

Abbrandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen

- Standardbeurteilungsverfahren -

Abschlussbericht vom 08.08.2025

zum Forschungsvorhaben
P 52-5-4.211-2071/21

Auftraggeber:

DIBt – Deutsches Institut für Bautechnik
P 52-5-4.211-2071/21

Forschungsstelle:

Technische Universität München
School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80333 München

Dr.-Ing. Michael Rauch
Dr.-Ing. Norman Werther
Tim Schleimer M.Sc.

Laufzeit: 01. Januar 2022 bis 15. Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Hintergrund des Forschungsvorhabens.....	6
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens.....	6
1.3	Methodik.....	7
1.4	Abgrenzung.....	8
2	Grundlagen zur Abbrandrate	9
2.1	Grundlagen zum Abbrand und Definitionen	9
2.1.1	Grundlagen zum Abbrand von Holz	9
2.1.2	Definition der Abbrandgrenze und Temperaturkriterium.....	9
2.2	Einflussgrößen auf die Abbrandrate	11
3	Grundlagen zur Bestimmung der Abbrandrate.....	12
3.1	Messungen des Abbrandes in der Literatur	12
3.1.1	Grundlagen aus der Literatur	12
3.1.2	Abbrandmessung an der HFM bis 2019.....	12
3.1.3	Angaben zum Abbrandverhalten im „Holz-Brandschutzhandbuch“	13
3.1.4	Bestimmung des Abbrandverhaltens unterschiedlicher Autoren	14
3.2	Unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des Abbrandes	20
3.2.1	Abgrenzung	20
3.2.2	Diskrete Messmethoden – Bestimmen des Restquerschnittes.....	21
3.2.3	Kontinuierliche Messmethoden – Abgrenzung direkt und indirekte Methoden ...	23

3.2.4	Kontinuierliche Messmethoden – Direkte Messung über eingesetzte Abbrandkörper.....	23
3.2.5	Kontinuierliche Messmethoden – Direkte Messung über Keramiklanzen	24
3.2.6	Kontinuierliche Messmethoden – Indirekte Messung über die Temperatur	25
3.2.7	Indirekte Messung durch Dokumentation des Sauerstoffverbrauchs.....	27
3.3	Vergleich unterschiedlicher Messverfahren des Restquerschnittes	28
3.3.1	Händische Messung des Restquerschnittes	28
3.3.2	Digitale Messung des Restquerschnitts – Grundlagen.....	29
3.3.3	Photogrammetrie mittels Foto- oder Videoaufnahme:	29
3.3.4	LiDAR.....	30
3.3.5	Structured Light-Technik (Laserscan)	31
3.3.6	Terrestrisches Laser Scanning	31
3.3.7	Auswertung der Messergebnisse für den Restquerschnitt	31
3.4	Methoden zur Bestimmung der Abbrandrate	32
3.4.1	Grundlagen.....	32
3.4.2	Methode über die diskrete Messung des Restquerschnittes	33
3.4.3	Methoden zur Bestimmung der Abbrandrate mittels Thermoelemente im Probekörper.....	36
3.4.4	Vergleich der Methoden.....	39
3.5	Ergebnisse aus der Literatur und Vergleich	40
4	Experimentelle Untersuchung.....	57
4.1	Versuchskonzept.....	57

4.2	Untersuchungen Teil-8-Versuche	60
4.2.1	Prüfeinrichtungen	60
4.2.2	Probekörper.....	62
4.2.3	Versuchsdurchführung.....	64
4.2.4	Versuch V1 (PK 1): Referenzversuch	66
4.2.5	Versuch V2 (PK 2.1 und 2.2): Einfluss der Prüfkörperanzahl	73
4.2.6	Versuch V3 (PK 3.1 und 3.2): Einfluss der Temperatursteuerung im Prüfofen ...	80
4.2.7	Versuch V4 (PK 4.1 und 4.2): Einfluss des Prüfkörpermaterials	90
4.2.8	Allgemeines zu den Versuchen an der MPA Stuttgart.....	95
4.2.9	Versuch V5 (PK 5): Einfluss des Prüfofens.....	98
4.2.10	Versuch V6 (PK 6): Einfluss des Prüfofens und des Prüfkörpermaterials.....	103
4.2.11	Versuch V7 (PK 7): Einfluss der Prüfkörperorientierung	107
4.2.12	Versuche V10, V10 und V11.....	113
4.3	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	113
5	Auswertung und Interpretation der experimentellen Ergebnisse hinsichtlich der Einflussfaktoren auf den Abbrand	115
5.1	Ofengeometrie und Maßstabeffekte.....	115
5.2	Ausrichtung des Probekörpers	115
5.3	Dauer und Art der Brandbeanspruchung	116
5.4	Sauerstoffgehalt im Brandraum	119
5.5	Messmethoden des Restquerschnittes	119
5.6	Statistische Auswertemethode zur Messung mittels Thermoelemente	120

6	Prüfmethode nach prEN 1995-1-2	122
6.1	Beschreibung der Methodik	122
6.2	Optimierung der Messmethode nach prEN 1995-1-2	122
6.3	Bestimmung des Abbrandes über den Restquerschnitt	123
7	Zusammenfassung	125
8	Ausblick	126
9	Abbildungsverzeichnis	127
10	Tabellenverzeichnis	133
11	Literaturverzeichnis	136

1 Einleitung

1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Für die brandschutztechnische Beurteilung von Holzbauteilen und Holzbaukonstruktionen stellt das Abbrand- und Durchwärmverhalten eine der wohl wichtigsten Kenngrößen dar. So bildet in nationalen und internationalen Bemessungsnormen, wie z.B. der DIN 4102-4 [1] oder EN 1995-1-2 [4] die Abbrandrate die Grundlage zur Ermittlung des Restquerschnittes und beschreibt für eine Normbrandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) die lineare zeitabhängige Querschnittsreduktion durch den Abbrand unter Berücksichtigung der Bildung einer Holzkohleschicht. Des Weiteren bildet die Abbrandgrenze die Grundlage zur Erfassung der thermisch bedingten Erwärmung des Restholzquerschnittes und somit auch die Basis für die weiterführende Reduktion der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften in der Tragfähigkeitsbeurteilung brandbeanspruchter Holzbauteile [27]. Gleichzeitig wird mittels der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen der schützende Beitrag von Bekleidungslagen zum Feuerwiderstand eines Holzbauteils beurteilt.

Entsprechende Kenngrößen zur Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen wurden auf Basis zahlreicher Untersuchungen der letzten Dekaden [43], [31], [15], [19], [58], [31] in normativen Standards als Grundwert der eindimensionalen Abbrandrate β_0 festgehalten [4], [10].

In diesen Betrachtungen zeigt sich jedoch ebenso, dass das Abbrand- und Durchwärmverhalten von brandbeanspruchten Holzbauteilen durch interne und externe Größen beeinflusst wird [54], die innerhalb einer versuchstechnischen Beurteilung zu definieren und zu dokumentieren sind. Nur so sind vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten. Als wesentliche Lücke in diesem Zusammenhang stellt sich das Fehlen eines normativen Standards heraus, der die Methodik zur Bestimmung der Abbrandrate für Holz und Holzwerkstoffe erfasst. Besonders für neue Holz- und Holzwerkstoffe wurden in jüngster Vergangenheit deutlich variierende Abbrandraten für vergleichbare oder gleiche Produkte festgestellt [59] und in Verwendbarkeitsnachweise übernommen.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, auf Basis bestehender Ansätze ein Verfahren zur Bestimmung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen als Grundlage für bauaufsichtliche Ver-/Anwendbarkeitsnachweise und Bemessungsnormen zu erarbeiten. Hierbei soll ermöglicht werden, das mittels des gleichen Prinzips Holz, Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe beurteilt werden können. Dieser Ansatz soll in einem ersten Schritt in den informativen Anhang innerhalb der Überarbeitung

der EN 1995-1-2 aufgenommen und anschließend innerhalb eines Mandates im TC127 weiterbearbeitet werden.

Dadurch soll eine geregelte und vergleichbare Beurteilungsgrundlage für eine Standardisierung im Bereich der Bestimmung der Abbrandrate für Holz, Vollholzprodukten und Holzwerkstoffen festgelegt und eine Integration neuer Produkte innerhalb der Bemessungssystematik der EN 1995-1-2 ermöglicht werden.

Das Forschungsprojekt leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Schaffung einer Grundlage für einen europäischen Prüfgrundsatz zur geregelten Markteinführung neuer Hölzer und Holzwerkstoffe und damit zur weiteren Standardisierung im Bauwesen sowie zur weiteren Verbreitung und Anwendung von Holz und Holzprodukten als Baustoff.

1.3 Methodik

Trotz der Erfahrung aus den vorgenannten Methoden sowie den verfügbaren baustoffneutralen Prüfstandards im Nachweis des Feuerwiderstandes, wie in DIN 4102-2 [6] oder der DIN EN 1363 [7] Reihe, sind zahlreiche Fragestellungen im Hinblick auf die Erarbeitung eines allgemeinen Prüfstandards zur Bestimmung der Abbrandrate als auch zum Anwendungsbereich der Prüfergebnisse nicht bzw. nicht abschließend geklärt. Ebenso steht ein ganzheitlicher Vorschlag, der sowohl eine Anwendung auf Vollholzprodukte als auch Holzwerkstoffe erlaubt aus. Als Grundlage für ein allgemein anwendbares Verfahren zur Beurteilung der Abbrandrate sollen die beiden vorgenannten versuchstechnischen Ansätze und daraus abgeleitete Erkenntnisse dienen.

Der im Projekt verfolgte Ansatz umfasst neben der Nutzung bestehender Versuchsergebnisse und Erfahrungen vor allem den experimentellen Nachweis auf Basis gezielter Brandversuche im Hinblick auf die vorgenannten Fragestellungen. Diese Versuche können nach Abschluss des Projektes auch als Grundlage zur Validierung von Materialkennwerten und weiterführenden Analysen, wie beispielsweise numerischer Simulationen zur ergänzenden Grenzbetrachtung und Parameterstudien genutzt werden.

1.4 Abgrenzung

Die nachfolgende Untersuchung begrenzt sich auf eine Abbrandrate für Holz und Holzwerkstoffe, ermittelt unter einer Beanspruchung durch die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK), welche gleichermaßen die Grundlage für die Bemessungsmodelle nach [4] oder [10] darstellt. Aufgrund des begrenzten Zeit- und Kostenrahmens wurden alle experimentellen Untersuchungen in Brandprüföfen in Anlehnung an DIN 4102-8 [3] durchgeführt, den einzigen normativ geregelten "Kleinbrandofen". Die Prüfbedingungen, wie der Ofendruck und die Ofensteuerung wurden in Anlehnung an die DIN EN 1363-1 [7] gewählt, da es sich hierbei um die inzwischen üblich angesetzten und strengeren Anforderungen hinsichtlich des Ofendrucks sowie der Beanspruchung im Vergleich zu den Randbedingungen der DIN 4102-8 [3] handelt.

2 Grundlagen zur Abbrandrate

2.1 Grundlagen zum Abbrand und Definitionen

2.1.1 Grundlagen zum Abbrand von Holz

Der Abbrand von Holz und Holzwerkstoffen ist ein exothermer Verbrennungsprozess unter der Beteiligung des umgebenden Sauerstoffes sowie der brennbaren Feststoffe des Holzes. Dieser exotherme Prozess benötigt Anfangs eine Zuführung von Wärmeenergie und ggf. eine Zündquelle. Bei der Zuführung der Wärmeenergie wird der brennbare Feststoff in einer endothermen Reaktion in den gasförmigen Zustand überführt – dieser Prozess wird als Pyrolyse bezeichnet – und reagiert dann zusammen mit dem vorhandenen Sauerstoff in einem exothermen Verbrennungsprozess. Im Pyrolyseprozess entsteht an der Holzoberfläche die Holzkohle sowie die brennbaren Pyrolysegase, die in der gemeinsamen Reaktion mit dem Sauerstoff wiederum notwendige Wärmeenergie zur Verfügung stellen, um den Pyrolyseprozess selbständig weiter aufrecht zu erhalten. Die detaillierten chemischen und physikalischen Prozesse wurden bereits umfassend in der Literatur [31], [43], [54] untersucht.

2.1.2 Definition der Abbrandgrenze und Temperaturkriterium

Die Grenze zwischen der Holzkohleschicht und dem nicht verkohlten, aber braun gefärbten Holz wird als Abbrandgrenze definiert (vgl. Abbildung 2-1). Neben der Verfärbung und Struktur weist die Holzkohleschicht eine reduzierte Dichte auf, wodurch eine Abgrenzung zum einen optisch, zum anderen über die Dichte (ca. auf 80 % reduziert) erfolgen kann. Abhängig von den Holzarten und der Untersuchungsmethodik kann die Abbrandgrenze abhängig von der im Bauteil herrschenden Temperatur angegeben werden. Diese liegt, basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche nach Werther [54], zwischen 200 °C und 360 °C. Normativ wird nach DIN EN 1995-1-2 [4] und nach prEN 1995-1-2 [5] eine Abbrandgrenze von 300 °C definiert. Hinter dieser Abbrandgrenze ist im Bemessungsmodell der thermisch beeinflusste Bereich des Holzes mit reduzierten, temperaturabhängigen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften weiterführend zu berücksichtigen. Dieser thermische beeinflusste Bereich gehört nicht mit zum Abbrand. Ein Vorschlag für das Temperaturprofil hinter der Abbrandgrenze kann beispielsweise Schaffer [43] (vgl. Abbildung 2-2) entnommen werden.



Abbildung 2-1: Darstellung der Abbrandgrenze [54]

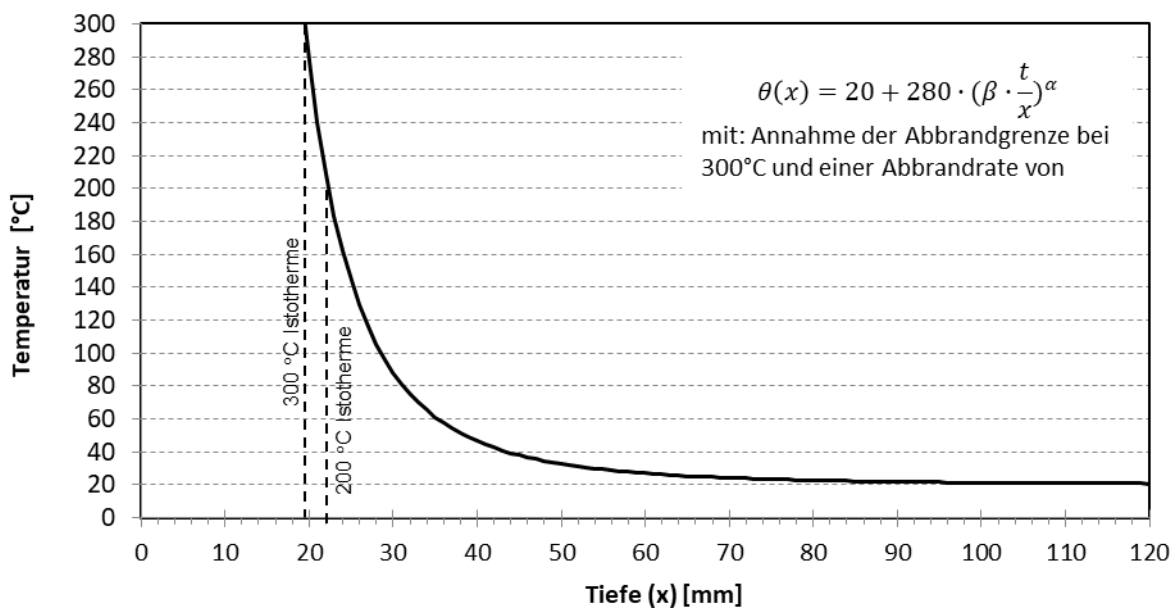


Abbildung 2-2: Temperaturprofil hinter der Abbrandgrenze in Anlehnung nach einer Brandbeanspruchung von 30 Minuten unter der Annahme einer Abbrandgrenze bei 300 °C (Modifikation der Gleichung von Scheer [8] auf Basis von prEN1995-1-2 [5]).

Das hohe Temperaturgefälle hinter der angenommenen Abbrandgrenze von 300 °C führt dazu, dass die Wahl des Temperaturkriteriums für die Lage der Abbrandgrenze im Holz nur einen geringen Einfluss auf die Abbrandtiefe hat, 300 °C werden bei einer angenommenen Abbrandrate von 0,65 mm/min (bezogen auf die 300 °C Isotherme) nach 19,5 mm erreicht, 200 °C bereits in einer Tiefe von 22,3 mm (vgl. Abbildung 2-2). Basierend auf den normativen Grundlagen der aktuellen DIN EN 1995-1-2 [4] sowie der zukünftigen prEN 1995-1-2 [5] wird die Abbrandgrenze $d_{char,n}$ in dieser Untersuchung mit der Lage der 300 °C Isotherme gleichgesetzt.

2.2 Einflussgrößen auf die Abbrandrate

Bereits in der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Abbrandgeschwindigkeit durchgeführt und 1992 an der Holzforschung München, durch Lache [31] zusammengestellt und erweitert (vgl. Abbildung 2-3). Bereits damals war es das Ziel, die Reproduzierbarkeit der Versuche zu ermöglichen und eine mögliche Prüfmethodik zur Bestimmung der Abbrandrate von Holz anzugeben.

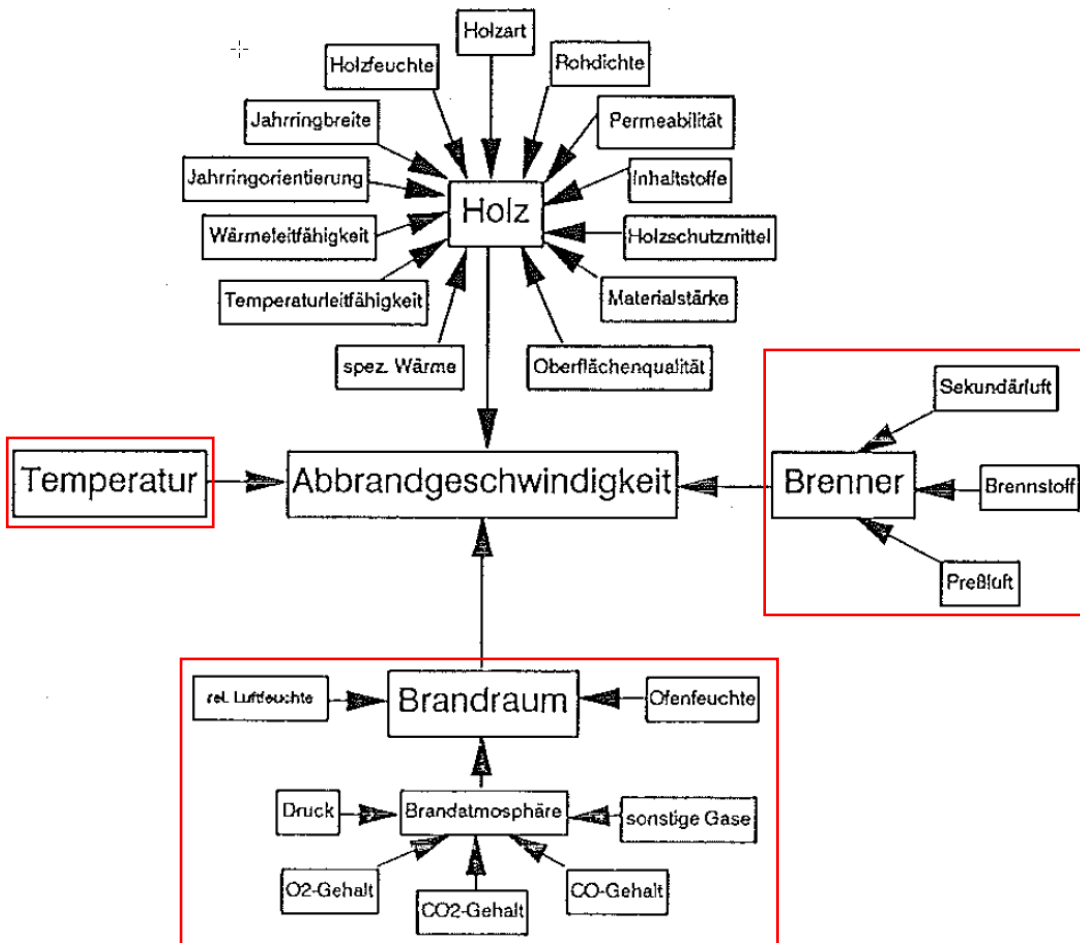


Abbildung 2-3: Einflussfaktoren auf die Abbrandgeschwindigkeit nach Lache [31]. Externe, vom Holz unabhängige Einflussfaktoren sind rot umrandet.

Neben den in Abbildung 2-3 dargestellten Einflussfaktoren des Holzes, die in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet werden, hat die Art der Beanspruchung (Temperatur), der Brenner sowie der Brandraum einen maßgebenden Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit (in Abbildung 2-3 rot umrandet). Die Art der Messmethodik sowie die statistische Auswertung beeinflussen nicht die reale Abbrandgeschwindigkeit, aber dennoch das aus den experimentellen Untersuchungen resultierende Ergebnis maßgeblich. Somit dürfen diese Einflussfaktoren bei der finalen Bestimmung der Abbrandrate nicht vernachlässigt werden.

3 Grundlagen zur Bestimmung der Abbrandrate

3.1 Messungen des Abbrandes in der Literatur

3.1.1 Grundlagen aus der Literatur

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der in der Literatur durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung von Abbrandraten und zur Methodik der Bestimmung von Abbrandraten. Bereits 2016 wurde in einem Forschungsvorhaben eine zusammenfassende Historie der Abbrandmessungen an der HFM¹ zusammengestellt [16]. Zu Beginn dieses Kapitels werden in Abs. 3.1.2 die Ergebnisse dieses Vorhabens kurz dargestellt und erweitert sowie nachfolgend in Abs. 3.1.4 die Ergebnisse unterschiedlicher Autoren aufbereitet und verglichen.

3.1.2 Abbrandmessung an der HFM¹ bis 2019

Eine zusammenfassende Historie zur Messung des Abbrandverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen an der HFM-TUM wurde im Report T 3339 [16] bereits 2016 dargestellt. Hierfür wurden die an der HFM vorhandenen Prüfberichte aus Versuchen der letzten 25 Jahre recherchiert (im Gesamten 323 Versuche zum Thema Abbrandmessung) und basierend darauf eine Empfehlung für einen Prüfvorschlag erarbeitet. Zusammenfassend können folgende Ergebnisse aus diesem Bericht abgeleitet werden:

- Zur Bestimmung des Abbrandverhaltens wurde meist die Messmethode über den Restquerschnitt nach Versuchsende angewandt. Alternativ oder Ergänzen hierzu wurden kontinuierliche Messungen des Abbrandes mittels Sonden (z.B. Wolframsonden), über Temperaturmessungen mit Thermoelementen sowie über Austauschkörper durchgeführt (vgl. Abs. 3.1.2).
- Es wurden Abbrandwerte aus unbelasteten Versuchen im Kleinprüfstand mit Ölzerstäubungsbrenner nach DIN 4102-8 [3] (vgl. Abbildung 3-1) und im Wandprüfstand (ebenfalls mit Ölbrenner) nach DIN EN 1364-1 [8] (vgl. Abbildung 3-2) der Holzforschung München untersucht, wobei der Wandprüfstand hinsichtlich der betrachteten Versuche eine untergeordnete Rolle spielt.

¹ HFM: Holzforschung München



Abbildung 3-1: Kleinbrandprüfstand der HFM



Abbildung 3-2: 3 x 3 m Wandprüfstand der HFM

- Des Weiteren wurde eine Übersicht über die für die Industrie (seit 1993) und Forschung (seit 1984) durchgeführten Arten von Abbrandmessungen an der HFM dargestellt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Messung des Abbrandverhaltens von Holz- und Holzwerkstoffen. Üblicherweise wurden in den unterschiedlichen Versuchen verschiedene Holzarten, Holzwerkstoffe oder der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf den Abbrand der Materialien untersucht, nicht aber die Art der Messmethode.
- 2012 wurden durch Zellner [60] verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Abbrandrate verglichen und ein neues Verfahren der zerstörungsfreien Messung mittels Ultraschalls betrachtet.

3.1.3 Angaben zum Abbrandverhalten im „Holz-Brandschutzhandbuch“

Neben den Untersuchungen an der HFM wurden in der Vergangenheit Abbrandmessungen an Holz durchgeführt und die Ergebnisse in der ersten Auflage des Holz- Brandschutzhandbuches [30], als Grundlage für die Überarbeitung der DIN 4102-4, vorgestellt. Hier wurde die mittlere Abbrandtiefe, abhängig von der Zeit ermittelt und eine Abbrandrate abgeleitet. In Abs. 2.4.2 des Holz-Brandschutzhandbuches wird darauf hingewiesen, dass eine Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit aus dem bei Beflammungsende gemessenen Abbrand- bzw. Verkohlungstiefen als hinreichen genau erachtet wird. Eine genaue Methode, wie der Restquerschnitt gemessen, oder die Holzkohle entfernt wurde, ist nicht angegeben. Für Holzwerkstoffe wurden hier ebenfalls Abbrandraten bestimmt, die in der Regel über die Durchbrandzeiten (ein Versagen des normativen Raumabschlusskriteriums E) ermittelt wurde.

