	269,96		1070,20	17,84	25,55	
1070,20	17,84	269,99	270,00 °C	1070,20	17,84	25,55	17,84 °C
1070,30	17,84	270,03	17,84 min	1070,30	17,84	25,55	25,55 min
1070,30	17,84	270,09		1070,30	17,84	25,55	
1070,40	17,84	270,15		1070,40	17,84	25,55	

### Schritt 9: folgende Simulationen

Der Schritt 8 ist so lange zu wiederholen, bis einzig die äußerste, brandabgewandte Schicht in einem Simulationsdurchlauf aktiviert ist (für Zeiten  $t_3$  bis  $t_{n-1}$ ). Bei dieser Schicht ist, nicht wie in den vorhergegangenen, die Schutzzeit zu bestimmen, sondern die Isolationszeit, die durch eine abweichende Temperatur bestimmt wird. Daher ist für  $t_n$  die Zeit zu bestimmen, zu der an der Messstelle  $M_n$  eine Temperatur von  $160^\circ\text{C}$  erreicht wird. Weiter ist in diesem Simulationsdurchgang die Zeit  $t_{n,n-1}$  zu entnehmen, zu der an der Messstelle  $M_n$  die Temperatur  $T_n$  erreicht wird.

### Schritt 10: Durchführung der Berechnung

Nachdem alle erforderlichen Simulationsreihen beendet und die benötigten Zeiten entnommen wurden, liegen die nun folgend aufgeführten Zeiten vor.

Zeiten aus den Simulationsdurchgängen

---

$t_1$	Zeit, bei der M1 270°C erreicht [min]
$t_2$	Zeit, bei der M2 270°C erreicht [min]
$t_{2,1}$	Zeit, bei der M2 Temperatur $T_2$ erreicht [min]
... Weitere Schichten wie oben aufgeführt	
$t_n$	Zeit, bei der M <sub>n</sub> 160°C erreicht [min]
$t_{n,n-1}$	Zeit, bei der M <sub>n</sub> Temperatur $T_n$ erreicht [min]

Die aufgeführten Zeiten sind in die nachfolgende Gleichung einzufügen, um die anzunehmende Dauer der Raumabschlussfunktion ( $t_R$ ) zu berechnen.

$$t_R = t_1 + (t_2 - t_{2,1}) + \dots + (t_n - t_{n,n-1})$$

Bei einer Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten oder Gipsfaserplatten ist aufgrund deren längeren Verbleibens an der Konstruktion die brandbeanspruchte Bekleidungsschicht doppelt zu berücksichtigen. Das Ergebnis gibt die Zeit an, die für das Bauteil als Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Funktion angesetzt werden kann.

Das Verfahren kann für Schutzzeiten bis zu 120 Minuten angewendet werden. Wird für eine Bauteilschicht eine Schutzwirkung über 120 Minuten erreicht, ist diese auf 120 Minuten zu begrenzen. Die übrigen erforderlichen Werte werden entsprechend für die angenommene Schutzzeit von 120 Minuten übernommen. Für Zeiten >120 Minuten Raumabschlussfunktion liegt bisher keine Validierung nach Brandversuchen vor, weshalb hier keine zuverlässigen Raumabschlussfunktionen über 120 Minuten hinausgehend angenommen werden können.

## Anhang D: Excel-Sheet zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion

### Eingabe-/Ausgabeseite

Bei erstmaligem Öffnen sind auf der Eingabe-/Ausgabeseite die Angaben zur Anzahl der Schichten des Bauteils und zu der Kennzeichnung der Schichten zu machen. Die übrigen Felder werden nach Eintragung der Simulationsergebnisse automatisch ausgefüllt.