3.1.4 Bestimmung des Abbrandverhaltens unterschiedlicher Autoren

Nachfolgend werden die Ergebnisse und Verfahren in der Bestimmung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen unterschiedlicher Autoren zusammengefasst dargestellt.

Schaffer (1967) [43]

Schaffer untersuchte im Jahr 1967 Prüfkörper aus Douglasie ($L \times B \times H = 254 \times 508 \times 76 \text{ mm}$) in vertikaler Ausrichtung in einem gasbetriebenen Prüfofen, beansprucht nach der Normbrandkurve entsprechend ASTM E 119. Der Abbrand wurde über senkrecht zur Isotherme eingebrachte Thermoelemente (Typ K) gemessen. Die Abbrandgrenze wurde bei 288°C festgelegt.

Mikkola (1990) [35]

Abweichend von einer EKT-Beanspruchung untersuchte Mikkola (1990) über 50 Proben aus verschiedenen Hölzern und Holzwerkstoffen im Cone-Kalorimeter. Das Verfahren zur Abbrandmessung wurde nicht genauer beschrieben, allerdings lagen die ermittelten Abbrandraten über den unter ETK-bestimmten Abbrandraten.

Lache (1992) [31]

In seiner Dissertation untersuchte Lache [31] den Abbrand unterschiedlicher Holzarten (Fichte, Kiefer (Splint- und Kernholz), Eiche, Buche und Meranti) am Kleinprüfstand nach DIN 4102-8. Der Abbrand wurde einerseits durch die manuelle Messung des Restquerschnitts und andererseits durch die Messung über Sonden bestimmt. Genauere Informationen zum Arbeitsdruck der Sonden je Holzart, verwendeten Geräten usw. findet sich in Lache [31]. Die manuelle Messung wurde in Probenmitte an 6 Stellen im Abstand von $20\text{--}30 \text{ mm}$ gemessen. Die Proben wurden nach ETK für 30, 60 oder 90 min beansprucht.

Lache (1992) [32]

Ergänzend zu vorbenannten Untersuchungen hat Lache Versuche nach DIN 4102-8 an Span- und Sperrholzplatten durchgeführt. Für die 40 mm dicken Probekörper wurde nach 30 min ETK-Beanspruchung der Abbrand über den Restquerschnitt bestimmt.

Huntierová (1995) [26]

Huntierová analysiert unterschiedliche Holzwerkstoffplatten (Spanplatten unterschiedlicher Rohdichte, Buchen-Sperrholz, Fichten-Schichtholz und Fichten-Massivholz) im Kleinprüfstand nach DIN

4102-8 unter ETK- Beanspruchung. Der Abbrand wurde mittels Messsonden und manueller Messung des Restquerschnittes bestimmt (bei der Massivholzplatte wurden ergänzende Austauschkörper eingebracht). Die Prüfkörper wurden mit CO₂ abgelöscht.

HfM Bericht Nr. 954 136 (1995) [12]

Die Firma Blomberger Holzindustrie ließ 2 PK aus Multiplexplatten (Buche, L x B x H = 520 x 520 x 32 mm) auf ihr Abbrandverhalten untersuchen. Nach 30-minütiger Brandbeanspruchung (ETK) in einem Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 wurden die vertikal eingebauten Prüfkörper mit CO₂ abgelöscht und der Restquerschnitt manuell gemessen.

White et al. (1996) [57]

In einem Cone-Kalorimeter ähnlichen Prüfgerät, dem OSU-Apparat (Ohio State University-Apparat) untersuchte White unterschiedliche Holzarten (Redwood, Kiefer, Roteiche und Linde) auf deren Abbrandverhalten. Der Abbrand wurde abhängig von der Temperatur über Thermoelemente (Typ K) gemessen.

HfM Bericht Nr. 944 080 [13] und Nr. 954 054 [14] (1998)

Zur Untersuchung des Abbrandverhaltens von Anleimern an Türen der Firma Schörghuber wurden an der HfM verschiedene Holzarten (Weißbuche, Rotbuche, Eiche, Kiefer, Meranti) auf ihr Abbrandverhalten untersucht. Die einzelnen Anleimer (L x B x H = 600 x 32 x 44 mm) und wurden nebeneinander auf eine 3 mm dicke Hartfaserplatte geklebt und die Abbrandrate durch eine Messung des Restquerschnittes ermittelt. Die Proben wurden nach dem Brandversuch mit CO₂ abgelöscht.

Tsantaridis et al. (1998) [53]

Tsantaridis et al. (1998) verglich eine Beanspruchung im Cone-Kalorimeter (50 kW/m²) für 30 min bis 120 min mit den Ergebnissen einer Brandprüfung unter EKT-Beanspruchung, um den Einfluss von schützenden Gipsbekleidungen zu untersuchen und den dahinterliegenden Abbrand zu messen. Als Abbrandgrenze wurde die 300 °C Isotherme in der Auswertung der eingebrachten Thermoelemente genutzt.

König et al. (1999) [29]

König untersuchte den Abbrand von Massivholzlamellen (L x B x H = 1000 x 45 x 95 mm), die horizontal in einem Kleinbrandofen unter ETK-Bedingungen beansprucht wurden. Der Abbrand wurde

über senkrecht zur Isotherme eing Bohrten Thermoelemente im Probekörper gemessen und anhand der 300 °C Isotherme definiert. Diese Versuchsergebnisse flossen maßgebend in die Entwicklung des EC 5 (ENV 1995-1-2: 1997) ein.

White (2000) [56]

White (2000) untersuchte die Abbrandrate von 12 Probekörpern im Kleinmaßstab von verschiedenen Holzwerkstoffplatten. Beansprucht wurden die Probekörper nach ASTM E 119 und die Abbrandgrenze wurde über die 300 °C Isotherme definiert.

Lingens (2003) [33]

Lingens untersuchte das Abbrandverhalten unterschiedlicher Holzarten (Fichte, Kiefer, Lärche, Buche, Ahorn und Eiche) am Kleinprüfstand nach DIN 4102-8. Der Abbrand wurde kontinuierlich mittels Sonden und über die Methode mittels Restquerschnitt, gemessen nach Versuchsende an mehreren Stellen, bestimmt.

Fornather (2003) [22]

Fornather untersuchte in seiner Dissertation den Abbrand von Holz (Ficht) im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8. Für diese Untersuchung werden nur Versuche nach ETK- Beanspruchung betrachtet und verglichen. Neben dem Kleinprüfstand an der Holzforschung in München wurden weitere Versuche mit vergleichbaren Probekörpern in Wien durchgeführt. Der Abbrand wurde in München über Messsonden und händischer Messung des Restquerschnittes nach der Brandprüfung, in Wien über eine Messung des Restquerschnittes ermittelt.

Njankouo et al. (2004) [36]

Njankouo untersuchte den Abbrand von 20 BSH-Prüfkörpern ($L \times B \times H = \text{ca. } 250 \times 140 \times 90 \text{ mm}$) verschiedener Hölzer. Der Abbrand wurde über senkrecht zur Isotherme eingebrachte Thermoelemente gemessen und die Abbrandgrenze über die 300 °C Isotherme definiert.

Schleifer et al. (2007) [45]

Zur Entwicklung der „Separating Function Method) untersuchten Schleifer Massivholz- sowie Holzwerkstoffplatten. Der Abbrand wurde durch Messen des Restquerschnitts sowie bei dünnen Platten mittels Thermoelemente und Ermittlung der 300 °C Isotherme bestimmt.

Schröck (2010) [49]

Schröck untersuchte den Einfluss verschiedener Brandschutzlacke auf das Abbrandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen für 30 min nach ETK beansprucht. Die Abbrandmessung erfolgte mithilfe von Sonden und nach Versuchsende durch manuelle Messung des Restquerschnittes.

Zellner (2011) [60]

Zellner untersuchte im Rahmen seiner Masterarbeit das Abbrandverhalten von Holzwerkstoffplatten (Spanplatten, eine OSB-, eine BSP- und eine BSH-Platte) im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8. Der Abbrand wurde mithilfe von Sonden und manueller Restquerschnittsmessung bestimmt. Bei der Messung mit Sonden wurde durch ein „Verrutschen“ der äußeren Sonden in die Klebefugen zu hohe Abbrandraten gemessen.

Fischer et al. (2012) [22]

Fischer untersuchte das Abbrandverhalten vertikal orientierter Massivholzplatten und Holzwerkstoffe im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8. Hierfür wurde der Abbrand von Spanplatten unterschiedlicher Rohdichte und Dicke (31, 33, 42, 42 und 60 *mm*), OSB-Platten (22 *mm*) und Massivholzplatten (Buche und Eiche, 42 *mm* und 49 *mm*) unter ETK-Beanspruchung über eine Messung des Restquerschnittes und mit äußeren Sonden bestimmt.

Werther (2016) [54]

Werther untersuchte in seiner Dissertation massive Brettschichtholzbalken im Kleinbrandprüfstand nach DIN 4102-8 unter ETK- Beanspruchung. Die Abbrandmessung erfolgte mit Thermoelementen (Typ K) im Abstand von 12 mm, die parallel zur Isotherme eingebohrt wurden. Die Abbrandgrenze wurde über die 300 °C-Isotherme definiert.

Fahrni et al. (2017) [18]

Brandversuche von biegebelasteten Brettschichtholzträgern (Fichte, Festigkeitsklassen GL24h und GL36h) wurden durch Fahrni et al. durchgeführt. Die Prüfkörper wiesen eine Abmessung von ca. L x B x H = 3800 x 157 x 250 *mm* auf. Die Bauteile wurden dreiseitig nach ETK für 44 *min* bis 58 *min* beansprucht. Der Restquerschnitt der Holzträger wurde durch Photogrammetrie und Section Scanning bestimmt.

Fahrni et al. (2018) [19]

Um den Einfluss des Einbringens von Thermoelementen auf die Temperaturmessung zu untersuchen, verglichen Fahrni die Ergebnisse unterschiedlich installierter Thermoelemente in Massivholz. Die Prüfung fand in einem Kleinbrandofen (Abmessungen ca. 1000 x 1000 mm) horizontal ausgerichtet statt. Die senkrecht zur Isotherme eingebohrten Thermoelemente lieferten im Vergleich zu parallel eingebauten Thermoelementen niedrigere Temperaturen und geringere Abbrandraten. Somit bestätigt er die Empfehlung, Thermoelemente parallel zur Isotherme einzubauen.

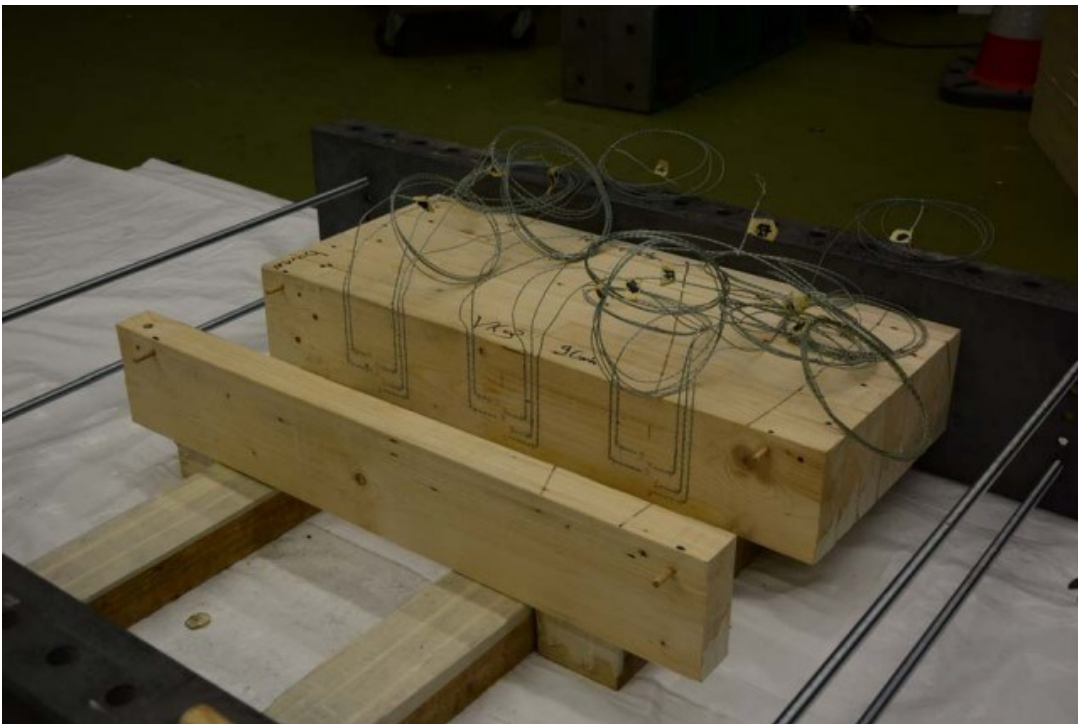


Abbildung 3-3: Prüfkörpervariante mit Thermoelementen, im Messbereich parallel zur Isotherme geführt (während der Produktion eingelegt) (entnommen aus [20])

Martinka et al. (2018) [34]

Martinka (2018) untersuchte Kleinproben aus Kiefer und Fichte (je $L \times B \times H = 100 \times 100 \times 50 \text{ mm}$) in einem Cone-Kalorimeter mit Wärmestromdichten von 20 bis 50 kW/m^2 für 10 bis 30 Minuten Beanspruchung. Nach dem Ablöschen unter Wasser und Trocknen wurde der Restquerschnitt gemessen. Die ermittelten Abbrandraten (z.B. $1,2 \text{ mm/min}$ für Fichte) liegen über den Abbrandraten, gemessen an Brandprüfkörpern und ETK-Beanspruchung.

Wörle (2019) [58]

Basierend auf den Untersuchungen an der Holzforschung München (HFM) (vgl. Abs. 3.1.2) erweiterte Wörle in ihrer Masterarbeit die Untersuchung des Abbrandverhaltens von Holzwerkstoffplatten. Die Brandprüfungen wurden im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 an der HFM durchgeführt. Der Abbrand wurde durch Messen des Restquerschnittes nach dem Ablöschen (Wasser-Sprühnebel) bestimmt.

Engel et al. (2020) [17]

Engel untersuchte das Abbrandverhalten von unterschiedlichen Materialien (Buche, Fichte, Esche, Eiche) als Brettschichtholz, Furnierschichtholz oder Vollholz anhand von 42 Probekörpern im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8. Die Beanspruchung erfolgte nach ETK und Naturbrand und der Abbrand wurde mit Hilfe von Thermoelementen (Typ K, installiert parallel zur Isotherme) gemessen. In dieser Untersuchung wurde neben den direkt gemessenen Abbrandraten auch eine Modifikation der Einwirkungstemperatur im Vergleich zur Messung mit einem Plate-Thermoelement vorgenommen. Das Mitbrennen des Probekörpers führte zu einer höheren Temperatur direkt am Probekörper im Vergleich zur Messung der Temperaturen im Brandofen. Somit wurde diese höhere Temperatur durch eine zur ETK äquivalente längere Zeitdauer berücksichtigt.

Goth (2021) [24]

Goth führte im Rahmen ihrer Masterarbeit vier Versuche zur Untersuchung des Abbrandverhaltens von Holzwerkstoffplatten (MDF; Span-, Sperrholz und Furnierschichtholzplatten) im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 durch. Die Platten waren zwischen 15 *mm* und 38 *mm* dick und mit Holzwerkstoffplatten hinterlegt. Durch die geringe Dicke der Platten wurde die Abbrandrate aus der Zeit bis zum Erreichen der 300 °C Isotherme auf der Plattenrückseite ermittelt.

Terrei et al. (2021) [50]

Weitere Untersuchungen im Cone-Kalorimeter wurden durch Terrei et al. (2021) durchgeführt. Hier wurde eine neue Methodik zur Temperaturmessung mittels dünner Thermoelemente (Ø 0,1 mm) durchgeführt. Die Ergebnisse aus dem Cone-Kalorimeter werden aufgrund der wesentlich höheren Abbrandraten (vgl. Mikkola) nicht weiter betrachtet. Ursächlich für die höhere Abbrandrate ist dabei jedoch der Abbrand in einer sauerstoffgesättigten Umgebung, die im Rahmen von Untersuchungen im Brandofen so nicht vorliegt.

Fahrni et al. (2021) [21]

Fahrni untersuchte in 4 Probekörpern aus Fichte ($L \times B \times H = 961 \times 770 \times 158 \text{ mm}$) den Abbrand bei Branddauern zwischen 30 *min* und 120 *min*. Die Abbrandmessung erfolgte hier mithilfe von parallel zur Isotherme eingebauten Thermoelementen (Typ K). Zudem erfolgte eine Berechnung des Abbrandes aus dem Masseverlust während der Brandbeanspruchung sowie aus der Ermittlung des Restquerschnitts über ein 3D-Modell.

3.2 Unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des Abbrandes

3.2.1 Abgrenzung

Wie bereits der Literaturzusammenstellung zu entnehmen ist, wurden in der Vergangenheit verschiedene Prüfeinrichtungen, Mess- und Auswertemethoden angewandt, um den Abbrand und daraus resultierend die Abbrandrate zu bestimmen. Somit muss in jeder experimentellen Untersuchung vor der Abbrandrate die Abbrandtiefe bestimmt werden. Hinsichtlich der Messmethodik kann in Messungen zu einem bestimmten Zeitpunkt (diskrete Messmethode) und in eine Messung über den Versuchsverlauf hinweg (kontinuierliche Messmethoden) unterschieden werden (vgl. Abbildung 3-4). Bei der diskreten Messmethode erhält man ein Ergebnis für die Abbrandtiefe zu einem definierten Zeitpunkt, meist nach Versuchsende und Ablöschen des Probekörpers. Bei den kontinuierlichen Messmethoden kann die Abbrandtiefe über die Versuchsdauer hinweg, somit eine zeitabhängige Abbrandrate, ermittelt werden.

Bei den Messmethoden wird zwischen direkten Messmethoden für die der Abbrand direkt, z.B. durch Messen des Restquerschnittes oder durch kontinuierliche Messung der Abbrandgrenze über Sonden (Keramiklanzen) und in indirekte Messmethoden unterschieden. Bei den indirekten Messverfahren handelt es sich z.B. um die Messung der Temperatur oder Dichte, aus der die Abbrandgrenze abgeleitet wird. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Messmethoden dargestellt, unabhängig von der Auswertemethodik.

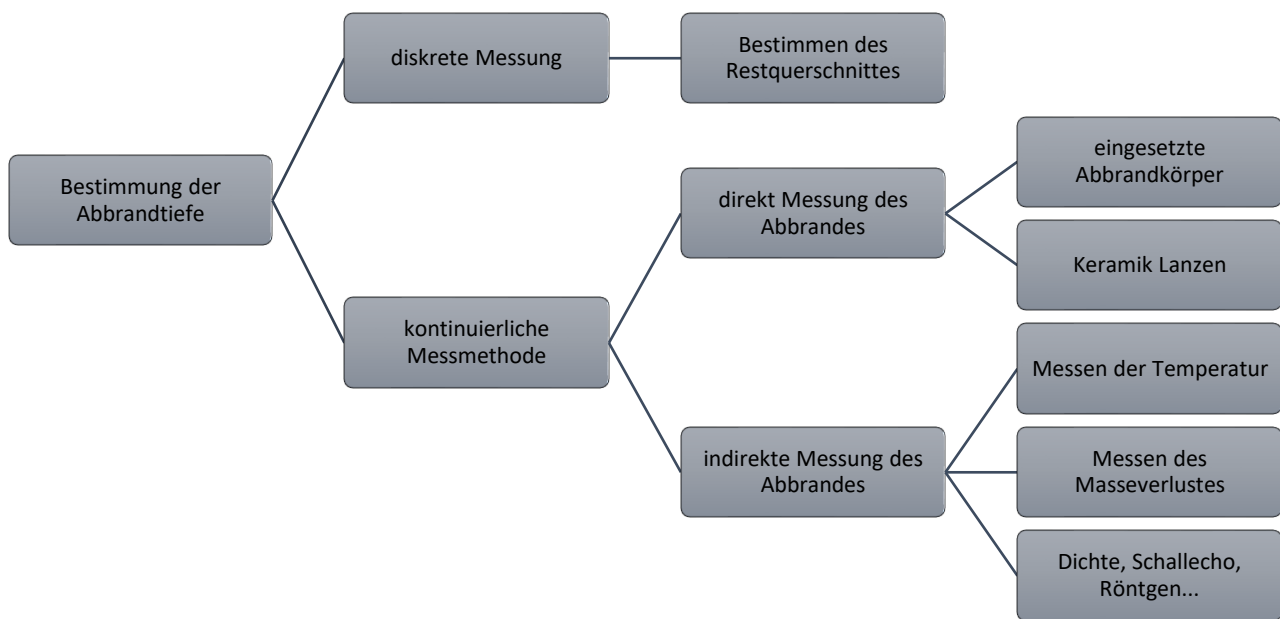


Abbildung 3-4: Verfahren zur Bestimmung des Abbrandes (in Anlehnung an Wörle 2019 [58])

3.2.2 Diskrete Messmethoden – Bestimmen des Restquerschnittes

Diese Methodik ist einfach und schnell nach dem Ablöschen des Probekörpers auszuführen und stellt somit die am häufigsten eingesetzte Messmethodik in der Praxis dar. Hierfür wird nach dem



Abbildung 3-5: Händisches Entfernen der Holzkohle nach dem Brandversuch mittels einer Drahtbürste.

Ablöschen die Holzkohle entfernt (vgl. Abbildung 3-5) und der Restquerschnitt des Holzes bis zur Abbrandgrenze (siehe Abs. 2.1.2) an den jeweiligen Punkten gemessen. Nachfolgend ist die Systematik Anhand der vier Abbildungen, Abbildung 3-6 bis Abbildung 3-9 dargestellt. Unterschiedliche Vorgehensweisen zum Ablöschen des Probekörpers, sowie zum Entfernen der Holzkohle sind in Wörle [58] angegeben, und basieren auf einer Untersuchung von Pandtle

².

² Die Ergebnisse von Pandtle wurden nicht veröffentlicht und sind bei der Holzforschung München hinterlegt.



Abbildung 3-6: Brennende Holzoberfläche nach dem Brandversuch.



Abbildung 3-7: mit Wasser abgelöschter Probekörper nach dem Brandversuche – Oberfläche der Holzkohle.



Abbildung 3-8: Mit Spachtel und Drahtbürste bis zur Abbrandgrenze entfernte Holzkohle.



Abbildung 3-9: Messung der Abbrandtiefe und daraus resultierend des Restquerschnittes an einem Punkt nach dem Ende des Versuchs mit einer Schublehre [46].

Neben der in Abbildung 3-7 dargestellten Möglichkeit, den Probekörper mit Wasser (Gießkanne und Brausekopf) abzulöschen, wurden alternativ Probekörper mit Kohlendioxid umspült oder komplett in ein Wasserbad getaucht. Empfehlungen zur Vorgehensweise des Ablöschvorganges wurden bereits im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens der Holzforschung München [16] angegeben. Hier wurde als geeignetes Verfahren

- a) das Ablöschen mit Wasser,
- b) das Ablöschen mit Gas (N_2 oder CO_2),
- c) das Ablöschen mit Wasser bei gleichzeitigem Abtragen der Kohleschicht,

angegeben. Der Probekörper sollte möglichst so gelöscht werden, dass ein nachträgliches Quellen und Schwinden verhindert wird und der Brandprozess möglichst schnell beendet wird. Das Entfernen der Holzkohle wurde ebenfalls durch Pandle untersucht und in Wörle [58] zusammengefasst und auf Holzwerkstoffplatten erweitert. Als geeignete Methode wurde hierfür folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- (1) Entfernen der groben Kohleschicht mit der Spachtel
- (2) Abtragen der feineren Kohleschicht mit Stahlbürste
- (3) Abtragen der restlichen Kohlepartikel an der Abbrandgrenze mit der feineren Messingbürste

In Abbildung 3-8 ist das Ergebnis des Probekörpers mit entfernter Holzkohleschicht dargestellt. Nun kann die Abbrandtiefe oder der Restquerschnitt durch händisches Messen, Photogrammetrie oder Laserscanning bestimmt werden. In Abbildung 3-9 wurde die Abbrandtiefe mittels einer Schublehre (händisches Messen) ermittelt. Möglichkeiten zu unterschiedlichen Messmethoden des Restquerschnittes werden in Abs. 3.3 genauer dargestellt.

3.2.3 Kontinuierliche Messmethoden – Abgrenzung direkt und indirekte Methoden

Bei den kontinuierlichen Messmethoden wird der Abbrand zu unterschiedlichen Zeitpunkten über den Versuch hinweg bestimmt. Hier wird zwischen den direkten und indirekten Methoden unterschieden. Bei den direkten Methoden (z.B. der Messung über Abbrandkörper) wird direkt der Abbrand des Holzes gemessen. Bei den indirekten Methoden wird der Abbrand aus anderen Messwerten abgeleitet, beispielsweise aus der Temperatur bei der Messung über Thermoelemente.

3.2.4 Kontinuierliche Messmethoden – Direkte Messung über eingesetzte Abbrandkörper

Hier werden in den Probekörper herausnehmbare Teilstücke (üblicherweise zylindrische oder als Kegelstumpf) im Probekörper eingebaut und während des Brandversuchs zu unterschiedlichen Zeiten aus dem Prüfkörper entnommen und die Öffnung mit einem Ersatzersatzkörper geschlossen. Somit handelt es sich um eine Mischung zwischen einer diskreten und kontinuierlichen Messung. Jede Einzelmessung an einem Abbrandkörper ist eine diskrete Messung und erst durch eine höhere Anzahl an Abbrandkörpern, die zu unterschiedlichen Zeiten entnommen werden können, entsteht die kontinuierliche (zeitabhängige) Messung. Der Restquerschnitt wird an den aus dem Probekörper entnommenen Abbrandkörpern analog zu Abs. 3.2.2 bestimmt. Die Methode wurde beispielsweise durch Fornather (2003) [23] oder Huntierová (1995) [26] genutzt und war in den letzten Jahren jedoch nicht mehr gebräuchlich.

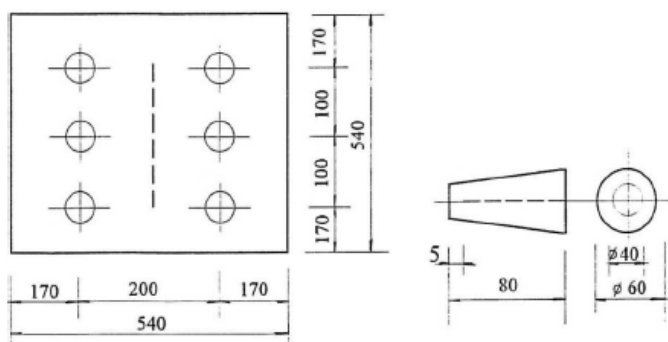


Abbildung 3-10: Messung des Restquerschnittes über eingesetzte Abbrandkörper [26]

Diese Methodik wird hier dennoch mit aufgenommen. In einigen Prüfinstituten kann der brennende Probekörper nicht im Ofen abgelöscht oder aus dem Ofen gehoben werden und der Probekörper muss nach dem Versuch kontrolliert abbrennen. Somit ist ein Messen des Restquerschnittes und daraus eine Ableitung des Abbrandes nicht mehr möglich. Hier kann auf die Methode mit eingesetzten Abbrandkörpern zurückgegriffen und der Restquerschnitt bestimmt werden, ohne den Probekörper aus dem Brandprüfofen zu entnehmen.

3.2.5 Kontinuierliche Messmethoden – Direkte Messung über Keramiklanzen

Keramiklanzen zur Messung der Abbrandrate wurden beispielsweise durch Lache [31], Huntierova [26], oder Lingens [33] verwendet. Um den Abbrand zu bestimmen verwendete Lingens [33] Keramiksonden mit Wolframspitzen (vgl. Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12) die mit einem Druck von einem Bar durch die Holzkohle bis zur Abbrandgrenze gedrückt wurden. Durch den gleichbleibenden Druck, mit dem die Lanzen über den Versuch hinweg in das Holz gedrückt werden, kann der Abbrand kontinuierlich bestimmt werden kann. Ein Nachteil dieser Methode liegt darin, dass ein zusätzlicher Wärmeeintrag durch die Messsonden in das Holz nicht ausgeschlossen ist, [33], wodurch im Bereich der Sonde ein erhöhter Abbrand entsteht. Zusätzlich muss der Druck, mit dem die Sonde eingebracht wird, holzartspezifisch entsprechend abgestimmt sein, um genau die Abbrandgrenze zu erreichen. Inhomogenitäten im Holz (z.B. Risse oder Fugen) können zu einer erhöhten Eindringtiefe und somit einem verfälschten Wert für den Abbrand führen. Zusätzlich zu den vorab genannten Nachteilen ist ein aufwendiger Versuchsaufbau notwendig. Den Autoren liegen keine neueren Untersuchungen aus den letzten Jahren mit dieser Methode mehr vor. Es ist davon auszugehen, dass diese Messmethode in der Praxis nur selten eingesetzt wird.



Abbildung 3-11: Messung der Abbrandtiefe mit einer Keramiklanze [33]



Abbildung 3-12: Keramiklanzen und Probekörper im Brandprüfstand [Quelle Holzforschung München]

3.2.6 Kontinuierliche Messmethoden – Indirekte Messung über die Temperatur

Neben der direkten Messung kann die Abbrandgrenze indirekt über die Temperatur bestimmt werden. Hierfür sind exakt positionierte Thermoelemente (TE) in unterschiedlichen Tiefen notwendig, um die Temperatur an dieser Position zu ermitteln. Ergänzend hierzu ist ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Temperatur und der Abbrandgrenze die Voraussetzung, um von den Messwerten auf den Abbrand zu schließen. Unterschiedliche Tiefen der TE ermöglichen eine kontinuierliche Bestimmung der Abbrandgrenze über die Versuchsdauer hinweg.

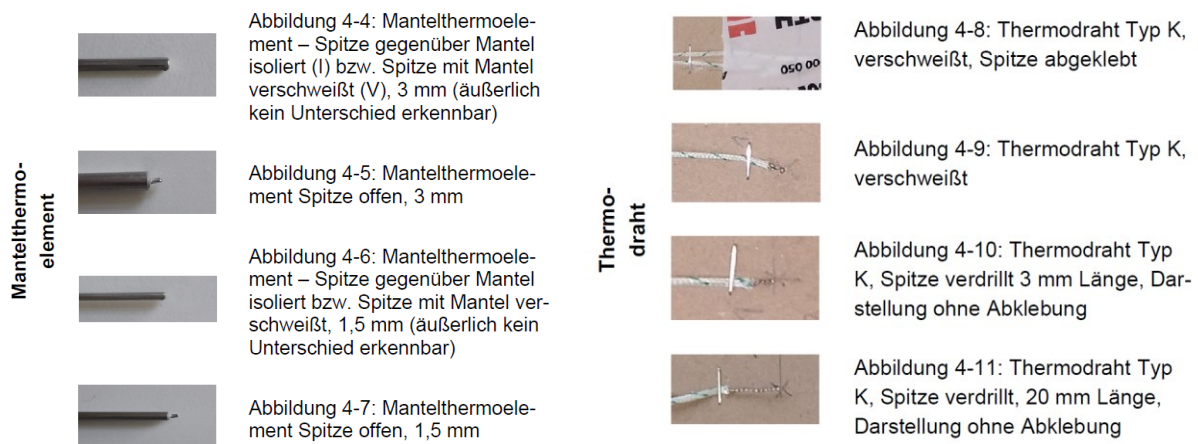


Abbildung 3-13: Unterschiedliche Arten von Thermoelementen [41]

linke Seite: Mantelthermoelement mit unterschiedlichen Spitzenausbildungen
rechte Seite: Thermodrähte mit unterschiedlichen Spitzenausbildungen

In der DIN EN 1995-1-2 [4] wird die 300° C Isotherme als Abbrandgrenze definiert (vgl. Abs. 2.1.2). Somit kann über die Messung der 300 °C Isotherme mittels der Thermoelemente die Abbrandgrenze ermittelt werden. Unterschiedliche Einbringtiefen im Probekörper ermöglichen eine kontinuierliche Messung der Abbrandtiefe über die Zeit. Abbildung 3-14 zeigt unterschiedliche Einbringarten

(1,2,3,4) von Thermoelementen in einen massiven Holzquerschnitt oder in ein Brettsperrholzelement. Mantelthermoelemente können gebogen, aber nicht geknickt werden und werden entweder von der Rückseite (2,3), somit senkrecht zur Isotherme oder seitlich, parallel zur Isotherme, in den Probekörper (4) eingebracht. Thermodrähte (Typ K) können im Probekörper über eine bestimmte Länge parallel zur Isotherme eingebracht und dann über die Rückseite ausgeführt werden (1).

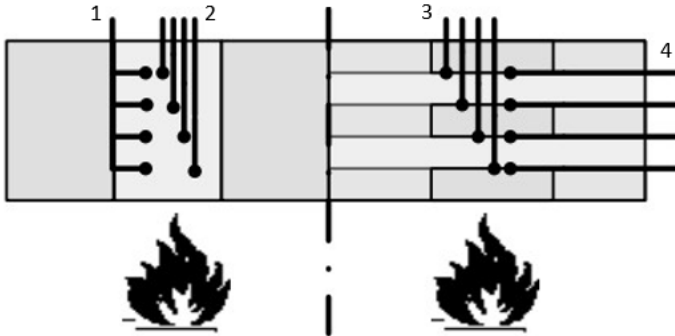


Abbildung 3-14: TE-Installationen in Prüfkörpern aus Balken (links) oder CLT (rechts); 1: isothermenparallel in kurzen Bohrlöchern; 2 und 3: senkrecht zu den Isothermen in Bohrlöchern; 4: isothermenparallel zwischen Brettlagen eingelegt (in Anlehnung an [19])

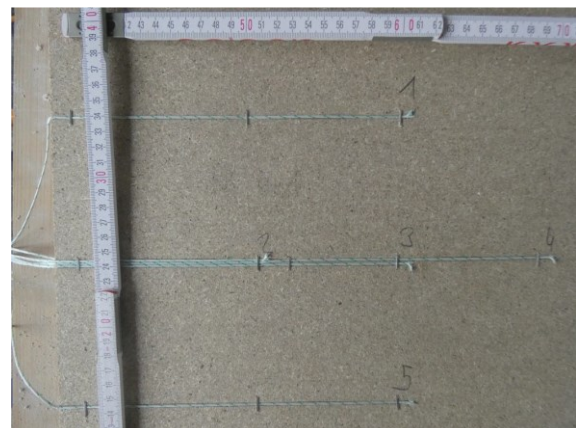
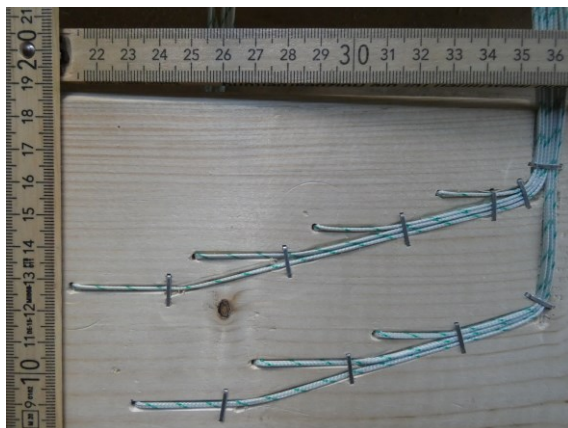


Abbildung 3-15: Einbau von horizontal, parallel zur Isotherme eingeführten TE in unterschiedlichen Tiefen und Herausführen zur Rückseite des Probekörpers (links). Einbau von Thermoelementen zwischen zwei Holzwerkstoffplatten und damit parallel zur erwarteten Isotherme (rechts).

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass neben der, der Abbrandgrenze zugeordneten Temperatur auch die Erwärmung und ggf. auch Abkühlung im Probekörper gemessen werden können. Somit ist eine kontinuierliche Bestimmung eines Temperaturprofils während des Brandversuchs möglich. Um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten, ist ein exakter Einbau und vor allem eine exakte Positionierung im Probekörper notwendig. Beispielsweise führen geringe Winkelabweichungen (2°) bei 5 cm horizontal angeordneten Bohrlöchern zu einer Vertikalabweichung von 1,75 mm. Durch den hohen Temperaturgradienten im Bereich der Abbrandgrenze (vgl. Abbildung 2-2) hat das Temperaturkriterium, wie beispielsweise 270° C für die Kapselung, 288° C üblich in den USA oder 300° C in

Europa einen geringen Einfluss. Eine Vertikalabweichung der Position des Thermoelementes hingegen führt zu einer hohen Temperaturabweichung und hat durch den großen Temperaturgradienten somit einen großen Einfluss.

Der Einfluss unterschiedlicher Einbringarten von Thermoelementen wurde in Fahrni et al. 2018-1 [19], Klippel et al. 2019 [28], Schmid et al. 2020 [48], Pope et al. 2020 [40], Terrei et al. 2021 [50], Schaffer 1967 [43] und Lache 1992 [32] untersucht. Nachfolgend werden zusammenfassend die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt:

- Die Thermoelemente müssen mit großer Präzision platziert werden, um eine genaue Lage im Probekörper zu gewährleisten.
- Senkrecht zur Isotherme eingebaute Thermoelemente führen in Massivholz zu großen Messabweichungen und sollten vermieden werden. Somit sollten Thermoelemente parallel zur Isotherme eingebaut werden.
- Die Bohrlöcher sollten möglichst dem Durchmesser der Thermoelemente entsprechen, um Konvektionsströme im Bohrloch zu vermeiden.

Diese Randbedingungen sind auch in den Methoden zur Bestimmung des Abbrandes entsprechend DIN EN 13381-7 [9] bzw. prEN 1995-1-2 [5] berücksichtigt.

3.2.7 Indirekte Messung durch Dokumentation des Sauerstoffverbrauchs

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Abbrandes ist die Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs im „Cone-Kalorimeter“ (Cone). In dieser Versuchseinrichtung können nur kleinformige Probekörper (ca. 100 x 100 mm) untersucht werden. Durch eine genau definierte Umgebung, innerhalb der die Beanspruchung stattfindet (Masse, Gaszusammensetzung der Umgebungsluft, Beanspruchung) und die Messung des Sauerstoffverbrauchs kann daraus der Abbrand abgeleitet werden. Im Gegensatz zur Ofenprüfung wird der Probekörper durch eine definierte Wärmestrahlung beaufschlagt, die, falls ein Vergleich zur Ofenprüfung angestrebt wird, auf die ETK-Bedingungen kalibriert werden muss. Mikkola (1990) [35] untersuchte beispielsweise den Abbrand im Cone-Kalorimeter. Allerdings wurde hier nicht der Abbrand über die Sauerstoffkonzentration, sondern über den Restquerschnitt, bzw. Thermoelemente bestimmt.

Die Messung des Abbrands über den Sauerstoffverbrauch basiert auf den grundlegenden Untersuchungen durch Parker [38] und Huggett [25]. Im Cone Kalorimeter können neben dem Sauerstoffverbrauch auch die Wärmefreisetzungsrate und der Masseverlust bestimmt werden. Mikkola [35], Tran et al. [51], White et al. [57] und Tsantaridis et al. [52] untersuchen einen geeigneten Wär-

mestrom, um eine vergleichbare Beanspruchung zur ETK zu erzeugen. Bei der Messung des Sauerstoffverbrauchs im Cone-Kalorimeter handelt es sich um eine kontinuierliche Messung des Abbrandes. Durch die geringe Probekörperabmessung und die Notwendigkeit der Kalibrierung wird diese Methode nur selten eingesetzt.

3.3 Vergleich unterschiedlicher Messverfahren des Restquerschnittes

3.3.1 Händische Messung des Restquerschnittes

Bei der händischen Messung des Restquerschnittes mittels Lineals oder Messschiebers nach dem Entfernen der Holzkohle (vgl. hierzu Abs. 3.2.2) wird die Genauigkeit wesentlich durch das angelegte Messraster beeinflusst. Untersuchungen hierzu wurden durch Schmid et al. [47] durchgeführt und es wird ein Messraster von maximal 50 x 50 mm vorgeschlagen. Wörle [58] hingegen schlägt vor, einen ca. 500 x 500 mm großen Prüfkörper in vier Teile zu sägen und an drei Schnittkanten jeweils im Abstand von 10 mm zu messen. Neben der reinen Anzahl der Messpunkt hat die Ebenheit der Oberfläche einen Einfluss auf das Ergebnis. Je ebener die Oberfläche ist, desto weniger Messpunkte sind erforderlich, um einen mittleren Abbrand zu bestimmen. Einen Vorschlag zur Berücksichtigung der Ebenheit der Oberfläche wurde durch Schmid et al. [48] angegeben. Die Anzahl des minimalen Messrasters und der Messpunkt wird entsprechend Gleichung (3-1) und (3-2) aus der Differenz zwischen maximalem und minimalem Restquerschnitt (hier für einen Probekörper mit einer Fläche von ca. 1 m²) bestimmt. Die Standardabweichung des Abbrandes soll durch diese Auswertemethodik < 2 mm sein.

$$n = 0,5 \times (d_{char,max} - d_{char,min}) - 5 \quad [-] \quad (3-1)$$

n	/	Minimal notwendige Anzahl an Messpunkten
$d_{char,max}$	[mm]	Größte gemessene Abbrandtiefe
$d_{char,min}$	[mm]	Kleinste gemessene Abbrandtiefe

$$x_1 = y_1 = \sqrt{\frac{a \times b}{n}} \quad [\text{mm}] \quad (3-2)$$

x_1, y_1	[mm]	Messraster in x- und y-Richtung
a, b	[mm]	Maße der zu messenden Abbrandfläche
n	[-]	Anzahl an Messpunkten

3.3.2 Digitale Messung des Restquerschnitts – Grundlagen

Neben der manuellen Messung kann der Restquerschnitt auch durch digitale Methoden, wie z.B. mittels Photogrammetrie oder Laserscan, Lidar oder Structural Light Technik bestimmt werden. Hierfür wird der vorbereitete Probekörper bei allen Methoden digitalisiert und ein 3-D- Modell des Probekörpers erzeugt, anhand dessen der Restquerschnitt ermittelt wird. Bei den digitalen Methoden ist in zwei wesentliche Schritte zu unterscheiden, die den Wert des Restquerschnittes beeinflussen:

1. Aufnahme des Probekörpers durch unterschiedliche Methoden
2. Auswertung des digitalen Modells und Bestimmung der Abbrandrate

Bei der Aufnahme des Probekörpers können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Nachfolgend werden hier die Photogrammetrie und das Laserscanning beschrieben.

3.3.3 Photogrammetrie mittels Foto- oder Videoaufnahme:

Hierfür wird der Probekörper am besten auf einer ebenen Oberfläche oder mit Abstand zum Boden gelagert und aus verschiedenen Winkeln fotografiert. Laut Schmid et al. [47] sind für einen ca. 1 m² großen Probekörper ca. 70 Fotos notwendig. Die Fotos sollten mit einer Kamera und Linse aufgenommen werden, damit später bei der Auswertung keine Fehler in der Software entstehen. Zur Skalierung wird am oder neben dem Probekörper ein Maßstab platziert. Die Fotos werden dann innerhalb einer Fotosoftware, z.B. ReCap-Photo [47] oder mittels App (z.B. Polycam) zu einem 3D-Modell zusammengefügt. Diese Methode wurde erfolgreich in Schmid et al [47] angewandt. Neben der Aufnahme durch Fotos kann das Modell auch auf Basis einer Videoaufnahme erstellt werden, so dass auf Basis einer noch größeren Anzahl an Bildern das Modell generiert wird (z.B. mittels der App Polycam).



Abbildung 3-16: Aufnahme des Probekörpers mittels einer Kamera in Schmid et al.[47]

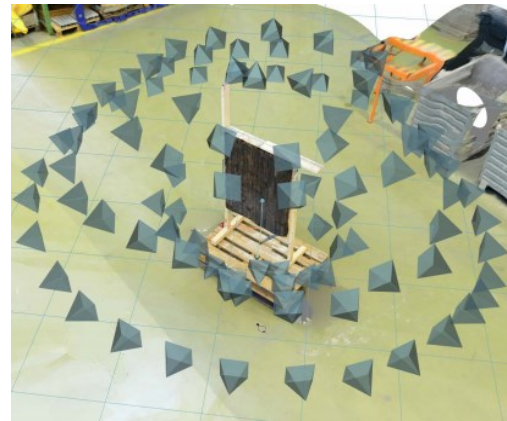


Abbildung 3-17: Probekörper und verschiedene Aufnahmepositionen nach [21]

3.3.4 LiDAR

Im Gegensatz zur photogrammetrischen Ermittlung der Probekörpergeometrie besteht eine weitere Möglichkeit darin, ein 3D-Modell durch ein Scannen auf Grundlage der LiDAR (en.: Light Detection and Ranging) Methode zu generieren. Vom LIDAR Sensor gesendete und vom Probekörper reflektierte Lichtwellen werden von einem Scanner detektiert und durch die Laufzeitmessung ähnlich wie das RaDAR (en.: Radio Detection and Ranging) die Entfernung und der Winkel registriert. Moderne Geräte können eine große Anzahl von Punkten verarbeiten und ermöglichen somit eine genaue und schnelle Aufnahme von Gegenständen (vgl. Abbildung 3-18).



Abbildung 3-18: Ergebnis eines 3D-Scans mittels LIDAR und der App Polycam

3.3.5 Structured Light-Technik (Laserscan)

Für diese Methode wird ein 3D-Scanner verwendet, der einen bestimmten Bereich unter einem Licht-raster erfasst. Eine im Scanner verbaute und auf das Licht-raster abgestimmte Kamera filmt diesen Bildausschnitt und erkennt die Verzerrung des Licht-rasters, die durch die gefilmte Oberfläche entsteht. Hieraus werden 3D-Daten des Ausschnitts in Echtzeit produziert (Zhang 2018). Wichtig dabei ist, dass der Prüfkörper Fixpunkte aufweist, an denen sich die Kamera orientieren kann. Als zweckdienlich haben sich hier kontrastreiche Referenzpunkte erwiesen (im Fall eines schwarz verkohlten Restquerschnitts bspw. weiße Aufkleber). Der Prüfkörper sollte auf einer ebenen Fläche oder erhöht positioniert werden. Wichtig ist, dass so wenig Störfaktoren (kontrastloser Unter-/Hintergrund, schlechte Belichtung u.a.) wie möglich vorhanden sind. Anschließend wird der Scanner ruhig per Hand über den PK geführt, bis das Gerät sämtliche Bildausschnitte zu einem 3D-Modell zusammengefügt hat. Dieses Modell kann dann rechnergestützt analysiert werden. Anhand des Modells können problemlos Mittelwert, Median oder Extrema des Abbrands bestimmt werden.

3.3.6 Terrestrisches Laser Scanning

Beim terrestrischen Laser Scanning (TLS) wird das Objekt über eine Laserbasierte Streckenmessung bis zur Oberfläche vom Gerät aus bestimmt. Der Probekörper wird in einem definierten Messraster abgetastet und daraus das Modell generiert. Hier ist keine nachträgliche Skalierung mehr erforderlich und als Ergebnis resultiert eine 3-D- Punktwolke. Diese muss im Nachgang mittels spezifischer Software ausgewertet werden.

3.3.7 Auswertung der Messergebnisse für den Restquerschnitt

Alle drei Methoden liefern genaue Ergebnisse, sind mit entsprechender Technik leicht und schnell durchzuführen und erlauben eine genaueres Messraster im Vergleich zur händischen Messung entsprechend Abs. 3.3.1. Neben der Messung selbst ist hier die Auswertung der Ergebnisse von maßgebender Bedeutung. Hierfür ist je nach Gerät eine passende Software zur Auswertung der Punktwolken notwendig. Je nach Software ist hierfür ein hohes Maß an Erfahrung notwendig, um keine falschen Ergebnisse zu erzielen. Unabhängig ob bei der händischen Messung oder den vorgestellten 3D- Messverfahren sind folgende Schritte vor der Auswertung der Messergebnisse notwendig:

1. Definition des passenden **Messbereiches**, um ggf. Randeffekte, die das Ergebnis verfälschen, nicht mitzuberechnen.
2. Definition eines **Messrasters** im händischen Verfahren entsprechend Abs. 3.3.1, bzw. der Auflösung in den digitalen Verfahren.

3. Definition einer **definierten Ebene / Punkt**, um den Restquerschnitt bzw. den Abbrand zu ermitteln.

Punkt 3 ist notwendig, da Schwindprozessen während des Brandversuches zu unebenen Probekörperrückseiten führen können, die ggf. mitzuberücksichtigen sind. Dies erfordert im 3D- Modell eine Aufnahme des gesamten Probekörpers inklusive der Rückseite des Restquerschnittes.