### Nachweismethode der raumabschließenden Funktion anhand schichtweiser Bauteilsimulation

**Bauteilaufbau:** (bitte auswählen)  Anzahl der Schichten (aktuell nur 3-schichtige Aufbauten möglich)


**Art der Schicht** (bitte auswählen)

brandbeaufschlagte Schicht

Dämmschicht

brandabgewandte Schicht

**Abbildung Messstellen**



$T_1$  bei Messstelle M1  
 $T_2$  bei Messstelle M2  
 $T_3$  bei Messstelle M3  
 $t_1$  bei 270°C an Messstelle M1  
 $t_2$  bei 270°C an Messstelle M2  
 $t_3$  bei 160°C an Messstelle M3  
 $t_{2,1}$  bei Temperatur  $T_2$  an Messstelle M2  
 $t_{3,2}$  bei Temperatur  $T_3$  an Messstelle M3

**ANSYS Workbench öffnen**

Einheit der Zeitangabe	Eingabe in Sekunden	
	Werte aus Simulation	Berechnung ausführen
$t_1$	sek	min
$T_2$	°C bei	min
$t_{2,1}$	sek	min bei °C
$t_2$	sek	min
$T_3$	°C bei	min
$t_{3,2}$	sek	min bei °C
$t_3$	sek	min

**raumabschließende Funktion**

Das Bauteil erfüllt die Feuerwiderstandsqualität

Wurden die Daten zu den Temperaturverläufen aus dem Simulationsprogramm entsprechend eingegeben, zeigt die Eingabe-/Ausgabeseite die ermittelten Zwischenzeiten und das endgültige Ergebnis der Raumabschlussfunktion des untersuchten Bauteils auf.

## Anhang D: Excel-Sheet zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion


### Nachweismethode der raumabschließenden Funktion anhand schichtweiser Bauteilsimulation

**Bauteilaufbau:** (bitte auswählen)  Anzahl der Schichten (aktuell nur 3-schichtige Aufbauten möglich)

**Art der Schicht** (bitte auswählen)

OSB-Platte 25mm	Bekleidung	brandbeaufschlagte Schicht
Glaswolldämmung 80mm	Dämmung	Dämmschicht
OSB-Platte 25mm	Bekleidung	brandabgewandte Schicht

**Abbildung Messstellen**



$T_1$  bei Messstelle M1  
 $T_2$  bei Messstelle M2  
 $T_3$  bei Messstelle M3  
 $t_1$  bei 270°C an Messstelle M1  
 $t_2$  bei 270°C an Messstelle M2  
 $t_3$  bei 160°C an Messstelle M3  
 $t_{2,1}$  bei Temperatur  $T_2$  an Messstelle M2  
 $t_{3,2}$  bei Temperatur  $T_3$  an Messstelle M3

Einheit der Zeitangabe	Eingabe in Sekunden	
<b>Werte aus Simulation</b>	<b>Berechnung ausführen</b>	
$t_1$	1460,29 sek	24,34 min
$T_2$	22,63 °C bei	24,34 min
$t_{2,1}$	221,13 sek	3,69 min bei 22,63 °C
$t_2$	1117,64 sek	18,63 min
$T_3$	28,13 °C bei	18,63 min
$t_{3,2}$	434,45 sek	7,24 min bei 28,13 °C
$t_3$	1370,28 sek	22,84 min
<b>raumabschließende Funktion</b>	<b>54,88 min</b>	

Das Bauteil erfüllt die Feuerwiderstandsqualität **feuerhemmend**

### Eingabeblatt Simulationsergebnisse

Das Eingabeblatt besteht aus den vorgefertigten Spalten zur Eintragung der Werte aus dem Simulationsprogramm. Auf Wunsch können auch die entsprechenden Angaben zu den Minuten eingefügt werden. Die Datei ist derzeit jedoch nur auf die Entnahme der Sekundenzeiten ausgelegt.

Die Ergebnisse aus dem Simulationsprogramm können durch Kopieren und entsprechendes Einfügen in die Tabelle überführt werden. Sollte das Simulationsprogramm das Kopieren der Ergebnisdaten nicht ermöglichen, können vereinfacht auch nur die nächst kleineren und nächst größeren Werte zu den Daten der Grenzwertüberschreitung eingegeben werden. Diese reichen für die Ausführung der weiteren Schritte aus.

Ein Beispiel der vorgefertigten Tabelle zur Eintragung der Werte ist folgend aufgeführt.