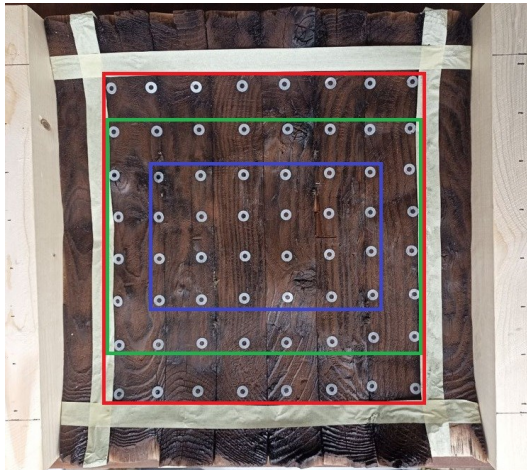


Abbildung 3-19: Definition der Messbereiche für die händische Messung [46]

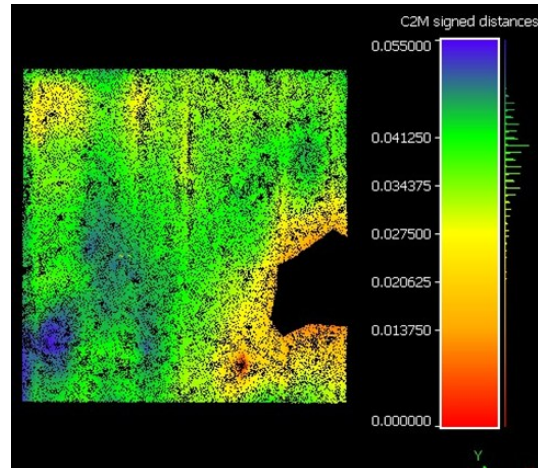


Abbildung 3-20: Messraster aus der Photogrammetrie, ausgewertet mit der Software CloudCompare [46]

3.4 Methoden zur Bestimmung der Abbrandrate

3.4.1 Grundlagen

Gegenwärtig existiert keine normativ festgelegte Methodik zur vollumfänglichen Bestimmung der Abbrandrate von Vollholz oder Holzwerkstoffen als Eingangswert in die Berechnungsmethodik nach DIN EN 1995-1-2 [4]. Möglichkeiten zur Bestimmung der Abbrandrate von Brandschutzsystemen mittels Thermoelemente sind bereits in der DIN EN 13381-7 [9] enthalten. Diese Methoden bilden auch die Grundlage für die bereits im Anhang C der prEN 1995-1-2 [5] enthaltenen Bestimmungsmethoden der Abbrandrate für Holz- und Holzwerkstoffe. Parallel sind in Annex A des EAD 13-0308-0304 [11] Methoden zur Bestimmung der Abbrandrate für Laminated Strand Lumber (LSL) bzw. Spanstreifenholz über senkrecht zur Isotherme eingebaute Thermoelemente in 300 mm große Kleinprüfkörper angegeben. Eine diskrete Methode basierend auf dem Restquerschnitt ist in keinem normativen Verfahren enthalten. Für weitere Untersuchungen werden die versuchstechnischen

Grundlagen der prEN 1995-1-2 [5], basierend auf der DIN EN 13381-7 [9] herangezogen, da diese Norm die wissenschaftlichen Erkenntnisse der letzten Jahre [19], [21], [54] beinhaltet.

3.4.2 Methode über die diskrete Messung des Restquerschnittes

Über die in Abs. 3.2 dargestellten unterschiedlichen Methoden wird der Restquerschnitt entweder direkt gemessen, oder aus der Temperatur, in dieser Untersuchung über die 300°C Isotherme definiert, indirekt abgeleitet. Zur Bestimmung der Abbrandrate muss die zugehörige Beanspruchungszeit definiert werden, über die die Abbrandrate berechnet wird. Häufig finden sich hierzu keine Angaben in der Literatur, obwohl die Methodik zur Berechnung der Abbrandrate einen erheblichen Einfluss auf diese haben kann. Prinzipiell berechnet sich die Abbrandrate aus der ermittelten Abbrandtiefe zu einer bestimmten Zeit an einem definierten Ort und der zugehörigen Beanspruchungszeit.

$$\beta_{0,t,j} = \frac{d_t}{t} \quad [\text{mm/min}] \quad (3-3)$$

$\beta_{0,t,j}$	[mm/min]	Abbrandrate zu einer praktisch relevanten Zeit in einer Messstation j
d_t	[mm]	Abbrandtiefe zu einer praktisch relevanten Zeit
t	[min]	Beanspruchungszeit

Somit ist zum einen der bzw. die Orte der Temperaturmessung und zum anderen die Beanspruchungsdauer relevant. In den Untersuchungen sind folgende Einflussfaktoren hinsichtlich der Bestimmung der Abbrandrate relevant:

- Ofentemperatur, bestimmt über das Thermoelement zur Ofensteuerung
- Temperatur Probekörperoberfläche (feuerzugewandte Oberfläche ohne Abbrand)
- Temperaturen innerhalb des Probekörpers
- Einschaltzeit des Brenners
- Zeit bis zum Erreichen von 300 °C (Beginn des Abbrandes) im Brandraum
- Zeit bis zum Erreichen von 300 °C (Beginn des Abbrandes) am Probekörper
- Zeit bis zum Erreichen von 300 °C an den Thermoelementen im Probekörper
- Zeit bis zum Ausschalten des Brenners
- Zeit bis zum Beginn des Ablöschens des Probekörpers

Die Konsequenz der unterschiedlichen Beanspruchungen zwischen einer Temperaturmessung am Probekörper direkt im Vergleich zur Ofentemperatur und der ETK wurde bereits durch Engel [17]

gezeigt und wird in nachfolgendem Abbildung 3-21 sowie Abbildung 3-22 nochmals erläutert. Die direkt am Probekörper gemessenen Temperaturen sind beispielhaft, basierend auf den Messwerten aus dem Prüfkörper PK1 (vgl. Tabelle 4-1), dargestellt. Durch Abweichungen der an der Probekörperoberfläche vorhandenen Temperatur in Abbildung 3-21 im Vergleich zur Ofentemperatur und zur Zieltemperatur (ETK) entsteht eine Abweichung der Beanspruchung. Diese kann durch einen Flächenvergleich mit Bezug auf die ETK in eine äquivalente Zeitdauer umgerechnet werden, die somit einer idealen Beanspruchung durch die ETK entsprechen würde, (vgl. Abbildung 3-22). Im dargestellten Beispiel herrscht am Probekörper eine höhere Beanspruchung im Vergleich zur ETK. Folglich müsste der Probekörper bei einer idealen Beanspruchung durch die ETK einer längeren Beanspruchungsdauer, im Beispiel 4,5 min bei 30 Minuten Brennerlaufzeit, ausgesetzt werden (vgl. Δt in Abbildung 3-22). Diese Umrechnung ermöglicht es, unterschiedliche Einflussfaktoren, resultierend aus der Ofensteuerung sowie ofenspezifischen Randbedingungen, die zu einer Abweichung zwischen der am Probekörper herrschenden Temperatur im Vergleich zur ETK führen, mit zu berücksichtigen.

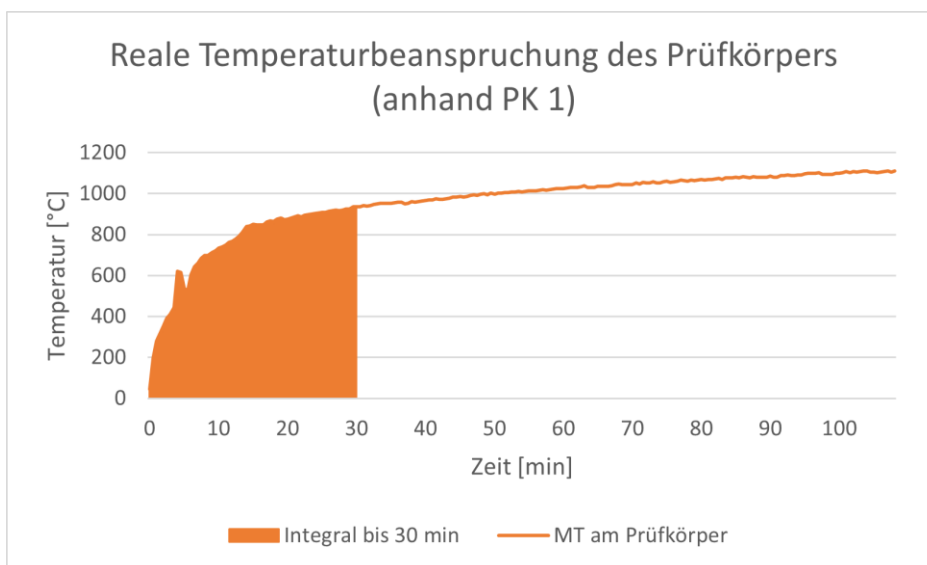


Abbildung 3-21: reale thermische Beanspruchung des PK anhand von Messwerten [46].

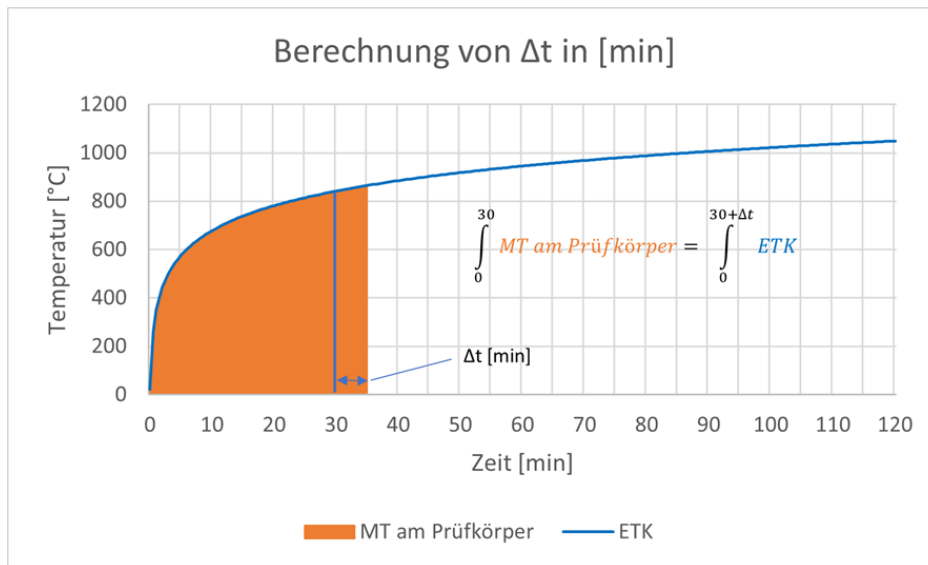


Abbildung 3-22: Entstehende Abweichung durch die Temperaturdifferenz [46].

Mit zunehmender Beanspruchungsdauer steigt im Beispiel auch die Abweichung mit an. In nachfolgender Tabelle 3-1 wurden die Abweichungen für die Beanspruchungsdauern 30, 60 und 90 Minuten dargestellt. Hierfür wurden die Zeit bis zum Erreichen der 300°C Isotherme am Probekörper (Beginn des Abbrandes) ermittelt und die Zeitdifferenz im Vergleich zur ETK berechnet.

Neben dem Effekt der Temperaturdifferenz während der Beanspruchungszeit unterliegt der Probekörper nach dem Abschalten des Brenners einer weiteren Temperaturbeanspruchung bis zum vollständigen Ablöschen. Diese führt zu einer Verlängerung der thermischen Beanspruchung. Durch die unterschiedlichen Ausbauzeiten und Umgebungsbedingungen lässt sich diese Beanspruchung, die geringer als eine weitere ETK-Beanspruchung ist, nicht quantifizieren. Im Beispiel entsprechend Tabelle 3-1 wurden die Zeiträume bis zum Ablöschen des Probekörpers mit angegeben.

Tabelle 3-1: Darstellung des Einflusses der unterschiedlichen Annahmen für die Beanspruchungszeiten mit Bezug auf die ETK am Beispiel von Versuch V1 entsprechend Abs. 4 [46].

Beispiel unterschiedlicher Beanspruchungsdauern für PK 1	
Zeit bis zum Erreichen der 300 °C am PK, gemessen mit MT	- 0,26 min
an der Probekörperoberfläche im Vergleich zur OT* (entspricht Verkohlungsbeginn)	
Δt für 30 min Prüfdauer	4,5 min
Δt für 60 min Prüfdauer	7,0 min
Δt für 90 min Prüfdauer	9,0 min
Δt für gesamte Prüfdauer	10,5 min
Prüfdauer (Brennerstart bis Brennerstopp)	112 min
Zeitspanne von Ausbau aus dem Ofen bis zum Ablöschen	2 min
Summe	124,24 min

OT: Ofentemperatur, gemessen mit dem Thermoelement zur Ofensteuerung, üblicherweise ein Plattenthermoelement

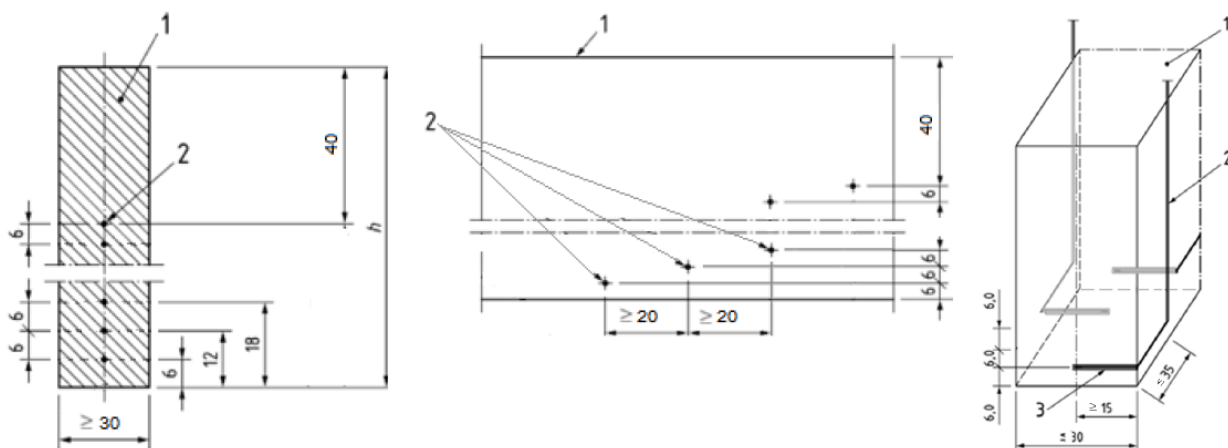
MT: Mantelthermoelement, positioniert an der unverkohlten Probekörperoberfläche

3.4.3 Methoden zur Bestimmung der Abbrandrate mittels Thermoelemente im Probekörper

Zur Bestimmung der Abbrandrate durch ein Messen der 300°C-Isotherme in unterschiedlichen Probekörpertiefen mittels Thermoelemente, sind verschiedene methodische Ansätze existent.

(1) Methode basierend auf prEN 1995-1-2 [5] (M1):

Die Thermoelemente zur Erfassung der Temperaturen im Probekörper während der Brandbeanspruchung werden parallel zur Isotherme eingebohrt und in der Auswertung die Zeiten bis zum Erreichen der 300°C Isotherme als Abbrandgrenze herangezogen, (vgl. Abs. 3.2.7 bzw. Abbildung 3-23). Zur Bestimmung der Abbrandrate ist der Mittelwert aus mindestens zwei Prüfergebnissen zu berücksichtigen.



Key:

- 1 Instrumented timber beam
- 2 Internal thermocouples
- 3 Bore hole for thermocouple wire
- h Cross-section height of the beam

units in mm

Abbildung 3-23: Thermoelemente zur Bestimmung der Abbrandrate entsprechend prEN 1995-1-2 [5]

Gemäß prEN 1995-1-2 [5] wird die Abbrandrate zwischen zwei nacheinander in der Tiefe folgenden Thermoelementen (d_{i+1} und d_i) und der jeweils zugehörigen Zeit bis zum Erreichen der 300°C Isotherme berechnet (vgl. Gl. 3-4). Die Mittlere Abbrandrate zwischen jeweils zwei Messtiefen wird aus dem Mittelwert der Anzahl der Messpunkte in einer Tiefe bestimmt (vgl. Gl. 3-5). Die gesamte mittlere Abbrandrate berechnet sich aus dem Mittelwert der Einzelabbrandraten nach Gl. 3-5.

$$\beta_{i,j} = \frac{d_{i+1} - d_i}{t_{300,i+1} - t_{300,i}} \quad [mm/min] \quad (3-4)$$

$\beta_{i,j}$	[mm/min]	Abbrandrate zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messtiefen i und i+1 einer Individuellen Messstation j
d_i	[mm]	Tiefe des Messpunktes i, von der ursprünglichen, brandbeanspruchten Oberfläche des Prüfkörpers aus gemessen
d_{i+1}	[mm]	Tiefe des darauffolgenden Messpunktes i+1, von der ursprünglichen, brandbeanspruchten Oberfläche des Prüfkörpers aus gemessen
$t_{300,i}$	[min]	Dauer bis zum Erreichen von 300°C im Messpunkt i
$t_{300,i+1}$	[min]	Dauer bis zum Erreichen von 300°C im darauffolgenden Messpunkt i+1

$$\beta_{i,j,aver.} = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_{i,j}}{n_i} \quad [mm/min] \quad (3-5)$$

$\beta_{i,j,aver.}$	[mm/min]	Durchschnittliche Abbrandrate einer spezifischen Tiefe im Messpunkt i, unter Beachtung der vorhergegangenen Messpunkte einer Messstation j
$\beta_{i,j}$	[mm/min]	Abbrandrate zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messtiefen i und i+1
n	[-]	Anzahl der gültigen Messpunkte, unter Beachtung der Tiefe i und der vorhergegangenen Messpunkte

Abweichen hiervon werden in der Forschung und in der Praxis alternative Berechnungsmethoden herangezogen, die zu abweichenden Ergebnissen führen können.

(2) Methode durch lineare Interpolation einer Messtiefe (M2):

Eine Möglichkeit ist die Bestimmung der Abbrandrate durch Berechnung der mittleren Abbrandrate für eine bestimmte Zeitdauer (30, 60, 90 Minuten) ohne Berücksichtigung der zwischen der betrachteten Messtiefe und der Probekörperoberfläche liegenden Thermoelemente. Es wird nur das zur Auswertung relevante Thermoelement, der entsprechenden Messtiefe für die beurteilungsrelevante Zeit berücksichtigt.

$$\beta_{0,t,j} = \frac{d_t}{t_{Beanspr.}} \quad [mm/min] \quad (3-6)$$

$\beta_{0,t,j}$	[mm/min]	Abbrandrate zu einer praktisch relevanten Zeit (hier 30, 60 und 90 min) in einer Messstation j
d_t	[mm]	Abbrandtiefe zu einer praktisch relevanten Zeit (hier 30, 60 und 90 min)
$t_{Beanspr.}$	[min]	Beanspruchungsdauer bis zum Erreichen der 300°C Isothere an der betrachteten Messtiefe.

Im Anschluss wird der Wert der Abbrandrate über die Anzahl der Messstellen in einer bestimmten Tiefe (für eine bestimmte Zeit) gemittelt. Dieses Verfahren findet auch bei Holzwerkstoffplatten, ohne Thermoelemente innerhalb einer Platte, Anwendung. Für nur eine Messtiefe entsprechen die Ergebnisse Methode (1).

(3) Methode lineare Interpolation jeder Messtiefe (M3):

Vergleichbar zur Methode der Interpolation einer Messtiefe entsprechend Methode (2) kann die Abbrandrate für jedes Thermoelement in jeder Tiefe bestimmt werden. Die Abbrandrate wird entsprechend Gleichung (3-6) bestimmt und pro Messtiefe gemittelt. Im Anschluss wird der Mittelwert der

Abbrandrate über alle gemittelten Werte der zuvor betrachteten Messtiefen gebildet. Hierbei wird der betrachtete Versuchszeitraum einbezogen.

3.4.4 Vergleich der Methoden

Wird nur eine Messebene, wie beispielsweise bei Holzwerkstoffplatten, ausgewertet, führen alle drei Verfahren zu identischen Ergebnissen. Die Berücksichtigung aller Thermoelementebenen in Methode (1 und 3) ermöglicht eine Bestimmung von zeit- und tiefenabhängigen Abbrandraten und berücksichtigt zeitabhängige Veränderungen der Abbrandrate. Durch Inhomogenitäten im Material und die kaskadenförmige Anordnung der Thermoelemente im Balken (vgl. Abbildung 3-23) besteht die Möglichkeit, dass die 300°C Isotherme am Thermoelement in der Ebene $i+1$ ($t_{300,i+1}$) nahezu gleichzeitig oder sogar vor der Ebene i ($t_{300,i}$) erreicht wird. Daraus können nach Gl. 3-4 sehr große oder negative Abbrandraten resultieren, die zu einer Verfälschung des Gesamtergebnisses führen.

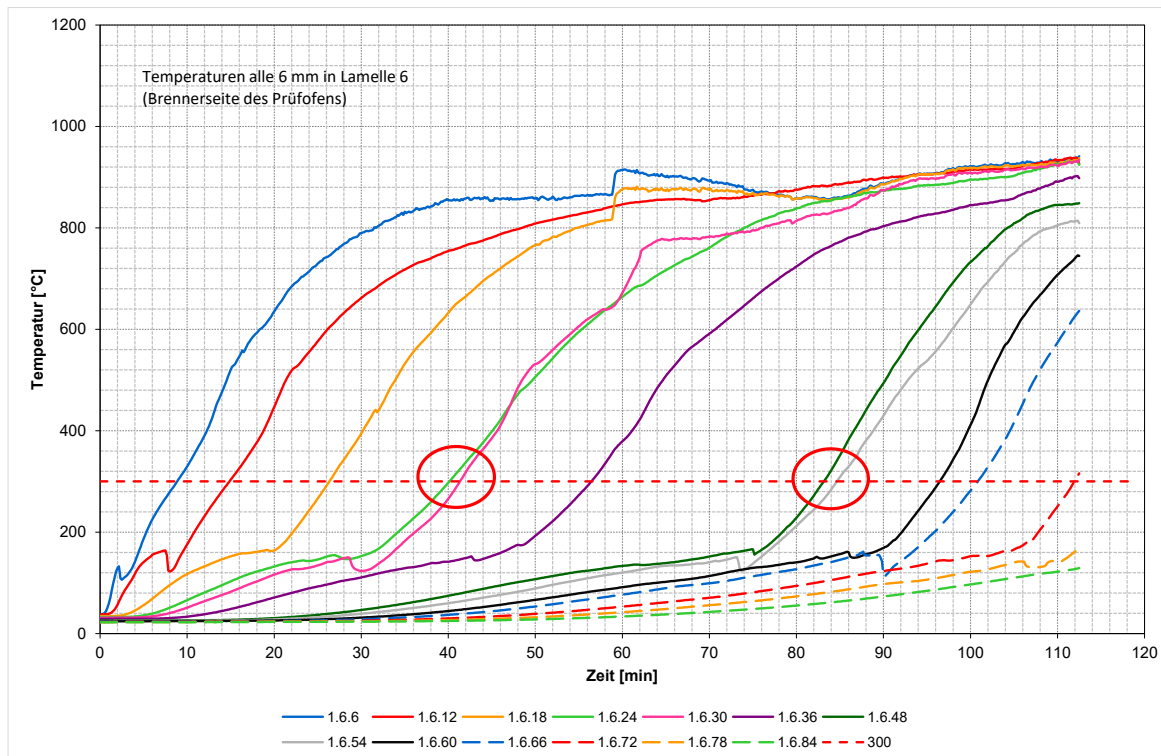


Abbildung 3-24: Beispieldarstellung des Probekörpers PK 1 (vgl. Abs. 4) zweier Messtationen mit vergleichbaren Zeiten bis zum Erreichen des 300°C Kriteriums in unterschiedlichen Tiefen [46]

Somit stellt Methode 3 (Methode lineare Interpolation jeder Messtiefe) eine robustere Variante dar, da hier nicht die Differenz zum vorhergehenden Thermoelement, sondern bis zur Probekörperoberfläche berücksichtigt wird.

3.5 Ergebnisse aus der Literatur und Vergleich

Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Messmethoden aus der Literatur wird nachfolgend in tabellarischer Form aufgeführt.