# Anhang D: Excel-Sheet zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion

Ergebnisse der Simulationen											
1. Simulation											
brandbeanspruchte Bekleidung					Dämmebene						
Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur
1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20
2	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20
3	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20
4	0,029235	20	1,7541	0,029235	20	1,7541	0,029235	20	1,7541	0,029235	20
5	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20
6	0,03905	20	2,345	0,03905	20	2,345	0,03905	20	2,345	0,03905	20
7	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20
8	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20
9	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20
10	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20
11	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20
12	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20
13	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20
14	0,128215	20	7,6929	0,128215	20	7,6929	0,128215	20	7,6929	0,128215	20
15	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20
16	0,1833	20	10,998	0,1833	20	10,998	0,1833	20	10,998	0,1833	20
17	0,21245	20	12,747	0,21245	20	12,747	0,21245	20	12,747	0,21245	20
18	0,2656	20	15,936	0,2656	20	15,936	0,2656	20	15,936	0,2656	20
19	0,33185	20	19,911	0,33185	20	19,911	0,33185	20	19,911	0,33185	20
20	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20
21	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20
22	0,5815	20	34,89	0,5815	20	34,89	0,5815	20	34,89	0,5815	20
23	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20
24	0,59075	20	35,445	0,59075	20	35,445	0,59075	20	35,445	0,59075	20
25	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20
26	0,6	20	36	0,6	20	36	0,6	20	36	0,6	20
27	0,60925	20	36,555	0,60925	20	36,555	0,60925	20	36,555	0,60925	20
28	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20
29	0,65698333	20	38,219	0,65698333	20	38,219	0,65698333	20	38,219	0,65698333	20
30	0,65548333	20	39,329	0,65548333	20	39,329	0,65548333	20	39,329	0,65548333	20
31	0,69246667	20	41,548	0,69246667	20	41,548	0,69246667	20	41,548	0,69246667	20
32	0,72946667	20	43,768	0,72946667	20	43,768	0,72946667	20	43,768	0,72946667	20

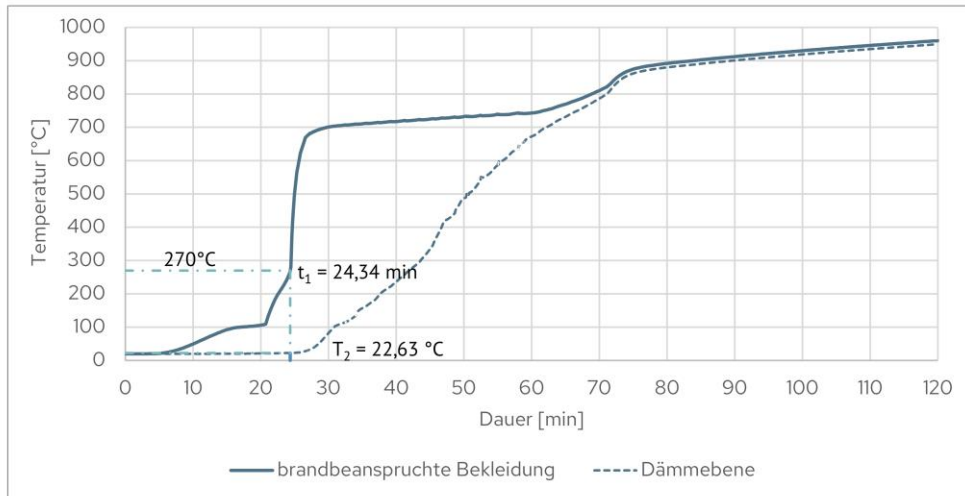
2. Simulation											
brandabgewandte Bekleidung					Dämmebene						
Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur
1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20
2	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20
3	0,02644667	20	1,5868	0,02644667	20	1,5868	0,02644667	20	1,5868	0,02644667	20
4	0,03067333	20	1,8404	0,03067333	20	1,8404	0,03067333	20	1,8404	0,03067333	20
5	0,03622667	20	2,1736	0,03622667	20	2,1736	0,03622667	20	2,1736	0,03622667	20
6	0,04255333	20	2,5532	0,04255333	20	2,5532	0,04255333	20	2,5532	0,04255333	20
7	0,049745	20	2,9847	0,049745	20	2,9847	0,049745	20	2,9847	0,049745	20
8	0,05790333	20	3,4742	0,05790333	20	3,4742	0,05790333	20	3,4742	0,05790333	20
9	0,06715167	20	4,0291	0,06715167	20	4,0291	0,06715167	20	4,0291	0,06715167	20
10	0,07763	20	4,6578	0,07763	20	4,6578	0,07763	20	4,6578	0,07763	20
11	0,08949667	20	5,3698	0,08949667	20	5,3698	0,08949667	20	5,3698	0,08949667	20
12	0,105015	20	6,3009	0,105015	20	6,3009	0,105015	20	6,3009	0,105015	20
13	0,12547333	20	7,5284	0,12547333	20	7,5284	0,12547333	20	7,5284	0,12547333	20
14	0,14858333	20	8,915	0,14858333	20	8,915	0,14858333	20	8,915	0,14858333	20
15	0,17428333	20	10,457	0,17428333	20	10,457	0,17428333	20	10,457	0,17428333	20
16	0,20465	20	12,279	0,20465	20	12,279	0,20465	20	12,279	0,20465	20
17	0,24438333	20	14,663	0,24438333	20	14,663	0,24438333	20	14,663	0,24438333	20
18	0,2841	20	17,046	0,2841	20	17,046	0,2841	20	17,046	0,2841	20
19	0,34085	20	20,451	0,34085	20	20,451	0,34085	20	20,451	0,34085	20
20	0,4067	20	24,402	0,4067	20	24,402	0,4067	20	24,402	0,4067	20
21	0,48873333	20	29,324	0,48873333	20	29,324	0,48873333	20	29,324	0,48873333	20
22	0,58993333	20	35,396	0,58993333	20	35,396	0,58993333	20	35,396	0,58993333	20
23	0,71085	20	42,651	0,71085	20	42,651	0,71085	20	42,651	0,71085	20
24	0,85961667	20	51,577	0,85961667	20	51,577	0,85961667	20	51,577	0,85961667	20
25	1,04573333	20	62,744	1,04573333	20	62,744	1,04573333	20	62,744	1,04573333	20
26	1,27186667	20	76,312	1,27186667	20	76,312	1,27186667	20	76,312	1,27186667	20
27	1,55153333	20	93,092	1,55153333	20	93,092	1,55153333	20	93,092	1,55153333	20
28	1,89183333	20	113,51	1,89183333	20	113,51	1,89183333	20	113,51	1,89183333	20
29	2,3105	20	138,63	2,3105	20	138,63	2,3105	20	138,63	2,3105	20
30	2,8385	20	170,31	2,8385	20	170,31	2,8385	20	170,31	2,8385	20
31	3,4665	20	207,99	3,4665	20	207,99	3,4665	20	207,99	3,4665	20
32	4,20483333	20	252,29	4,20483333	20	252,29	4,20483333	20	252,29	4,20483333	20