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Methode "Messung mit Sonden"

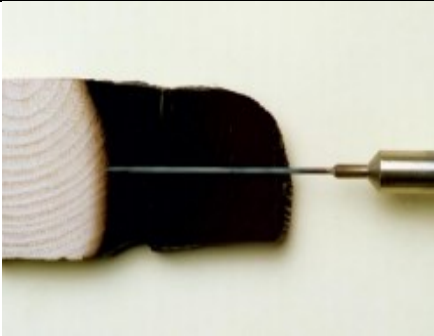
Kontinuierliches Verfahren „Messung mit Sonden“					
Beschreibung					
<ul style="list-style-type: none">• Von Lache [31] entwickeltes, kontinuierliches Verfahren, das den Dichteunterschied von Holz und Holzkohle nutzt• Keramiksonden mit Wolframspitze werden mit definiertem Druck in bestimmten Zeitabständen während des Versuchs in den PK gedrückt• die Sonde wird an der Abbrandgrenze vom dichteren Holz gestoppt, der zurückgelegte Weg wird gemessen• Hieraus werden Abbrandtiefe und Abbrandrate bestimmt					
					Messsonde an der Abbrandgrenze [33]
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Rohdichte [kg/m³]	β_0 [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung, Ver- suchsdauer und -bedin- gungen)
Lache [31], [32]	Buche	8 & 20	700 & 689	0,82 & 0,76	Die beiden β_0 -Werte be- ziehen sich auf die 2 verschiedenen Dichten und Holzfeuchten; 4 Messsonden
	Eiche	8 & 20	656 & 664	0,62 & 0,60	
	Kiefer (Splint & Kern)	8	497 & 491	0,97 & 0,79	
	Fichte	8 & 20	433 & 459	0,74 & 0,68	
	Meranti	8 & 20	544 & 559	0,65 & 0,59	
Hun- tierová [26]	Sperrholz (Buche, 40 mm)	/	740	0,77	alle Versuche: ETK, 30 min; 4 Messsonden
	Sperrholz (Fichte, 39 mm)	/	510	0,68	
	Massivholzplatte (Fichte, 80 mm)	/	450	0,66	β_0 gemittelt: Sonden und Austauschkörper
	Flachpressplatte (Fichte, 38 mm)	20	480 & 580	0,62 & 0,60	β_0 gemittelt: RQ und Sonden
	Flachpressplatte (Buche, 38 mm)	20	720	0,53	
Lingens [33]	Fichte	9,2 ± 1,2	400-510	0,72-0,79	2 Messsonden
	Kiefer (Splint)	9,2 ± 1,2	390-510	0,89	
	Kiefer (Kern)	9,2 ± 1,2	390-510	0,60-0,63	
	Lärche	9,2 ± 1,2	590	0,74	
	Buche	9,2 ± 1,2	650-760	0,78-0,89	
	Ahorn	9,2 ± 1,2	570-630	0,90-1,00	
	Stieleiche	9,2 ± 1,2	650-720	0,66-0,77	
Fornather [23]	BSH (Fichte)	9-12	418-484	0,52	ETK, 90 min, München

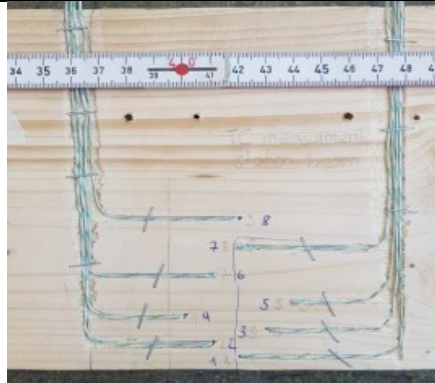
Tabelle 3-2: Fortsetzung

Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Rohdichte [kg/m ³]	β_0 [mm/min]	Anmerkungen (Beaufschlagung, Ver- suchsdauer und -bedin- gungen)
Zellner [60]	Spanplatte (32 mm)	6,3	647	0,49	ETK, 30 min
	Spanplatte (43 mm)	6,7	557	0,62	ETK, 30 min
	OSB (25 mm)	7,2	577	0,77	ETK, 12 min
Zellner [60]	BSH (Fichte, 50 mm)	9,6	476	0,76	Sonden in Klebefuge gerutscht
Fischer et al. [22]	Flachspanplatte (33 mm)	7,1	350	1,11	ETK, 30 min
	Strangpressplatte (42 mm)	7,6	450	0,74	

Tabelle 3-3: Bewertung des Verfahrens "Messung mit Sonden"

Bewertung „Messung mit Sonden“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Verlauf des Abbrands kann be- trachtet werden • Beginn der Holzkohlebildung kann bestimmt werden • Zeitliche Zuordnung der Ab- brandtiefe zu weiteren Messwer- ten möglich (Druck, Temperatur, Brandgase) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unsicherheit, ob sich die Sonde wirklich bis zur Abbrandgrenze vordringt • Messfehler durch Inhomogenität von Holz (Risse, Äste, Klebe- fugen) möglich • Messfehler durch Einbrennen der Sonde möglich • Nur lokale Messungen • Aufwändige Technik (Messvorrichtung), EDV nötig • Sonden zerstören die Holzkohleschicht und beeinflussen u.U. den Abbrand
Fazit	
Aufgrund des hohen technischen Aufwands und der vielfältigen möglichen Messunsicherheiten wird die Messung mit Sonden vom Autor dieser Arbeit als Standardprüfmethode zur Messung des Abbrandes nicht weiter betrachtet.	

Tabelle 3-4: Zusammenstellung der Methode "Messung mit TE"

Kontinuierliches Verfahren „Messung mit TE“					
<div>Beschreibung</div> <ul style="list-style-type: none">• In den PK werden in verschiedenen Tiefen TE eingebracht, die während des Versuches die Temperatur im PK messen.• Bei Erreichen einer bestimmten Temperatur (meist 300 °C) gilt das Holz als verkohlt: Hier liegt die Abbrandgrenze.• Aus den Temperaturmesswerten wird die Abbrandtiefe und hieraus die Abbrandrate ermittelt.• Beanspruchungen nach der nordamerikanischen ASTM E 119 und ETK sind nahezu identisch.					
				Installierte Thermoelemente [19]	
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Roh- dichte [kg/m³]	β ₀ [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung, Tempe- ratur der Abbrandgrenze)
Schaffer [43]	Douglasie	7	435	0,68	ASTM E 119, 288 °C
White [56]	LVL (Douglasie, 89 mm)	7	529-552	0,62-0,65	ASTM E 119, 300 °C
	LVL (Southern Pine, 89 mm)	/	/	0,71	
	Spanstreifenholz (Espe, 89 mm)	8	674	0,64	
	Furnierstreifenholz (Douglasie, 89 mm)	7	610	0,62	
	Furnierstreifenholz (Southern Pine, 89 mm)	/	/	0,61	
Werther [54]	BSH (GL24h, Fichte)	12	432	0,68	ETK, 30 min, 300 °C
Njankouo et al. [36]	Fichte	9	476 & 480	0,57 & 0,62	ETK, ca. 90 min, 300 °C
	Meranti	10	522	0,55	ETK, 92 min, 300 °C
Engel et al. [17]	BSH (Buche, 104 mm)	12,1	767	0,83 & 0,76	Die beiden β ₀ -Werte beziehen sich auf ETK, 30 min und ETK, 90 min Branddauer 300 °C
	BSH (Fichte, 118 mm)	11,8	507	0,70 & 0,59	
	LVL (Buche, 122 mm)	8,3	802	0,87 & 0,72	
	LVL (Fichte, 129 mm)	10,0	607	0,77 & 0,76	
	Buche	16,9	676	0,83 & 0,74	
	Fichte	12,0	485	0,83 & 0,72	
	Eiche	16,8	763	0,53 & 0,47	
Goth [24]	Spanplatte (38 mm)	/	620	0,67	alle Versuche: ETK, 300 °C
	Sperrholz (Fichte, 30 mm)	/	476	0,88	
	LVL (27 mm)	/	576	0,83	
	Spanplatte (2x 19 mm)	/	je 655	0,72 & 1,08	

	Sperrholz (Fichte, 2x 15 mm)	/	je 430	0,95 1,05	& β_0 je Platte angegeben; Platte 1: Durchbrand und Abfallen
König et al. [29]	Brettstapelholz (Fichte)	12	420-430	0,70	ETK, 30 min, 300 °C
	Brettstapelholz (Fichte)	12	420-430	0,62	ETK, 60 min, 300 °C
	Brettstapelholz (Fichte)	12	420-430	0,60	ETK, 90 min, 300 °C
Fahrni et al. [20]	Brettstapelholz (Fichte)	/	438-472	0,62	ETK, 300 °C, β_0 bei 30 mm Abbrand, einge- legtes TE
	Brettstapelholz (Fichte)	/	438-472	0,48	gleiche Bedingungen, aber TE in Bohrloch

Tabelle 3-5: Bewertung der Methode "Messung mit TE"

Bewertung „Messung mit TE“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturverlauf im QS kann während des Versuchs beobachtet werden • Verlauf des Abbrands kann betrachtet werden • Zeitliche Zuordnung der Abbrandtiefe zu weiteren Messwerten möglich (Druck, Temperatur, Brandgase) • In Kombination mit einer Messung des RQ können Temperaturmessungen unmittelbar mit lokalen Abbrandwerten in Verbindung gebracht werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige Installation der TE • Unsicherheit bzgl. der finalen TE-Position beim Bohren • Messfehler durch Einbringen der TE • Nur lokale Messung • Definition der Abbrandgrenze notwendig (260 – 350 °C) • EDV notwendig
Fazit	
<p>Bei richtiger Ausführung liefert das Verfahren genaue Temperaturmessungen, die umfangreiche Rückschlüsse ermöglichen (Abbrandrate, Tragfähigkeit des RQ, thermische Zersetzung des Holzes hinter der Abbrandgrenze). Die Nachteile der kontinuierlichen Messung mit Sonden fallen größtenteils weg. Eine Kombination mit der Messung des RQ nach Versuchsende liefert einen Referenzwert, mit dem Messergebnisse der TE (in Form der errechneten Abbrandrate) abgeglichen werden können.</p>	

Tabelle 3-6: Zusammenstellung der Methode "Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter"

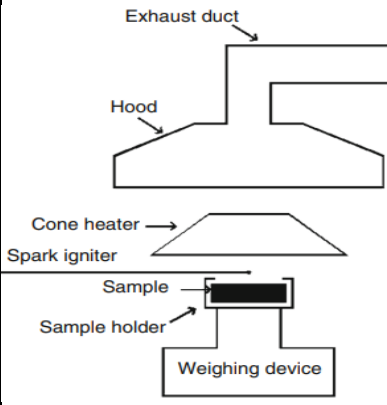
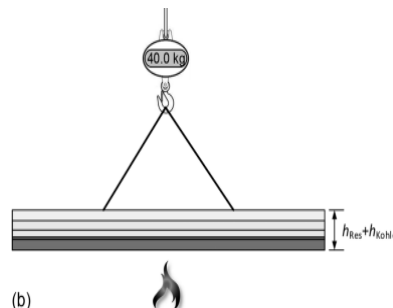
Kontinuierliches Verfahren „Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter“					
Beschreibung					
<ul style="list-style-type: none">Ein PK (ca. 100 x 100 mm) wird durch eine elektrischen Heizquelle mit einem Wärmestrom beaufschlagtAus der kontinuierlichen Messung des Sauerstoffverbrauchs wird die Wärmefreisetzungsrate berechnetAus dieser wird anschließend die Abbrandtiefe und die Abbrandrate abgeleitet					
Schemaskizze eines Kegelkalorimeters [34]					
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holzfeuchte [%]	Rohdichte [kg/m³]	β₀ [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung, Versuchsdauer und -bedingungen)
Martinka et al. [34]	Fichte (50 mm)	0	408	1,2	β₀ durch manuelle Messung des RQ, Wärmestromdichte 50 kW/m², 30 min
	Kiefer (50 mm)	0	482	0,87	
Mikkola [35]	Kiefer (38 mm)	10	560	0,80	50 kW/m²; verwendetes Messverfahren für β₀ unklar
	Fichte (38 mm)	10	480	0,80	
	LVL (37 mm)	10	520	0,82	
	Furniersperrholz (2x 12 mm, Birke)	8	640	1,14	
	Spanplatte (2x 18 mm)	8	670	0,97	
	Faserplatte (2x 12 mm)	8	300	1,80	
Tsantaridis et al. [52]	Fichte (145 mm)	14	464-501	0,97	50 kW/m², β₀ durch TE-Messung, 300 °C, 30 min
Terrei et al. [50]	Fichte (50 mm, vertikal orientiert)	9,5	490	0,64	60 kW/m², β₀ durch manuelle RQ-Messung, 20 min
White et al. [57]	Redwood	8-9	333	1,02	Ohio State University apparatus (OSU), 50 kW/m², β₀ durch TE-Messung, 300 °C
	Kiefer	8-9	452	0,85	
	Linde	8-9	400	1,31	
	Roteiche	8-9	683	0,73	

Tabelle 3-7: Bewertung des Verfahrens "Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter"

Bewertung „Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Einfache Durchführung Globale Messung Verlauf des Abbrands kann betrachtet werden Zeitliche Zuordnung der Abbrandtiefe zu weiteren Messwerten möglich (Druck, Temperatur, Brandgase) Keine Störung des PK durch Sonden oder TE-Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> Sauerstoffgehalt entspricht immer dem der Umgebung Unklarer Zusammenhang zwischen Wärme-freisetzungsrates oder Masseverlust und Abbrandtiefe
Fazit	
<p>Es konnten keine Versuche im Kegelkalorimeter gefunden werden, welche die Abbrandtiefe mit einer Relation zwischen Wärmedefreisetzungsrates und Abbrandtiefe bestimmt haben. Wegen der geringen möglichen Probekörpergröße und der fehlenden Regulierbarkeit des Sauerstoffgehalts wird das Kegelkalorimeter als Standardexperiment zur Bestimmung der Abbrandrate nicht weiter betrachtet.</p>	

Tabelle 3-8: Zusammenstellung des Verfahrens "Messung des Masseverlusts"

Verfahren „Messung des Masseverlusts“					
Beschreibung					
<ul style="list-style-type: none">Der Masseverlust des PK kann kontinuierlich (über Kraftmessdosen) und/oder einmalig nach Versuchsende gemessen werdenAus dem Masseverlust wird anschließend die Abbrandtiefe und die Abbrandrate errechnet				 <p>(b)</p> <p>Wiegen nach Versuchsende [28]</p>	
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holzfeuchte [%]	Rohdichte [kg/m³]	β ₀ [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung, Versuchsdauer und -bedingungen)
Fahrni et al. [21]	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,67	alle 4 Versuche nach ETK, 30, 60, 90 und 120 min; Messung des RQ per Wiegen nach Versuchsende
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,63	
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,61	
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,62	

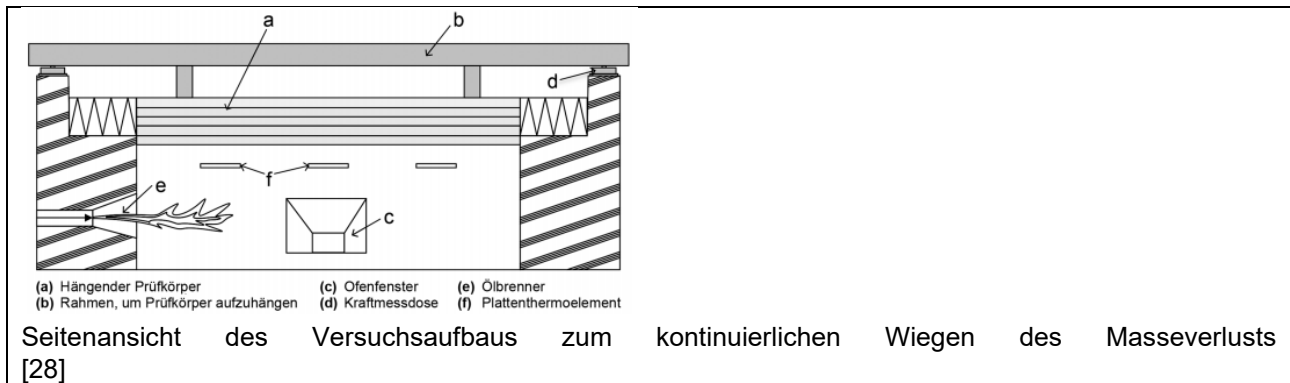



Tabelle 3-9: Bewertung der Methode "Messung des Masseverlusts"

Bewertung „Messung des Masseverlusts“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Einfache Durchführung Globale Messung Kontinuierliches Wiegen: Verlauf des Abbrands kann betrachtet werden Kontinuierliches Wiegen: Zeitliche Zuordnung der Abbrandtiefe zu weiteren Messwerten möglich (Druck, Temperatur, Brandgase) Keine Störung des PK durch Sonden oder TE-Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> Wiegen nach Versuchsende: Ergebnis ist nur eine konstante Abbrandrate Kontinuierliches Wiegen: Genauer Zusammenhang zwischen Masseverlust und Abbrand (Dichte der HK) muss bekannt sein (geringe) Messfehler durch Abfallen von Holzkohle im Prüfofen Messfehler durch Anhaftungen (Klebstoffe, Isoliermaterial) Messfehler durch mangelnde Genauigkeit einer Kranwaage
Fazit	
<p>Das kontinuierliche Wiegen bietet den Vorteil, dass der Verlauf des Abbrands betrachtet werden kann. Weiterhin ist es einfach durchzuführen. Das Wiegen nach Versuchsende hat keinen weiteren Vorteil. Geeignet wäre es v.a. für große, schwere PK. Nachteil bei beiden Varianten ist die Unsicherheit bzgl. des Zusammenhangs zwischen Abbrand und Masseverlust. Daher wird das Verfahren „Messung durch Masseverlust“ nicht weiter betrachtet.</p>	

Tabelle 3-10: Zusammenstellung des Verfahrens "Messung des RQ (manuell)"

Verfahren „Messung des RQ (manuell)“					
Beschreibung					
<ul style="list-style-type: none">Gängigstes Verfahren zur Abbrandmessung, bei dem der PK nach Versuchsende abgelöscht und die Holzkohle entfernt wirdDie Dicke des RQ wird mit Lineal oder Schiebelehre gemessenAus der Differenz aus Original- und RQ-Dicke wird die Abbrandtiefe und daraus die Abbrandrate ermittelt					
				Messung mit Schiebelehre [58]	
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holzfeuchte [%]	Rohdichte [kg/m³]	β₀ [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung und -dauer)
Lache [31]	Buche	8 & 20	700 & 689	0,80 & 0,72	gemittelt aus den Abbrandraten nach ETK, 30, 60 und 90 min
	Eiche	8 & 20	656 & 664	0,60 & 0,55	
	Kiefer (Splint & Kern)	8	497 & 491	0,81 & 0,69	
	Fichte	8 & 20	433 & 459	0,71 & 0,63	
	Meranti	8 & 20	544 & 559	0,59 & 0,56	
Lache [32]	Spanplatte (Fichte, 38 mm)	/	486 & 601	0,67 & 0,65	ETK, 30 min; die 2 Spanplatten aus Fichte wurden jeweils separat geprüft
	Spanplatte (Buche, 38 mm)	/	753	0,59	
	Sperrholz (Fichte, 39 mm)	/	512	0,65	
	Sperrholz (Buche, 40 mm)	/	764	0,66	
Huntierová (1995)	Flachpressplatte (Fichte, 38 mm)	20	480 & 580	0,54 & 0,50	ETK, 30 min
	Flachpressplatte (Buche, 38 mm)	20	720	0,46	
	Sperrholz (Fichte, 39 mm)	/	510	0,58	
	Massivholzplatte (Fichte, 80 mm)	/	450	0,57	
	Sperrholz (Buche, 40 mm)	/	740	0,64	
Lingens (2003)	Fichte	9,2 ± 1,2	400-510	0,67-0,80	ETK, 90 min
	Kiefer (Splint)	9,2 ± 1,2	390-510	0,80-0,92	
	Kiefer (Kern)	9,2 ± 1,2	390-510	0,68-0,73	
	Lärche	9,2 ± 1,2	590	0,70-0,76	
	Buche	9,2 ± 1,2	650-760	0,76-0,91	
	Ahorn	9,2 ± 1,2	570-630	0,89-1,00	
	Stieleiche	9,2 ± 1,2	650-720	0,68-0,73	

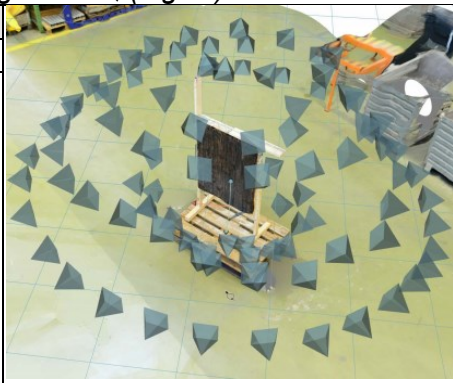
Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Roh- dichte [kg/m ³]	β_0 [mm/min]	Anmerkungen (Beanspru- chung und -dauer)
Zellner [60]	Spanplatte (32 mm)	6,3	647	0,73	ETK, 30 min
	Spanplatte (43 mm)	6,7	557	0,70	ETK, 30 min
	OSB (25 mm)	7,2	577	0,84	ETK, 12 min
	BSH (Fichte, 50 mm)	9,6	476	0,67	ETK, 30 min
Fornather [23]	BSH (Fichte)	9-12	418-484	0,66	ETK, 90 min, Wien
	BSH (Fichte)	9-12	418-484	0,54	ETK, 90 min, München
Fischer et al. [22]	Flachspanplatte (33 mm)	7,1	350	1,10	ETK, 30 min
	Strangpressplatte (42 mm)	7,6	450	0,80	
	Flachpressplatte (Fichte, 31 mm)	7,4	450	0,83	
	Flachpressplatte (Fichte, 60 mm)	7,3	460	0,75	
	Flachpressplatte (Fichte, 42 mm)	7,3	580	0,67	
	OSB (Kiefer, 22 mm)	6,9	640	0,69	
	Massivholzplatte (Stieleiche, 49 mm)	8,9	615	0,64	
Fischer et al. [22]	Massivholzplatte (Buche, 42 mm)	5	670	0,82	
HFM Bericht 944080 [13]	Weißbuche	-	778	0,66	ETK, 30 min
	Rotbuche	-	728	0,75	
	Eiche	-	779	0,52	
	Kiefer	-	618	0,63	
	Meranti	-	641	0,54	
HFM Bericht 954054 [14]	Meranti	-	534	0,57	ETK, 30 min
	Fichte	-	456	0,51	
	Eiche	-	802	0,50	
	Buche	-	747	0,67	
Schröck [49]	Massivholzplatte (Fichte, 43 mm)	-	470	0,56	ETK, 30 min; Messung RQ (manuell) und mit Sonden
	Spanplatte (38 mm)	-	553	0,77	
HFM Bericht 954136 [12]	Sperrholz (Buche, 32 mm)	/	768	0,67	ETK, 30 min
Schleifer et al. [45]	Massivholzplatte (54 mm)	13	420	0,66	alle Versuche: ETK
	3-Schichtplatte (54 mm)	10,5	450	0,84	
	Massivholzplatten (2x 27 mm)	11	404-441	0,62	β_0 der ersten Platte
	3-Schichtplatten (2x 27 mm)	11	396-416	1,13 0,85	& β_0 der ersten und zweiten Platte
	OSB (2x 25 mm)	9-11	568-592	0,63 0,71	& β_0 zweier PK
Wörle [58]	3-Schichtplatte (Fichte, 42 mm)		455-478	0,64	ETK, 30 min

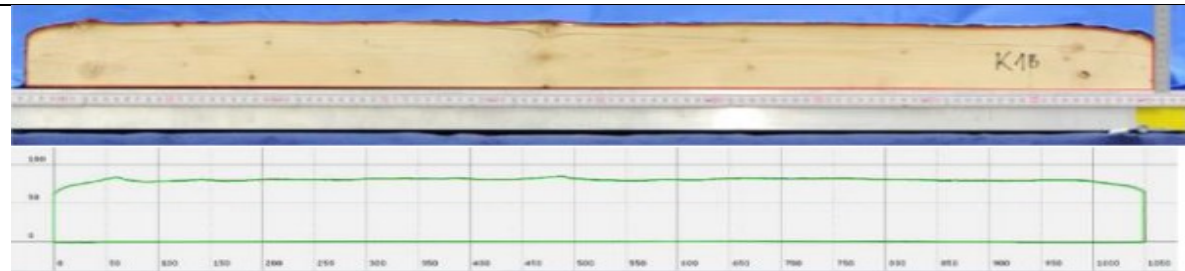
Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Roh- dichte [kg/m ³]	β_0 [mm/min]	Anmerkungen (Beanspru- chung und -dauer)
	Sperrholz (Fichte, 39 mm)		547	0,70	
	Sperrholz (Buche, 40 mm)		838	0,67	
	OSB (30 mm)		622	0,78	
	Spanplatte (38 mm)		628	0,70	

Tabelle 3-11: Bewertung der Methode "Messung des RQ (manuell)"

Bewertung „Messung des RQ (manuell)“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Einfach in Technik und Anwendung • Ausreichend genaue Messungen möglich • Keine EDV notwendig • Keine Störung des PK durch Sonden oder TE-Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnis ist nur eine konstante Abbrandrate • zeitaufwändig (ca. 50-90 min/m²) • Keine zeitliche Zuordnung der Abbrandtiefe zu weiteren Messwerten möglich (Druck, Temperatur, Brandgase) • Beginn der Kohlebildung nicht feststellbar • Bei zu großem Messraster (> ca. 50 x 50 mm) -> welliger RQ führt zu falschen Mittelwerten • Messfehler durch Löschverfahren
Fazit	
<p>Die einfache Handhabung des Verfahrens macht es überall einsetzbar. Es liefert zuverlässige Ergebnisse und kann mindestens als sinnvolle Ergänzung zur Kontrolle kontinuierlicher Messungen nach einem Versuch angewendet werden. Augenmerk bei der Ausführung ist auf ein ausreichend kleines Messraster und ein angemessenes Löschverfahren zu legen. Ersteres sorgt für verlässliche Mittelwerte für β_0, letzteres verhindert wirksam ein Weiterschwelen im RQ.</p>	