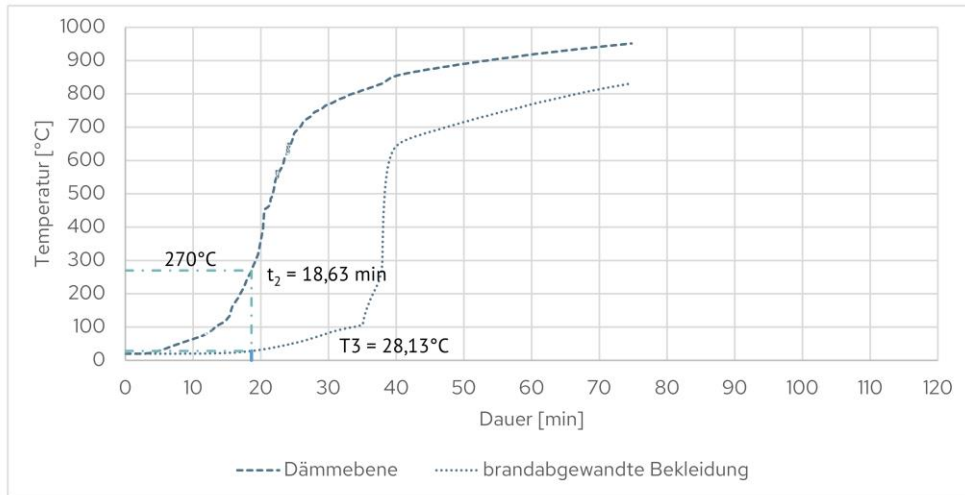
3. Simulation											
brandabgewandte Bekleidung					Temperatur						
Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur	Sekunden	Minuten	Temperatur
1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20	1	0,01666667	20
2	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20	1,3333	0,02222167	20
3	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20	1,5437	0,02572833	20
4	0,029235	20	1,7541	0,029235	20	1,7541	0,029235	20	1,7541	0,029235	20
5	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20	2,0285	0,03380833	20
6	0,03905	20	2,345	0,03905	20	2,345	0,03905	20	2,345	0,03905	20
7	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20	2,7022	0,04503667	20
8	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20	3,1112	0,05185333	20
9	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20	3,5755	0,05959167	20
10	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20	4,1008	0,06834667	20
11	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20	4,6936	0,07822667	20
12	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20	5,3605	0,08934167	20
13	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20	6,3188	0,10531333	20
14	0,128215	20	7,6929	0,128215	20	7,6929	0,128215	20	7,6929	0,128215	20
15	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20	9,2485	0,15414167	20
16	0,1833	20	10,998	0,1833	20	10,998	0,1833	20	10,998	0,1833	20
17	0,21245	20	12,747	0,21245	20	12,747	0,21245	20	12,747	0,21245	20
18	0,2656	20	15,936	0,2656	20	15,936	0,2656	20	15,936	0,2656	20
19	0,33185	20	19,911	0,33185	20	19,911	0,33185	20	19,911	0,33185	20
20	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20	25,735	0,42891667	20
21	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20	34,612	0,57686667	20
22	0,5815	20	34,89	0,5815	20	34,89	0,5815	20	34,89	0,5815	20
23	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20	35,167	0,58611667	20
24	0,59075	20	35,445	0,59075	20	35,445	0,59075	20	35,445	0,59075	20
25	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20	35,722	0,59536667	20
26	0,6	20	36	0,6	20	36	0,6	20	36	0,6	20
27	0,60925	20	36,555	0,60925	20	36,555	0,60925	20	36,555	0,60925	20
28	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20	37,109	0,61848333	20
29	0,65698333	20	38,219	0,65698333</							