Tabelle 3-12: Zusammenstellung des Verfahrens „Messung des RQ (digital)“

Verfahren „Messung des RQ (digital)“					
Beschreibung					
<ul style="list-style-type: none">Der PK wird nach Versuchsende abgelöscht und die Holzkohle entferntDer RQ kann als 2D- oder 3D-Modell digitalisiert werden<ul style="list-style-type: none">2D durch Fotografie und Section Scanning3D durch Scan-Technik (Structured Light Scan oder LiDAR) oder FotografieAus der Differenz aus Original- und RQ-Dicke wird die Abbrandtiefe und daraus die Abbrandrate ermittelt					
					
					3D durch Fotografie [21]
Literaturwerte					
Autor	Holzart	Holz- feuchte [%]	Roh- dichte [kg/m³]	β_0 [mm/min]	Anmerkungen (Beanspruchung, Versuchsdauer und -bedingungen)
Fahrni et al. [18]	BSH (GL24h, Fichte)	ca. 11,6	378-458	0,70-0,72	Beaufschlagung nach ETK, Versuche unter Biegebelastung (0,2-0,3*F _u); Messung des RQ per Section Scanning (2D)
	BSH (GL36h, Fichte)	ca. 11,2	428-458	0,63-0,70	
Fahrni et al. [21]	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,67	alle 4 Versuche nach ETK, 30, 60, 90 und 120 min; Messung des RQ per Fotografie (3D)
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,63	
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,61	
	Brettstapelholz (Fichte)	ca. 14	448-451	0,62	



2D-Modell durch Fotografie und Section Scanning [48]

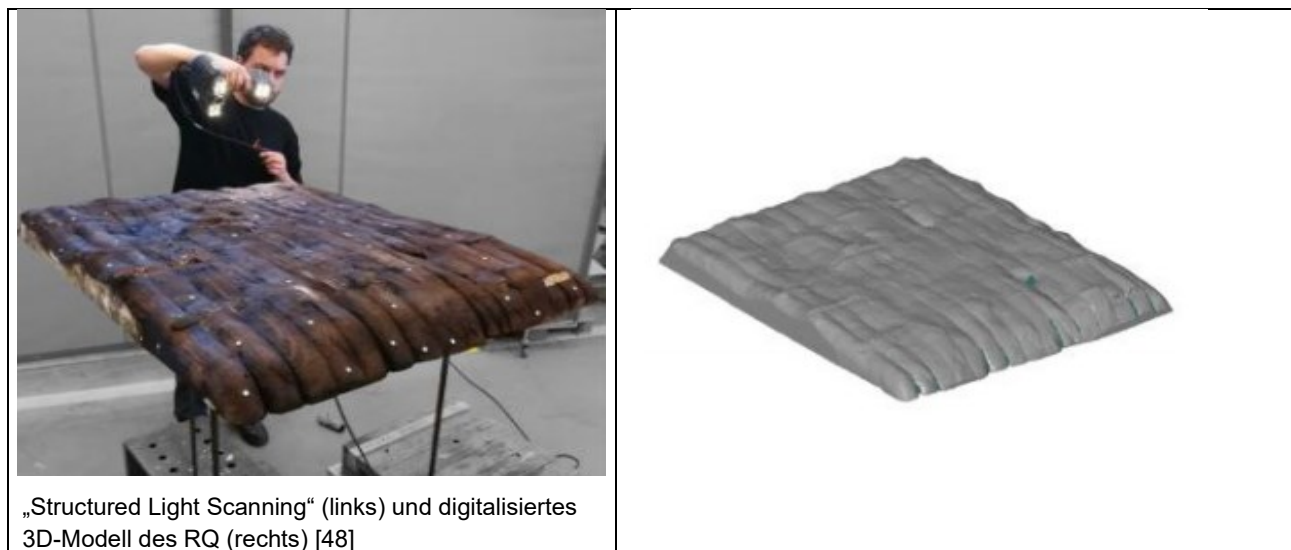


Tabelle 3-13: Bewertung der Methode "Messung des RQ (digital)"

Bewertung „Messung des RQ (digital)“	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Sehr genau • Einfache Durchführung • Große Anzahl an Messpunkten • Globale Messung • 3D-Methoden sind zeitsparend, 15 min/m² (Fotografie) und 60 min/m² (3D-Scan, LiDAR) • 3D-Methoden: Globale Minima/Maxima bestimmbar • Vielfältige Darstellung des Datensatzes möglich • Keine Störung des PK durch Sonden oder TE-Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • EDV und spezielle Software notwendig • Ergebnis ist nur eine konstante Abbrandrate • 3D-Scan-Methoden sind fehleranfällig (Belichtung, Reflexionen des PK) • Section Scanning ist zeitaufwändig (ca. 300 min/m²)
Fazit	
<p>Bei richtiger Ausführung liefert das Verfahren sehr genaue und globale Messungen des RQ. Die 2D-Methode ist zeitaufwändig und daher wenig geeignet für ein Standardprüfverfahren. Zur Bestimmung von β_0 sind die 3D-Methoden geeignet, verlangen jedoch spezielle Ausrüstung und Software, sowie große Sorgfalt und Fachkenntnis. Letzteres macht die Methode fehleranfällig. Die 3D-Methode mittels Fotografie kann als Standardprüfverfahren geeignet sein. In der vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten zum Durchführen dieser Methode geprüft.</p>	

Die Auswertung aus den vorangestellten Tabellen wurde in den nachfolgenden Diagrammen Abbildung 3-25 bis Abbildung 3-30 zusammenfassend dargestellt. Hier wurde zwischen den Messergebnissen aus der Messung über Keramiklanzen (Sonden), Thermoelemente (TE), Restquerschnitt mit manueller Abbrandmessung (RQ manuell), Restquerschnitt mit digitaler Messung (RQ digital) sowie dem Cone-Kalorimeter (CC) und dem Ergebnis mittels Wiegen (Wiegen) unterschieden. Die durchgehende Linie zeigt einen Abbrand nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 [4], die rote Raute die Mittelwerte der zugehörigen Versuchsergebnisse.

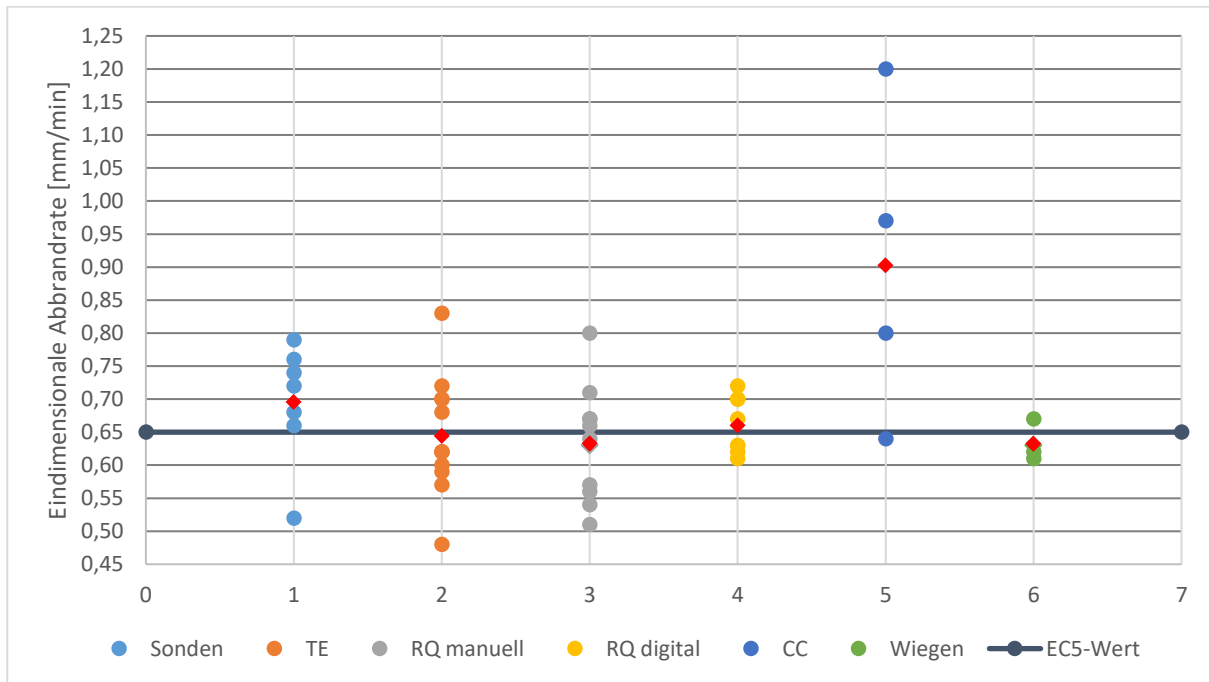


Abbildung 3-25: Zusammenstellung der Abbrandraten für Fichte; rote Raute - Mittelwert

Abbildung 3-25 zeigt deutlich den Einfluss und die Streuung der unterschiedlichen Messmethoden für den Abbrand. Bis auf das Cone-Kalorimeter bzw. Kegelkalorimeter (CC) liegen die Mittelwerte aller Versuche nahe an der eindimensionalen Abbrandrate nach DIN EN 1995-1-2 [4] von 0,65 mm/min. Die große Abweichung des CC lässt sich dadurch erklären, dass es sich hierbei um keinen Versuch unter EKT-Beanspruchung und in einer Umgebung eines Brandprüfofens gemäß DIN EN 1363 [7] handelt (Sauerstoffgehalt ca. 1 bis 10 %, sondern um eine Umgebung mit einem Sauerstoffgehalt von ca. 21%.

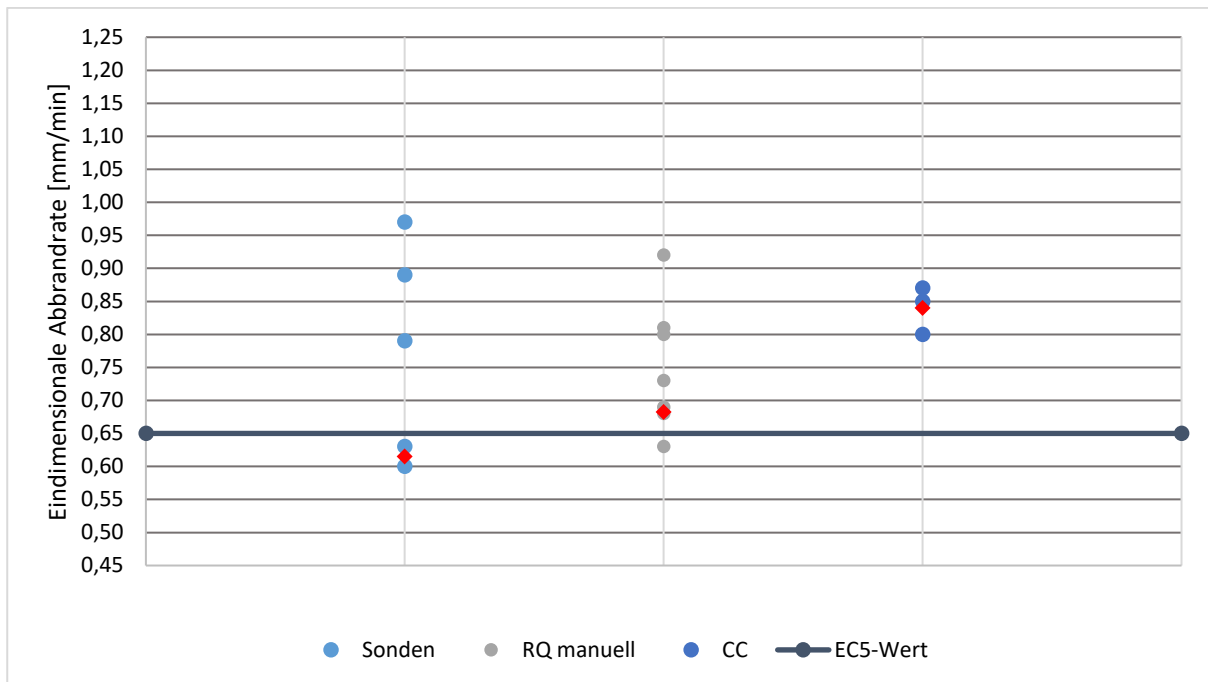


Abbildung 3-26: Zusammenstellung der Abbrandraten für Kiefer; rote Raute - Mittelwert (inkl. Southern Pines) In Abbildung 3-26 zeigt sich ebenfalls, dass die Werte für das CC wesentlich höhere Abbrandraten im Vergleich zum Restquerschnitt liefern. Die Ergebnisse resultierend aus der Messung mittels Sonden und über den Restquerschnitt (RQ) zeigen hier eine sehr große Streuung für Messwerten an Kiefern-Splintholz von Lache [31] und Lingens [33]. Diese Ergebnisse wurden nicht in die Mittelwertbildung mit einbezogen.

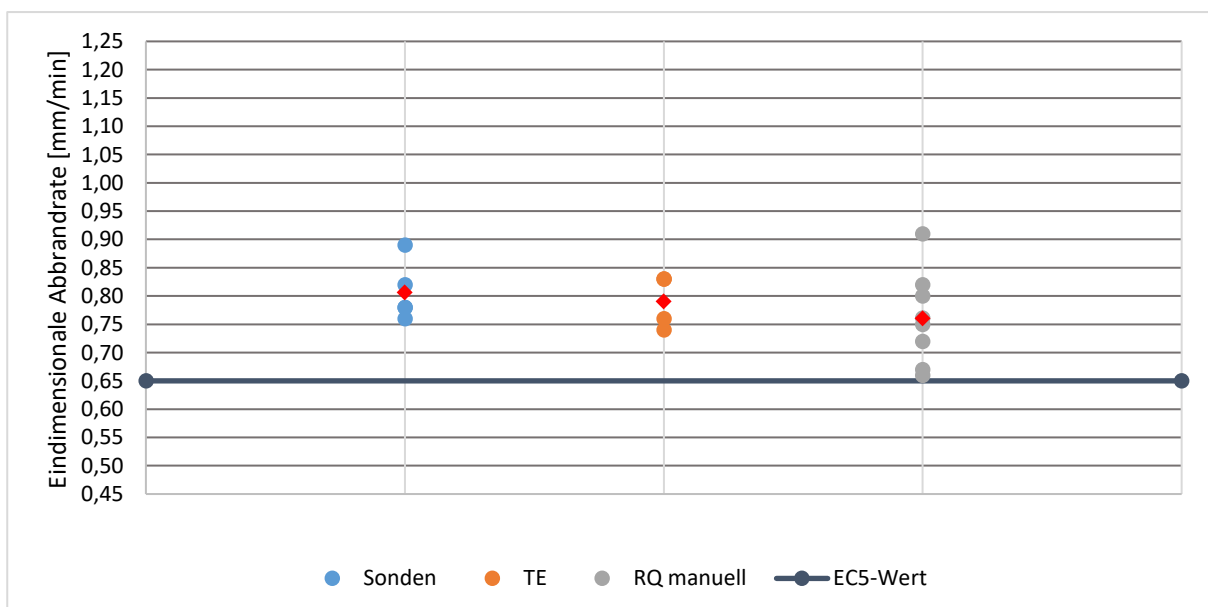


Abbildung 3-27: Zusammenstellung der Abbrandraten für Buche (inkl. Weiß- und Rotbuche); rote Raute - Mittelwert

Abbildung 3-27 zeigt die Messwerte der Abbrandrate für Buchenholz. Die Werte liegen alle über den Werten für Fichte und der Abbrandrate in DIN EN 1995-1-2 [4] und bestätigen somit den Ansatz einer höheren Abbrandrate in prEN 1995-1-2 [5]. Ein Ähnliches Bild zeigt sich bei der Auswertung der Ergebnisse für Eiche in Abbildung 3-28. Hier liegen die Abbrandraten, bestimmt über Thermoelemente im Bereich der normativen Abbrandrate der DIN EN 1995-1-2 [4] von 0,5 mm/min. Die Auswertung der Messmethoden über Sonden sowie den Restquerschnitt liefern jedoch höhere Werte.

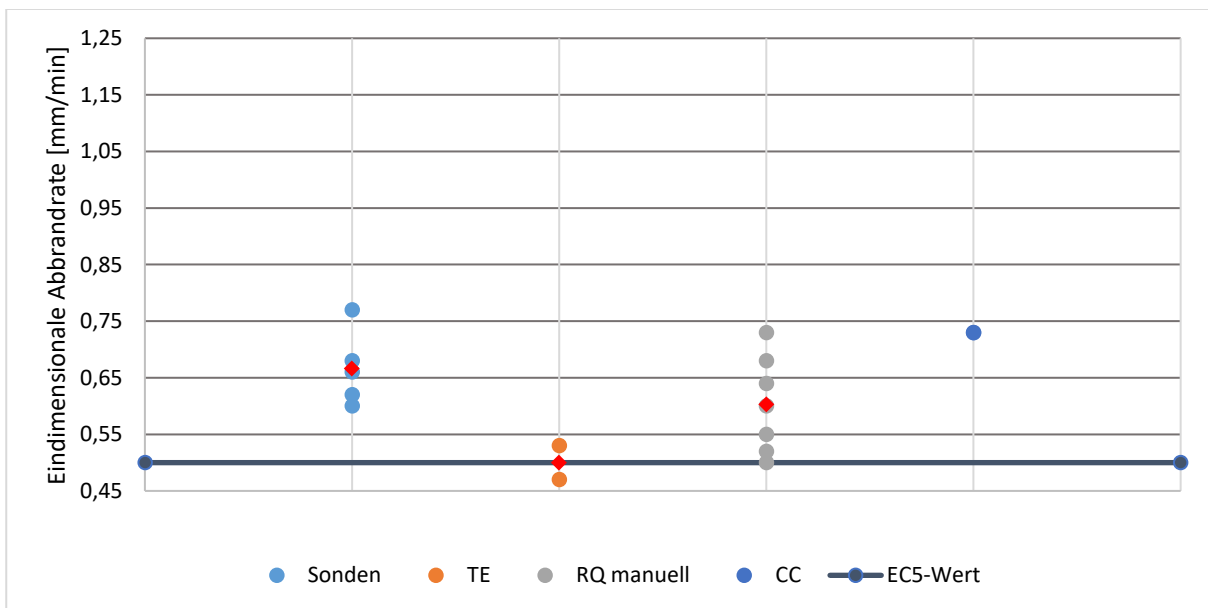


Abbildung 3-28: Zusammenstellung der Abbrandraten für Eiche (inkl. Rot- und Weißbeiche); rote Raute - Mittelwerte [46]

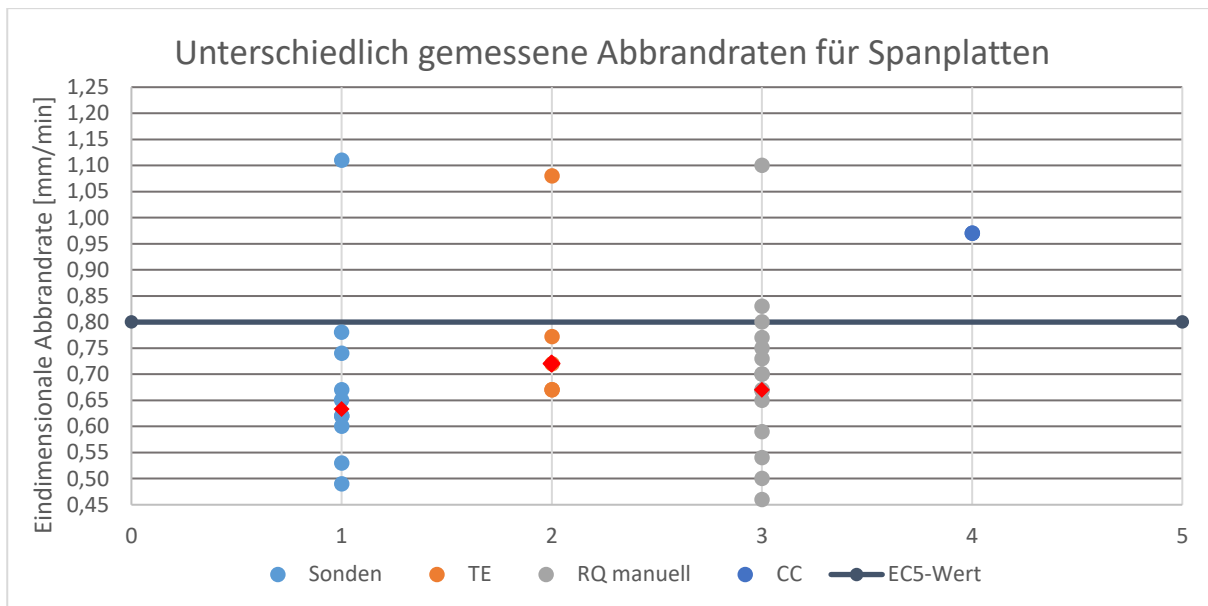


Abbildung 3-29: Zusammenstellung der Abbrandraten von Spanplatten; rote Raute - Mittelwert

Abbildung 3-29 zeigt die Auswertung der Ergebnisse für Spanplatten. Der normative Werte bezieht sich auf eine mittlere Plattendicke von 37 mm und eine Rohdichte von 570 kg/m³ und würde über die Gleichungen 3.4 bis 3.6 nach DIN EN 1995-1-2 [4] (vgl. Gl. 3-5 bis 3-7), abhängig von der Plattendicke und der Rohdichte bestimmt.

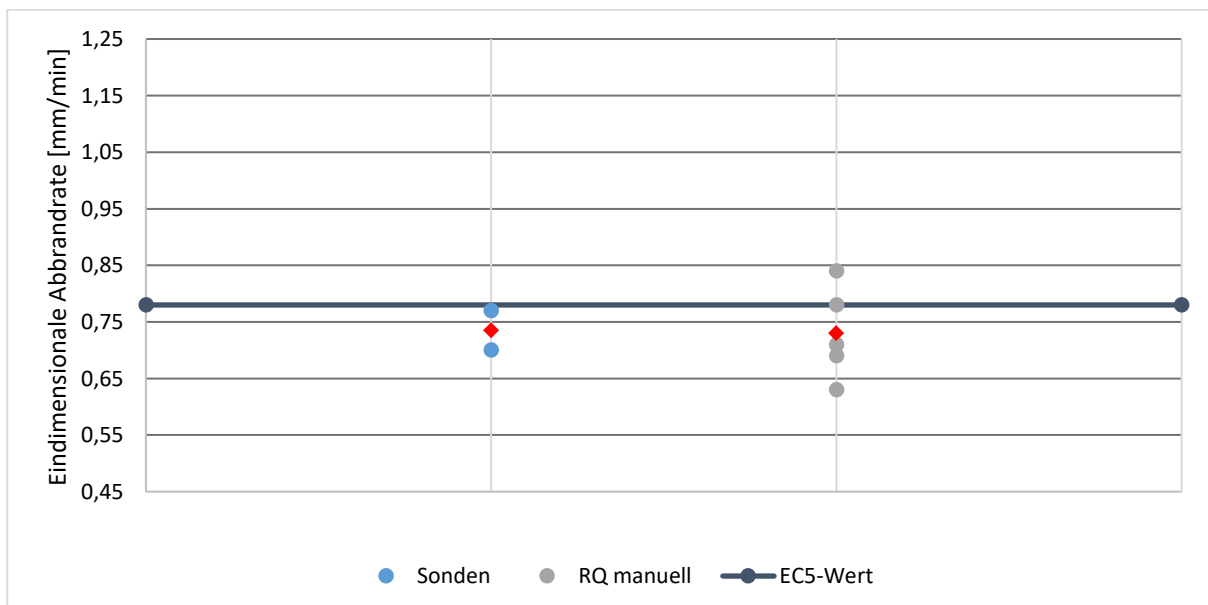


Abbildung 3-30: Zusammenstellung der Abbrandraten von OSB; rote Raute - Mittelwert

Die gemessenen Abbrandraten für OSB-Platten sind in Abbildung 3-30 dargestellt. Hier wurde der normativ berechnete Wert ebenfalls unter Berücksichtigung der mittleren Plattendicke von 25 mm und einer Rohdichte von 602 kg/m³ bestimmt.

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \times k_\rho \times k_h \quad [\text{mm/min}] \quad (3-5)$$

β_0	[mm/min]	eindimensionale Abbrandrate gemäß DIN EN 1995-1-2:2010, Tabelle 3.1
k_ρ	[-]	Beiwert
k_h	[-]	Beiwert

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450 \text{ kg/m}^3}{\rho_k}} \quad [-] \quad (3-6)$$

k_ρ	[-]	Beiwert
ρ_k	[kg/m ³]	charakteristische Rohdichte
$k_h = \sqrt{\frac{20 \text{ mm}}{h_p}}$	[-]	(3-7)

k_h	[-]	Beiwert für Plattendicken < 20 mm
h_p	[mm]	Werkstoffdicke

4 Experimentelle Untersuchung

4.1 Versuchskonzept

Resultierend aus den Ergebnissen der Abbildung 3-25 bis Abbildung 3-30 ist erkennbar, dass die Ergebnisse aus dem Cone-Kalorimeter zu höhere Abbrandraten führen, als die Bestimmungsmethoden basierend auf Brandversuchen unter ETK-Beanspruchung. Um die Vergleichbarkeit der zu Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN EN 1363 [7] zu gewährleisten, wurden für diese Experimentellen Untersuchung ausschließlich Brandversuche unter ETK- Beanspruchung geplant. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für den Abbrand bzw. des eindimensionalen Wärmedurchgangs der unterschiedlichen Ofengrößen wurde z.B. durch Rauch [41] gezeigt. Die wirtschaftlichste Variante zur Bestimmung der Abbrandrate wäre somit der genormte Brandprüfofen nach DIN 4102-8 [3]. Basierend auf dieser Erkenntnis und unter den gegebenen finanziellen und zeitlichen Randbedingungen wurden somit Abbrandraten von Massivholz und Holzwerkstoffplatten in der Größe von ca. 50 cm x 50 cm in unterschiedlicher Ausrichtung sowie unterschiedlichen Prüfinstituten untersucht. Ergänzend konnte auf einen Vergleichsversuch im 1-m Ofen in horizontaler Ausrichtung, durchgeführt durch den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TUM zurückgegriffen werden. Es wurden elf Versuche (V1 bis V11) im Brandprüfstand nach DIN 4102-8 [3] und ein Versuch (V12) in einem Brandprüfstand mit den Abmessungen von ca. 1,4 m x 1,4 m (Meterofen) ausgewertet und verglichen. V10, V11 und V12 sind Versuchsergebnisse zur Untersuchung der stirnseitigen Abbrandrate von Brettsperrholz. Somit können V 10 bis V12 nur untereinander verglichen werden, ein genereller Bezug zu den ermittelten Abbrandraten für Massivholz oder Holzwerkstoffplatten, wie in V1 bis V7 ist nicht möglich. In nachfolgender Tabelle 4-1 werden die unterschiedlichen Versuche dargestellt.

Tabelle 4-1: Versuchskonzept mit geplanter Beanspruchungsdauer, V1 bis V11 im Brandprüfofen nach DIN 4102-8 [3], V12 im 1-m Maßstab und horizontaler Ausrichtung.

Versuch Nr.	Ort	PK Nr.	Material	Beanspruchung und Branddauer	Temperaturmessung im Ofen (fett: Ofensteuerung)	Abbrandmessung
V1	Leipzig	1	KVH	ETK, 120 min	PL + MT (G)	TE + RQ
V2	Leipzig	2.1 & 2.2	KVH	ETK, 120 min	PL + MT	TE + RQ
V3	Leipzig	3.1 & 3.2	KVH	ETK, 120 min	PL + MT	TE + RQ
V4	Leipzig	4.1 & 4.2	HWP	ETK, 60 min	PL + MT	TE

V5	Stuttgart	5	KVH	ETK, 120 min	PL + MT	TE + RQ
V6	Stuttgart	6	HWP	ETK, 60 min	PL + MT	TE
V7*	Stuttgart	7	KVH	ETK, 120 min	PL + MT	TE + RQ
V8	Kaiserslautern	8	KVH	ETK, 120 min	PL + MT	TE + RQ
V9	Kaiserslautern	9	HWP	ETK, 60 min	PL + MT	TE
V10	Leipzig	10.1 & 10.2	BSP***	ETK, 90 min	PL + MT	TE + RQ
V11	Leipzig	11.1 & 11.2	BSP***	ETK, 90 min	PL + MT	TE + RQ
V12**	Leipzig	12	BSP***	ETK, 90 min	PL + MT	TE + RQ

* Versuch im Teil-8-Ofen der MPA Stuttgart, Probekörper horizontal eingebaut

** Versuch im 1-m- Ofen, durchgeführt an der MFPA in Leipzig

*** Brandbeanspruch einer Platte aus BSP an den Schmalseiten (kein Abfallen von Brettlamellen)

(G) Messung der Gaskonzentration (Sauerstoff (O₂), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂))

Abkürzungen: KVH – Konstruktionsvollholz, HWP – Holzwerkstoffplatte, BSP Brettspertholz, PL – Plate Thermoelement, MT – Mantelthermoelement, TE - Thermoelement, RQ – Restquerschnitt

Die Versuche V8 und V9 wurden infolge eines technischen Defektes der Steuerungstechnik innerhalb des Brandversuchs nicht zur Auswertung herangezogen.

Eine Zuordnung der in den Versuchen entsprechend Tabelle 4-1 untersuchten Einflussfaktoren sowie die für den Versuch definierten Randbedingungen ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Einflussfaktoren der Abbrandrate in den Versuchen V1 bis V12, fett dargestellte Parameter wurden innerhalb dieser Untersuchung variiert.

	Einflussfaktoren	Randbedingungen der Versuche V1 bis V12
Äußere Einflussfaktoren	Brandszenario	ETK
	Prüfofen	Vergleich im Rahmen dieses Vorhabens Teil- 8: (Leipzig, Stuttgart) Meterofen: (Leipzig)
	Sauerstoffgehalt	wurde erfasst (Gasmessungen im Ofen)
	Ofendruck	Überdruck nach DIN EN 1363-1:2020 (20 Pa)
	Mechanische Belastung	Keine
	Temperaturmessung und Ofensteuerung	Vergleich Mantelthermoelement (MT) und Plattenthermoelement (PL), sowie MT in der Ebene der PK-Oberfläche ohne Abbrand
	Messmethode	wurde untersucht (TE und RQ)
Innere Einflussfaktoren	Rohdichte	435 kg/m ³ (KVH) und 611 kg/m ³ (HWP)
	Holzfeuchte	13, 7 % (KVH) und 7,4 % (HWP)
	Faserorientierung/Permeabilität	Brandbeanspruchung quer zur Faser
	Spezies	Fi/Ta (KVH)
	Jahrringlage und -orientierung	Nicht einheitlich
	Spangröße, Spanausrichtung und Bindemittel bei HWS	Spanplatte (keine Spanorientierung)
Einfluss des Prüfkörpers	Prüfkörperanzahl, -einbau	wurde untersucht (1 und 2 PK gleichzeitig)
	Orientierung im Prüfofen	wurde untersucht (V7)
	Prüfkörpergeometrie	50 x 50 cm im Teil-8 1,4 m x 1,4 m im Meterofen (V12)

4.2 Untersuchungen Teil-8-Versuche

4.2.1 Prüfeinrichtungen

Die Versuche V1 bis V 11 wurden im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 [3] durchgeführt. Entgegen DIN 4102-8 wurde in Kaiserslautern ein Gasbrenner verwendet wird. Zusätzlich wurden in allen Versuchen die Prüfbedingungen an DIN EN 1363 [7] angepasst. Daraus resultiert ein Ofendruck von 20 Pa Überdruck (anstelle 10 Pa) und eine Steuerung der Ofentemperatur über Plattenthermoelement anstelle von Mantelthermoelementen. Lediglich in V3 wurde zu Vergleichszwecken ein Mantelthermoelement zur Ofensteuerung verwendet. Beide Thermolemente wurden jeweils 100 mm vor der Probekörperoberfläche platziert. In allen Versuchen wurden zusätzlich zum normativ geforderten Thermolement zur Ofensteuerung Mantelthermoelemente zusätzlich zum Plattenthermoelement und direkt an der Prüfkörperoberfläche platziert.

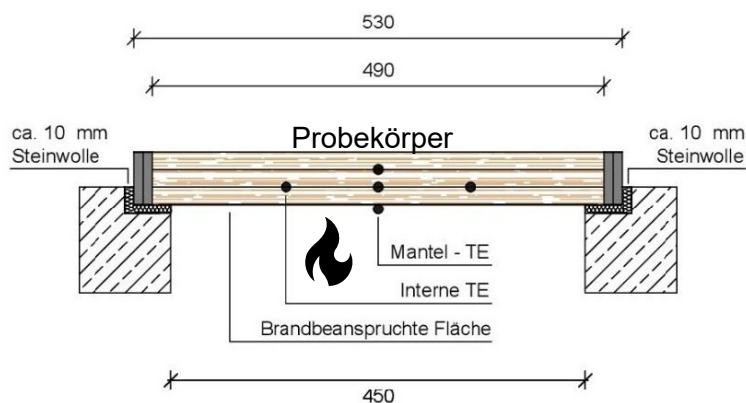





Abbildung 4-1: Einbau des Probekörpers in Falz des Prüfofens, somit zurückgesetzt im Vergleich zur Ofeninnenwand.

Die unterschiedlichen Öfen der Prüfstellen sind in Tabelle 4-2 mit den jeweiligen Besonderheiten bzw. Abweichung dargestellt.

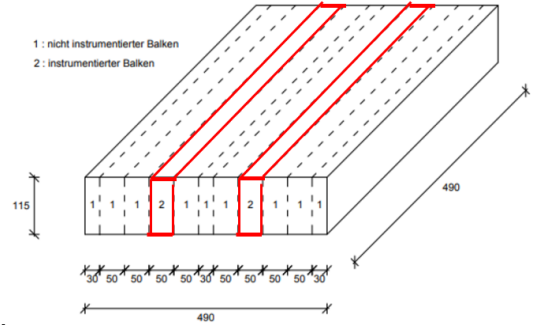

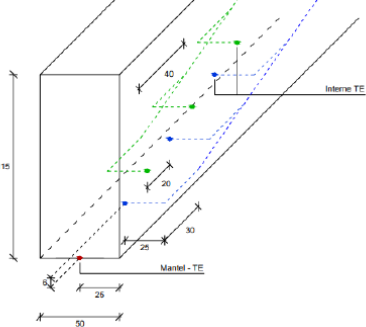
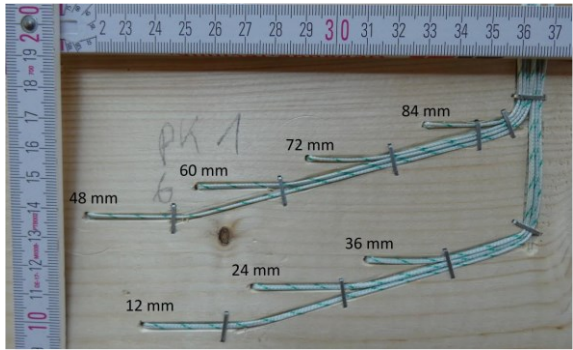
Tabelle 4-3: Unterschiedliche „Teil-8“ – Brandprüfeinrichtungen

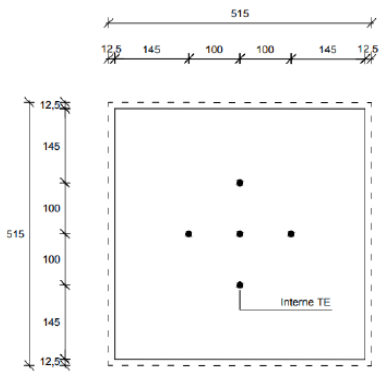
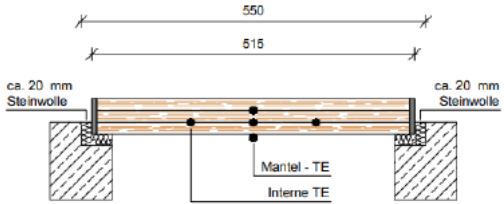
		
Abbildung 4-2: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MFPA Leipzig	Abbildung 4-3: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MPA Stuttgart	Abbildung 4-4: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an TU in Kaiserslautern
Brenner		
Ölzerstäubungsbrenner mit integrierter Luftzufuhr und händischer Steuerung	Ölzerstäubungsbrenner mit Luftzufuhr über ein extra Gebläse. Automatische Brennersteuerung	Gasbrenner mit integrierter Luftzufuhr und vollautomatischer Steuerung
Ofensteuerung		
Plattenthermoelement 100 mm vor dem Probekörper. In V3 Steuerung über Mantelthermoelement	Plattenthermoelement 100 mm vor dem Probekörper.	Plattenthermoelement 100 mm vor dem Probekörper
Probekörperanzahl (PK) und Probekörperorientierung Horizontal (HO) / Vertikal (VT)		
1 PK VT (V 1) 2 PK VT (V2, V3, V4, V10, V11)	1 PK VT (V 5, V6) 1 PK HO (V7)	1 PK VT (V8, V9)

4.2.2 Probekörper

In allen Teil-8 Versuchen wurden die Probekörper aus einer Charge Holz gefertigt. Dabei wurden zum einen Holzwerkstoffplatten (Spanplatten) und Massivholzprobekörper aus verklebten Konstruktionsvollholz (KVH) gefertigt. Das KVH hatte eine mittlere Rohdichte von 435 kg/m^3 und eine mittlerer Holzfeuchte von 13,7 %. Die Spanplatten eine Rohdichte von 611 kg/m^3 und eine Holzfeuchte von 7,4 %. Zur Messung der Temperatur im Probekörper wurden Thermoelemente Typ K mit verdrehter Spitze verwendet. In Rauch [41] wurde gezeigt, dass die verdrehte Spitze im Vergleich zur verschweißten Spitze keine signifikanten Temperaturunterschiede liefert.

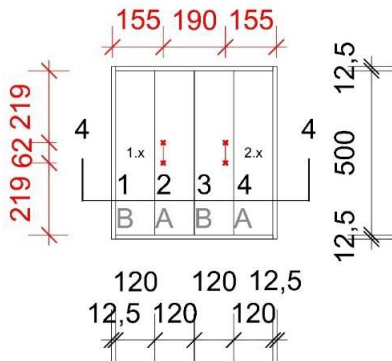

Tabelle 4-4: Darstellung der Probekörper (V1 bis V 9)

 <p>1 : nicht instrumentierter Balken 2 : instrumentierter Balken</p>	
<p>Abbildung 4-5: Massivholzprobekörper, verklebt mit zwei instrumentierten Lamellen</p>	<p>Abbildung 4-6: Massivholzprobekörper, verklebt mit zwei instrumentierten Lamellen</p>
	
<p>Abbildung 4-7: Systematische Darstellung der instrumentierten Lamelle, Horizontalabstand der Messpunkte: 20 mm, Vertikalabstand 6 mm</p>	<p>Abbildung 4-8: Systematische Darstellung der instrumentierten Lamelle, eingebaute Probekörper</p>

	
<p>Abbildung 4-9: Probekörper Spanplatte, 19 mm dick, hinterlegt im zwei 19 mm dicken Spanplatten und 5 Messpunkten über die Fläche verteilt.</p>	<p>Abbildung 4-10: Probekörper Spanplatte, 19 mm dick, hinterlegt im zwei 19 mm dicken Spanplatten. Thermoelemente in den Zwischenlagen</p>

Die Ergebnisse der Probekörper für V 10 und V 11 basieren auf den Untersuchungen von stirnseitig beanspruchtem Brettsperrholz. Der Aufbau der Probekörper kann den Abbildungen in Tabelle 4-5 entnommen werden. Der Einbau erfolgt wie bei den bereits dargestellten Probekörpern, vorgesetzt vor der Ofenfalz und die Ofentemperatur wurde mittels Plattenthermoelementen entsprechend an DIN EN 1363 [7] gesteuert.

Tabelle 4-5: Teil-8 Probekörper aus der Untersuchung von stirnseitig beanspruchtem Brettsperrholz

	
<p>Abbildung 4-11: Probekörper stirnseitig beanspruchtes Brettsperrholz – Ansicht mit zwei instrumentierten Balken (V10 und V11)</p>	<p>Abbildung 4-12: Probekörper stirnseitig beanspruchtes Brettsperrholz – Ansicht feuerabgewandt mit zwei instrumentierten Balken (V10 und V11)</p>

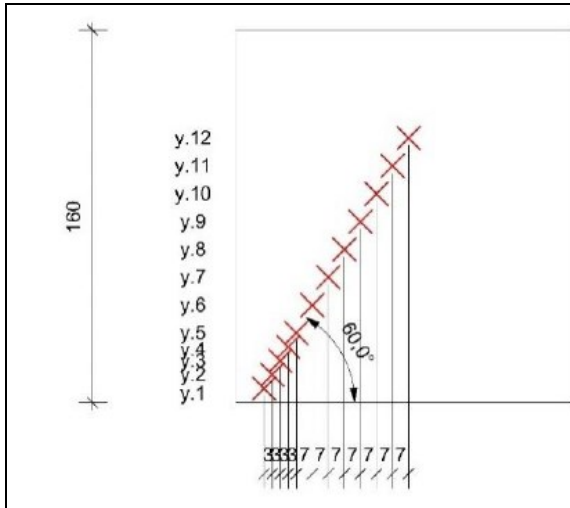


Abbildung 4-13: Anordnung der Thermoelemente im Probekörper - Winkel von 60 °.

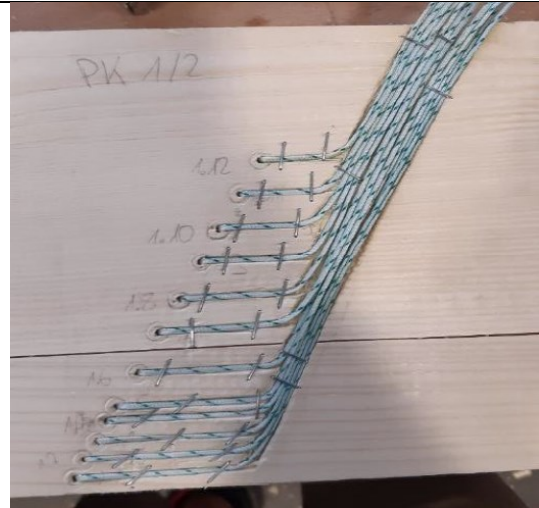


Abbildung 4-14: Einbau der Thermoelemente.

4.2.3 Versuchsdurchführung

Die Probekörper wurden in allen Teil-8-Versuchen in den Ofen eingebaut und unter ETK beansprucht. Die Steuerung der Temperatur erfolgte über die in Tabelle 4-1 „fett“ dargestellten Thermoelemente. Während des Versuchs wurde die Temperatur durch Thermoelemente, eingebaut entsprechend Abschnitt 4.2.2 sowie auf der feuerabgewandten Probekörperseite gemessen. Zusätzlich erfolgte eine Messung der Konzentration von Sauerstoff (O_2), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) im Brandraum in den in Tabelle 4-1 mit (G) gekennzeichneten Versuchen. Diese Messung wurde mit dem Emissionsmessgerät Testo 350 durchgeführt, welches in V1 mit dem Gasmessgerät der MFPA in Leipzig (SICK) verglichen wurde und vergleichbare Ergebnisse liefert.



Abbildung 4-15: Gasanalysegerät Testo 350

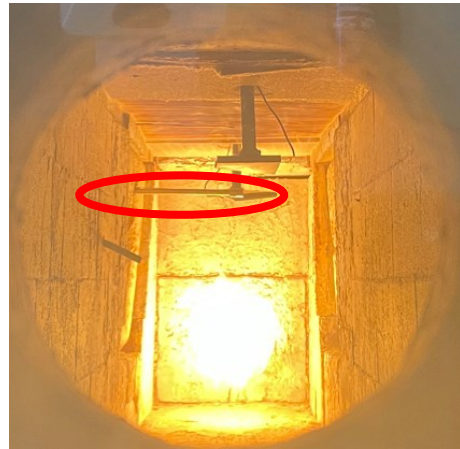


Abbildung 4-16: Messlanze für die Gasanalyse, Ansaugöffnung angeordnet in der Ebene des Thermoelementes zur Ofensteuerung, ca. 100 mm vor dem Probekörper (Beispiel Stuttgart)

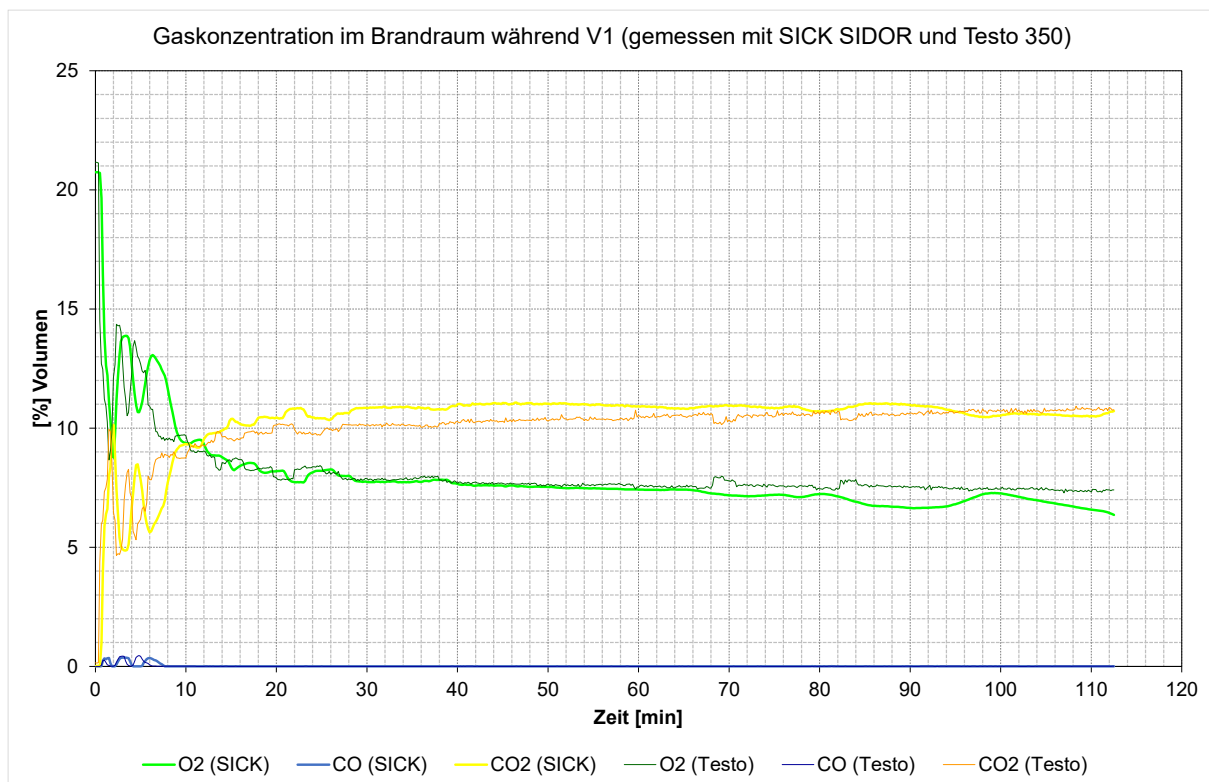


Abbildung 4-17: Vergleich der Messergebnisse (SICK der MFPA Leipzig) zur Validierung der Gas-messung mit dem TESTO 350 (Testo)

Jeweils nach Versuchsende wurden die Probekörper mit technisch geringstmöglichem Zeitverzug ausgebaut und mit Wasser abgelöscht. Danach wurde der bei den Massivholzprobekörpern der Restquerschnitt entsprechend Abschnitt 3.2.2 bestimmt (vgl. Abbildung 3-6 bis Abbildung 3-9). Die Holzkohle des abgelöschten Probekörpers wurde zuerst mit einer Spachtel, anschließend mit einer Drahtbürste (Stahl) maschinell mittels Akkuschrauber und anschließend händisch entfernt. Danach wurde der Restquerschnitt durch eine Messung mittels Schublehre bestimmt. Da die Probekörper aus Holzwerkstoffplatten immer bis zum vollständigen Durchbrand im Ofen beansprucht wurden, erfolgte die Auswertung des Abbrandes ausschließlich über eine indirekte Messung mittels parallel zur Isotherme eingebauter Thermoelemente (vgl. Abschnitt 3.2.6). Neben der händischen Messung wurde ein Vergleich unterschiedlicher Messmethoden des Restquerschnittes durchgeführt. Hierfür wurde der Probekörper digitalisiert und mittels 3D-Scan, LIDAR sowie photogrammetrisch vermessen und ausgewertet.

Nachfolgend werden die einzelnen Versuchsergebnisse dargestellt.

4.2.4 Versuch V1 (PK 1): Referenzversuch

Der Versuch V1 wurde mit nur einem Probekörper durchgeführt, um den Einfluss eines oder zweier gegenüberliegender Probekörper zu vergleichen. Zu Beginn der Testreihe wurde ein Versuch (V1) mit nur einem PK durchgeführt. V1 fand am 07.09.2022 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig statt und diente u.a. als Referenz für die nachfolgenden Versuche. Es sollte untersucht werden, ob sich gleichzeitig im Prüfstand eingebaute Prüfkörper gegenseitig im Abbrand beeinflussen. Neben den Temperaturmessungen wurden auch die Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlenmonoxid und -dioxid im Prüfofen gemessen. Die geplante Beanspruchungsdauer betrug 120 min. In Prüfminute 112 erfolgte ein Durchbrand von Prüfkörper 1. Tabelle 4-6 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Daten von V1.