**Grafische Darstellung der Ergebnisse der Simulationen**

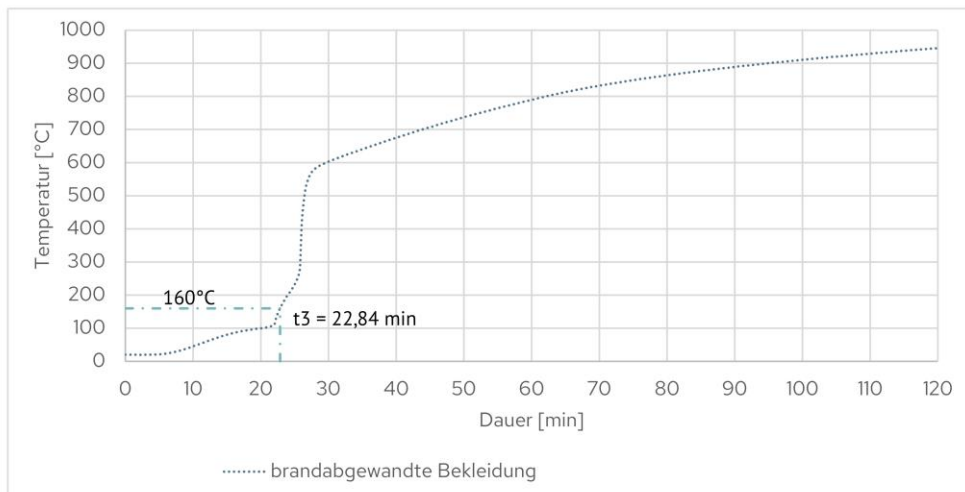
1. Simulation



2. Simulation



3. Simulation





Lebenslauf

## **Lebenslauf**

### **Ausbildung**

seit November 2020	Promotionsstudium an der RPTU Kaiserslautern-Landau, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Baulicher Brandschutz
Oktober 2016 – September 2018	Masterstudiengang Baulicher Brandschutz und Sicherheitstechnik am DISC der TU Kaiserslautern
Oktober 2015	Zertifikatslehrgang Brandschutzbeauftragte/r am DISC der TU Kaiserslautern
Oktober 2009 – Januar 2012	Masterstudium an der Fachhochschule Kaiserslautern, Studienrichtung Architektur
Oktober 2004 – August 2008	Bachelorstudium an der Fachhochschule Kaiserslautern, Studienrichtung Architektur

### **Berufserfahrung**

seit Oktober 2018	Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Baulicher Brandschutz der RPTU Kaiserslautern-Landau
seit Dezember 2009	Selbstständige Brandschutzsachverständige, Scheidel Ingenieure, Winnweiler

Veröffentlichungen

## Veröffentlichungen

### Veröffentlichungen

SCHEIDEL, SABINE; DIENST, SEBASTIAN; GÖTZ, TOBIAS; KORNADT, OLIVER:

Brandschutztechnisches Verhalten von raumabschließenden Holzrahmenkonstruktionen.  
Bauphysik 43 (2021), Heft 4, S. 211 – 221

SCHEIDEL, SABINE; DIENST, SEBASTIAN; KORNADT, OLIVER:

Anwendungsmöglichkeiten der neuen „Muster-Holzbaurichtlinie“ für Holzrahmenbauteile, in:  
Bauphysik 44 (2022) Heft 1, S. 40 – 45

SCHEIDEL, SABINE; DIENST, SEBASTIAN; GÖTZ, TOBIAS; KORNADT, OLIVER:

Berechnungsverfahren von Holzrahmenbauteilen mit brandschutztechnischer raumabschließender Funktion, in: Bauphysik-Kalender 2022: Holzbau. Herausgegeben von Nabil A. Fouad, S. 115 – 146

SCHEIDEL, SABINE; DIENST, SEBASTIAN; GÖTZ, TOBIAS; KORNADT, OLIVER:

Bauteiluntersuchung von Holzrahmenwänden mit Verwendung brennbarer Dämmstoffe, in:  
Bauphysik (45) 2023: Heft 3, S. 145 – 150

SCHEIDEL, SABINE; DIENST, SEBASTIAN; GÖTZ, TOBIAS; KORNADT, OLIVER:

Brandschutztechnische Bemessung einer raumabschließenden Holzrahmenbauwand anhand additiver Berechnungsmethoden, in: Bauphysik-Kalender 2024, Herausgegeben von Nabil A. Fouad, in processing

### Vorträge

SABINE SCHEIDEL:

Bauphysiktag Kaiserlautern 2022, Fachgebiet Bauphysik und Energetische Gebäudeoptimierung, TU Kaiserlautern, 29. März 2022

Untersuchung zur Genauigkeit additiver Berechnungsverfahren für raumabschließende Holzrahmenbauteile

## Veröffentlichungen

KORNADT, OLIVER; SCHEIDEL, SABINE

4. Fachkongress Holzbau in Hessen, Technische Hochschule Mittelhessen (THM), 08. September 2022,

Anwendungsmöglichkeiten der neuen „Muster-Holzbaurichtlinie“ für Holzrahmenbauteile

KORNADT, OLIVER; SCHEIDEL, SABINE

Vorstellung Fachgebiet Bauphysik und energetische Gebäudeoptimierung im Rahmen des Masterstudiengangs „Brandschutzplanung“ des DISC, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Standort Kaiserslautern, 24. Februar 2023

Forschungsprojekt raumabschließende Bauteile in Holzrahmenbauweise

SABINE SCHEIDEL:

Bauphysiktage Weimar 2024, Bauhaus-Universität Weimar, voraussichtlich 06./07. März 2024  
Brandverhalten von brennbaren Dämmstoffen durch Zumischung natürlicher Flammenschutzmittel – erste Ergebnisse der Vorversuche

Eidesstattliche Erklärung

## **Eidesstattliche Erklärung**

Sabine Scheidel, Hauptstraße 9, 67722 Winnweiler

Hiermit erkläre ich an Eides statt,

- dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig verfasst und alle von mir für die Arbeit benutzten Hilfsmittel in dieser angegeben, sowie die Anteile etwa beteiligter Mitarbeiter sowie anderer Autoren klar gekennzeichnet,
- dass ich die Dissertation oder Teile hiervon nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht und
- dass ich die gleiche oder eine andere Abhandlung nicht bei einem anderen Fachbereich oder an einer anderen Universität als Dissertation eingereicht habe.

Ich erkläre an Eides statt, dass meine Angaben der Wahrheit entsprechen und ich diese nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe.

Winnweiler, den 05.01.2024

---

Sabine Scheidel

Im Bauwesen sind in vielen Bereichen Nachweise erforderlich, um die Leistungen von Bauteilen, Systemen oder des Gebäudes zu bescheinigen. Brandschutznachweise können dabei in zwei unterschiedlichen Bereichen angefertigt werden. So können Brandrisiken, -gefahren oder -verläufe Bestandteil solcher Nachweise sein, aber auch Personenströme oder die allgemeine Erfüllung der Schutzziele durch die vorhandenen oder vorgesehenen Maßnahmen. Damit die Nachweisverfahren ein größtmögliches Maß an Genauigkeit bieten, müssen diese die Abläufe von Bränden und deren Wirkung auf die Bauteile und Baustoffe so genau wie möglich berücksichtigen. Jedes Nachweisverfahren ist daher mit den neuen Erkenntnissen über Brandverläufe und Temperaturentwicklungen zu validieren. Die Art der Nachweisführung ist dabei ebenso vielfältig wie der Gegenstand, für den diese erfolgt.

Die aktuellen Nachweismöglichkeiten für raumabschließende Holztafelbauteile anhand additive Berechnungsverfahren, wie sie in der DIN EN 1995-1-2:2010 aufgeführt sind, schließen, wie auch die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise, eine Ausführung von Holztafelbauteilen in Gebäudeklasse 5 Objekten nicht mit ein. Daher sind aktualisierte Nachweismethoden erforderlich, die die Feuerwiderstandsdauer eines Holzrahmenbauteils mit großer Genauigkeit bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von min. 90 Minuten aufzeigen können. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit das Nachweisverfahren der schichtweisen Bauteilsimulation entwickelt. Dieses beschreibt FEM-basierte, thermisch-transiente Simulationen, die über die grafische Benutzeroberfläche des Simulationsprogrammes ausgeführt werden können. Dabei werden die erforderlichen Schutz- und Isolationszeiten jeder Bauteilschicht einzeln ermittelt und anschließend unter Berücksichtigung einer Vorerwärmung durch vorangegangene Schichten aufaddiert. Validiert wurde das Verfahren anhand durchgeführter Brandversuche. Die Genauigkeiten des neuen Simulationsverfahren übertreffen dabei die der untersuchten Berechnungsverfahren deutlich. Zur sicheren Anwendung wird am Ende dieser Arbeit ein Leitfaden zur Durchführung der schichtweisen Bauteilsimulation aufgeführt.

---

**Rheinland-Pfälzische  
Technische Universität**

Kaiserslautern-Landau

Fachgebiet Bauphysik  
Energetische Gebäudeoptimierung

Paul-Ehrlich-Straße 29

67663 Kaiserslautern

+49 631 205 - 5470

---