Tabelle 4-6: Übersicht V1 (PK 1)

Versuch V1 (PK 1)	
Material / Rohdichte [kg/m^3] / r.F. [%]	KVH (Fichte) / 435 / 13,7
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 480 x 115
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal, Lamellen stehend
Instrumentierte Lamelle im Abbrandschatten	Lamelle 6
Mittelwert des Ofendrucks [Pa]	18,8
Mittelwert der O_2 -Konzentration im Prüfofen [%]	8,1

Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	10,1
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	112,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	0,26 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	10,5
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	2,0
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	124,2
Löschwassermenge [l]	Ca. 3
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschauber) [min]	5,0
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	8/7802
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	8/8455
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	57/98098

Abbildung 4-18 zeigt die Brandraumtemperaturen während V1. Die rote Kurve stellt den Mittelwert der beiden zur Ofensteuerung verwendeten Plattenthermoelemente (PL1 und PL2) dar und verläuft ab der 10. Prüfminute nahezu identisch wie die ETK. Mantelthermoelemente MT(PL1) und MT(PL2) waren an der Rückseite von PL1 und PL2 befestigt. Innerhalb der ersten 20 Prüfminuten zeigen die beiden Kurven leichte Abweichungen von der angestrebten ETK. Im weiteren Verlauf stimmen die Kurven nahezu mit der ETK überein. Die Kurve vom MT(PK1) zeigt den Temperaturverlauf direkt auf der Oberfläche von Prüfkörper (PK) 1. Hier wird ersichtlich, dass am PK über die gesamte Prüfdauer hinweg deutlich über ETK-Niveau liegende Temperaturen vorherrschen. Die Differenz beträgt zwischen 80 und 100 °C und sinkt stetig über die Versuchsdauer.

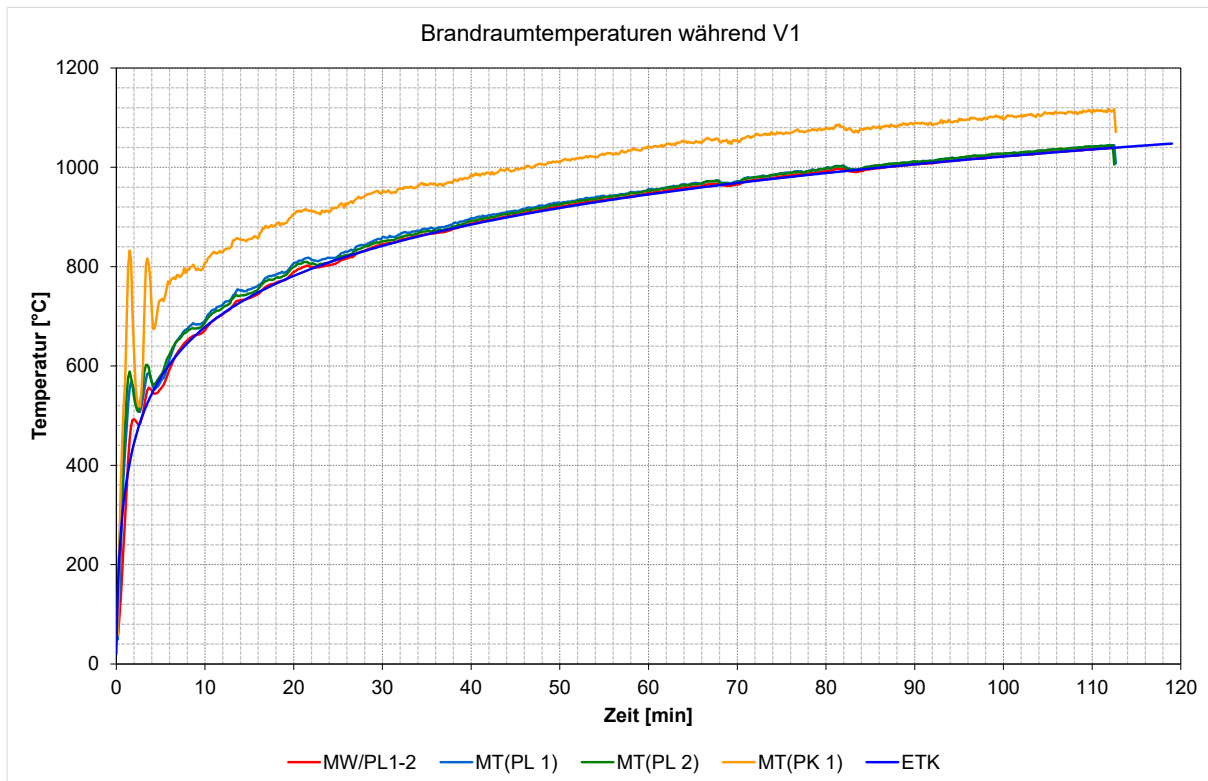


Abbildung 4-18: Temperaturen im Brandraum, gemessen mittels MT

Abbildung 4-19 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze über die Querschnittstiefe des Prüfkörpers anhand der Temperaturmessungen und des 3D-Modells. Beide Kurven der instrumentierten Lamellen liegen dicht zusammen und zeigen einen annähernd linearen Verlauf. Die Kurven der Restquerschnittmessung liefern nahezu identische Werte. Die Kurven verlaufen weniger steil als die der Thermoelementmessungen und verzeichnen nach längerer Beanspruchungsdauer (124,2 min) insgesamt einen ähnlichen Abbrand (3D: 80,7 mm; manuell: 79,4 mm) wie die Messstellen in den Lamellen 3 und 6 (78 und 84 mm).

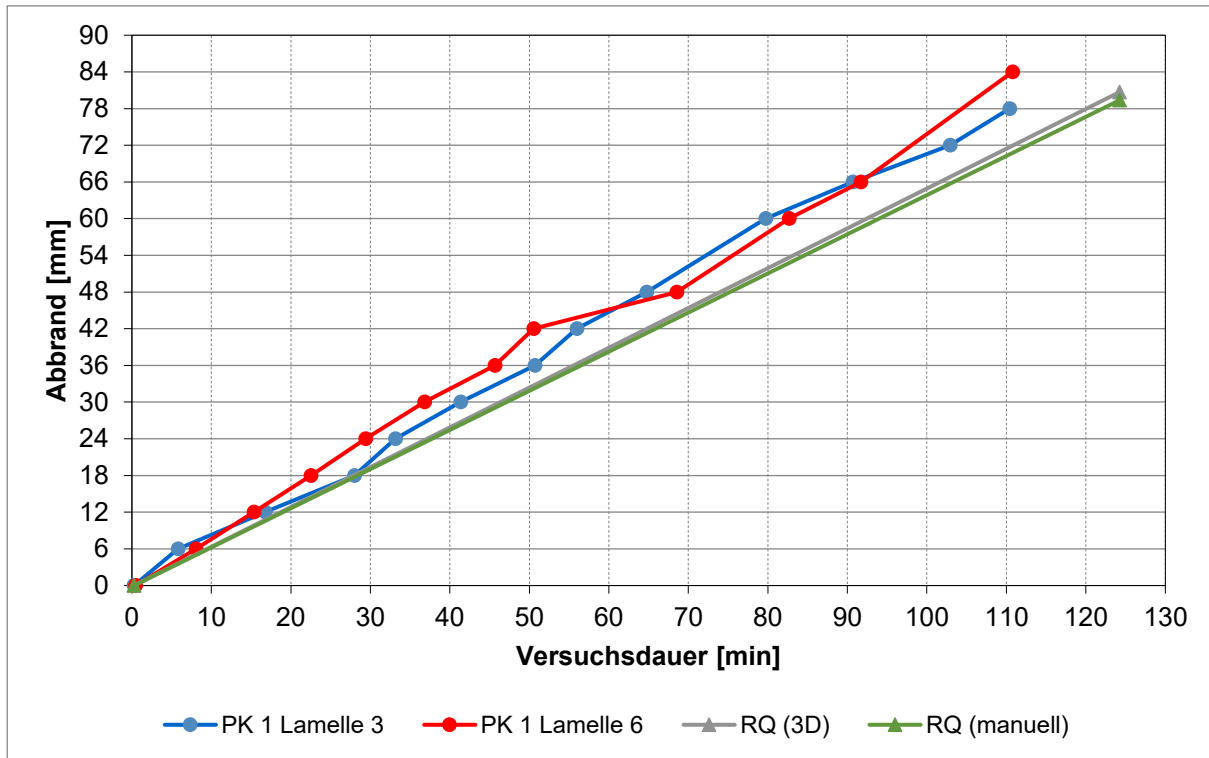


Abbildung 4-19: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messung

Die instrumentierte Lamelle 6 lag auf der brennerabgewandten Seite des Prüfofens und somit im Abbrand Schatten. Bis zur 60. Prüfminute schreitet die Abbrandgrenze in Lamelle 6 schneller voran als in Lamelle 3. Nach der 60. Prüfminute kehrt sich dieses Verhältnis teilweise um. In Prüfminute 110 erreicht die Abbrandgrenze 84 mm in Lamelle 6, dagegen nur 78 mm in Lamelle 3.

Abbildung 4-20 und Abbildung 4-21 stellen den Restquerschnitt von Prüfkörper 1 dar. Rote Bereiche weisen hohen, blaue Bereiche geringen Abbrand auf. Die Gesamtheit des Prüfkörpers wird vom 3D-Modell gut abgebildet. Partiiell weist die Punktwolke des 3D-Modells Lücken auf. Die zur Bestimmung des Abbrands vermessene Fläche enthielt 98098 Punkte.



Abbildung 4-20: RQ von PK 1 (Draufsicht)
(eigene Aufnahme)

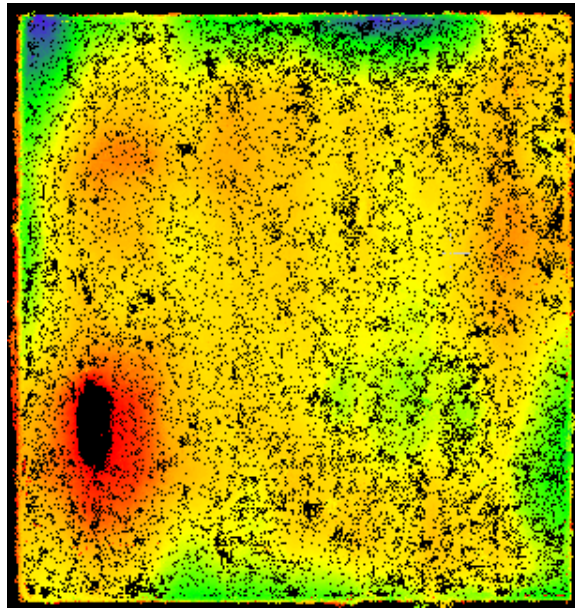


Abbildung 4-21: RQ von PK 1 als 3D-Modell

Tabelle 4-7 stellt die Abbrandwerte aus den Restquerschnittmessungen und aus den Temperaturmessungen gegenüber. Als Bemessungszeit für die Temperaturmessungen wurde die letzte Messstelle verwendet, die 300°C gemessen hat. Dadurch sind die Temperatur- und Restquerschnittmessung am besten vergleichbar. Dennoch unterscheiden sich die zugrunde gelegten Beanspruchungsdauern für Temperatur- und Restquerschnittmessungen. Für die Restquerschnittmessungen wurde die gesamte Beanspruchungsdauer von 124,24 *min* (vgl. Tabelle 4-6) verwendet. Die Abbrandwerte der Temperaturmessung für Lamelle 3 sind geringer als die der 3D-Messung. In Lamelle 6 verzeichnet die Temperaturmessung dagegen schon nach 110 *min* eine Abbrandtiefe von 84 *mm*, während das 3D-Modell nach 124,24 *min* nur 72,59 *mm* Abbrand ergibt. Daher schreitet die Abbrandgrenze auch beim Mittelwert aus beiden Lamellen langsamer voran, als die 3D-Messungen ergeben. Während das 3D-Modell den geringeren Abbrand in Lamelle 6 aufgrund des Abbrandschattens des Prüfofens bestätigt, lassen die Abbrandwerte aus den Temperaturmessungen dies nicht erkennen. Manuelle Restquerschnitt- und 3D-Messungen unterscheiden sich maximal um ca. 1 *mm*.

Tabelle 4-7: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden

Versuch V1 (PK 1)	Abbrandtiefe anhand Temperaturmessungen	Abbrandtiefe anhand RQ (3D)	Abbrandtiefe anhand RQ (manuell)
Lamelle 3	78 mm nach 110 min	81,20 mm nach 124,24 min	80,58 mm nach 124,24 min
Lamelle 6	84 mm nach 110 min	72,59 mm nach 124,24 min	73,01 mm nach 124,24 min
Mittelwert (Lamellen) *	81 mm nach 110 min	76,90 mm nach 124,24 min	76,80 mm nach 124,24 min
Mittelwert (ganzer PK) **	81 mm nach 110 min	80,44 mm nach 124,24 min	79,37 mm nach 124,24 min

* Mittelwert der Abbrandtiefen und auch der Zeit beider Lamellen

** entspricht bei Temperaturmessungen dem Mittelwert der Lamellen; bei RQ-Messungen der gesamten vermessenen PK-Oberfläche von ca. 350 x 350 mm

Abbildung 4-22 zeigt die Konzentrationen verschiedener Gase im Brandraum während V1. Die Messungen stammen von der MFPA Leipzig (Gerät: SICK SIDOR) und der TUM (Gerät: Testo 350). Gemessen wurde alle 10 s.

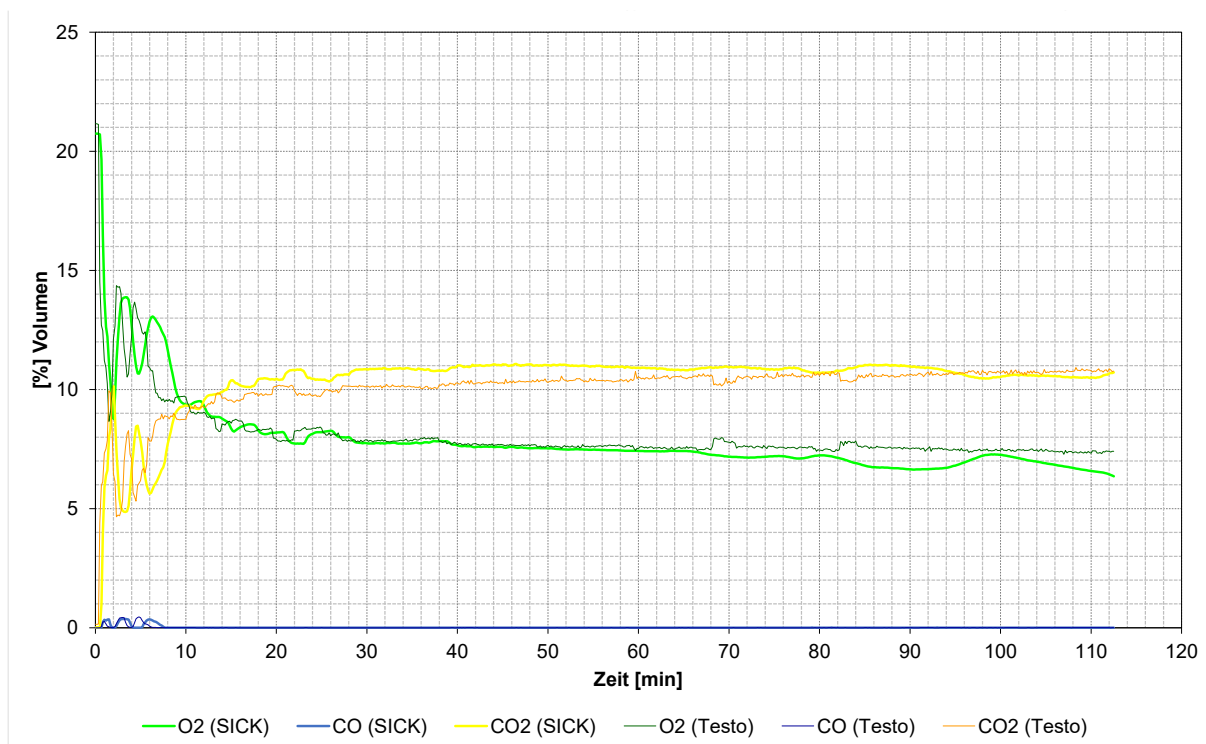


Abbildung 4-22: Gaskonzentration im Brandraum während V1 (gemessen durch SICK SIDOR und Testo 350) Die Messkurven beider Geräte verlaufen nahezu identisch. Daher gilt das Folgende für beide Messgeräte. Es ist eine deutliche indirekte Proportionalität zwischen CO₂- und O₂-Gehalt zu erkennen. Vom Versuchsbeginn an fällt der Sauerstoffgehalt stetig (abgesehen von starken

Schwankungen bis zur 10. Prüfminute) bis zum Versuchsende. Über die Versuchszeit gemittelt erhält man einen Wert von ca. 8 %. Der CO_2 -Gehalt schwankt ebenso bis zu Minute 10 und stellt sich dann bei ca. 10 Vol.-% ein. Der CO-Gehalt zeigt nur bis zur 8. Prüfminute geringe Ausschläge, um dann bis zum Prüfende bei 0 Vol.-% zu bleiben.

Das *Testo 350* misst die Gaskonzentrationen sekundlich. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Messungen des *SICK SIDOR* der MFPA Leipzig (Messung alle 10 s) wurde nur jeder zehnte Messwert des *Testo 350* verwendet. Die Kurven verlaufen nahezu identisch. Die Ausprägung der Messkurve des *Testo* ist etwas feiner, kleine Schwankungen werden hier offenbar deutlicher erfasst. Auch ein zeitlicher Versatz ist zu sehen. Das *Testo 350* registriert teilweise Konzentrationsänderungen ca. 30 s bis 60 s früher als das *SICK SIDOR*. Deutlich erkennbar ist dies an den Ausschlägen aller Brandgase in den ersten 6 Prüfminuten. Die Messsonden beider Geräte wurden im Brandraum nebeneinander platziert (auf der Brenner-zugewandten Kante des Prüfkörpers, mittig im Brandraum, vgl. Abbildung 4-23).

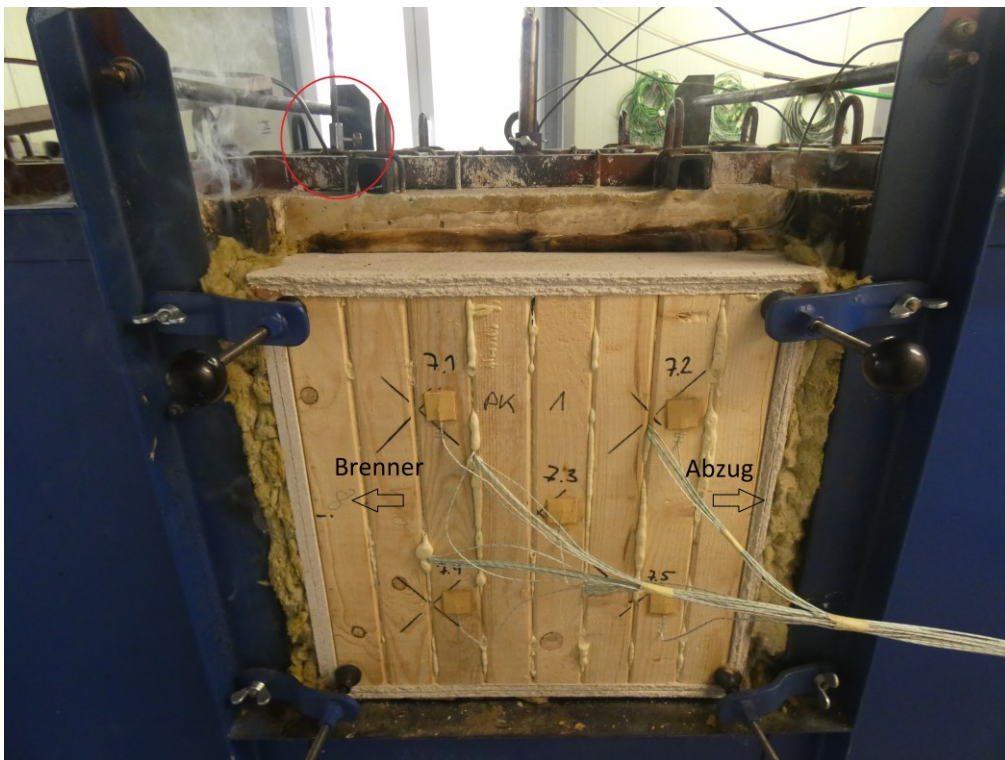


Abbildung 4-23: Position der Gasmesssonden (rote Markierung) während V1

Tabelle 4-8 zeigt die ermittelten Abbrandraten für PK 1. Die Abbrandraten nach Restquerschnitt wurden manuell und mittels 3D-Modell berechnet. Die restlichen 3 Abbrandraten wurden nach den 3 in Abschnitt vorgestellten Rechenmodellen anhand der Temperaturmessungen im Prüfkörper berechnet.

Tabelle 4-8: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und für PK 1

Versuch V1 (PK 1)	Methode M1 (EC5)	Methode M2	Methode M3	RQ (3D)	RQ (manuell)
β_0 [mm/min]	0,65	0,60	0,70	0,65	0,64

Ein nennenswerter Unterschied beim Vergleich der Abbrandraten ist die Beanspruchungsdauer. Während die Abbrandraten aus den Temperaturmessungen gemittelte Werte zwischen den Versuchsdauern 30, 60 und 90 *min* darstellen, so ist die Abbrandrate aus den RQ mit der gesamten Beanspruchungsdauer von 124,24 *min* (vgl. Tabelle 4-6) berechnet worden. Die Abbrandraten bewegen sich zwischen 0,60 und 0,70 *mm/min*. Die 3D-Messung und die Berechnung nach EC 5 (Entwurf) liegen mit 0,65 *mm/min* genau in der Mitte. Die Interpolation von β_0 ergibt den niedrigsten, die Methode M3 (nach Werther (2013)) den größten Wert. Manuelle Restquerschnitt- und 3D-Messung weisen eine Differenz von 0,01 *mm/min* auf.

4.2.5 Versuch V2 (PK 2.1 und 2.2): Einfluss der Prüfkörperanzahl

V2 fand am 05.09.2022 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig statt. Es wurden zwei Prüfkörpern (PK 2.1 und PK 2.2), gleichzeitig geprüft. Hier sollte untersucht werden, ob sich gleichzeitig geprüfte Prüfkörper (PK) gegenseitig im Abbrand beeinflussen. Die geplante Beanspruchungsdauer betrug 120 *min*. In Prüfminute 112 erfolgte gleichzeitig ein Durchbrand beider PK. Tabelle 4-6 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Versuchsdaten von V2. Eine Messung der Brandgase im Brandraum hat zwar stattgefunden, wurde jedoch vom Gasmessgerät nicht aufgezeichnet. Jedoch zeigt in Foto der Anzeige des Messgerätes nach 20 Prüfminuten einen O₂-Gehalt von 7,35 %, einen CO-Gehalt von 0,05 % und einen CO₂-Gehalt von 10,86 % im Brandraum.

Tabelle 4-9: Übersicht V2 (PK 2.1 und PK 2.2)

Versuch V2 (PK 2.1 und PK 2.2)	
Material / Rohdichte [kg/m^3] / r.F. [%]	KVH (Fichte) / 435 / 13,7
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 480 x 115
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal, Lamellen stehend
Instrumentierte Lamelle im Abbrandschatten	Lamelle 3
Mittelwert des Ofendruckes [Pa]	21,6
Mittelwert der O_2 -Konzentration im Prüfofen [%]	Nicht aufgezeichnet
Mittelwert der CO_2 -Konzentration im Prüfofen [%]	Nicht aufgezeichnet
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	PK 2.1: 112,0/ PK 2.2: 112,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	PK 2.1: 0,45/ PK 2.2: 0,41 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	PK 2.1: 10,50/ PK 2.2: 10,0
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	Je PK: 1,0
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	PK 2.1: 124,1 / PK 2.2: 123,6
Löschwassermenge [l]	Ca. 3
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschauber) [min]	Je PK: 2,5
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	PK 2.1: 8/9144 PK 2.2: 8/9175
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	PK 2.1: 8/10050 PK 2.2: 8/9053
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	PK 2.1: 57/73594 PK 2.2: 56/111164

Abbildung 4-24 zeigt die Brandraumtemperaturen von V2. Die rote Kurve stellt den Mittelwert der beiden zur Ofensteuerung verwendeten Plattenthermoelementen (PL1 und PL2) dar und verläuft ab der 10. Prüfminute nahezu identisch wie die ETK. Mantelthermoelemente MT(PL1) und MT(PL2) waren je an der Rückseite von PL1 und PL2 befestigt. Innerhalb der ersten 20 Prüfminuten zeigen die beiden Kurven leichte Abweichungen von der angestrebten ETK. Im weiteren Verlauf stimmt MT(PL2) nahezu mit der ETK überein, MT(PL1) liegt konstant 30 bis 40 °C über der ETK. Die Kurve der MT an den PK zeigen den Temperaturverlauf direkt an den brandbeanspruchten Oberflächen. Wie schon in V1 wird ersichtlich, dass an den PK über die gesamte Prüfdauer hinweg deutlich über ETK-Niveau liegende Temperaturen vorherrschen. Die Differenz beträgt wie in V1 zwischen 80 und 100 °C und sinkt stetig über die Versuchsdauer hinweg.

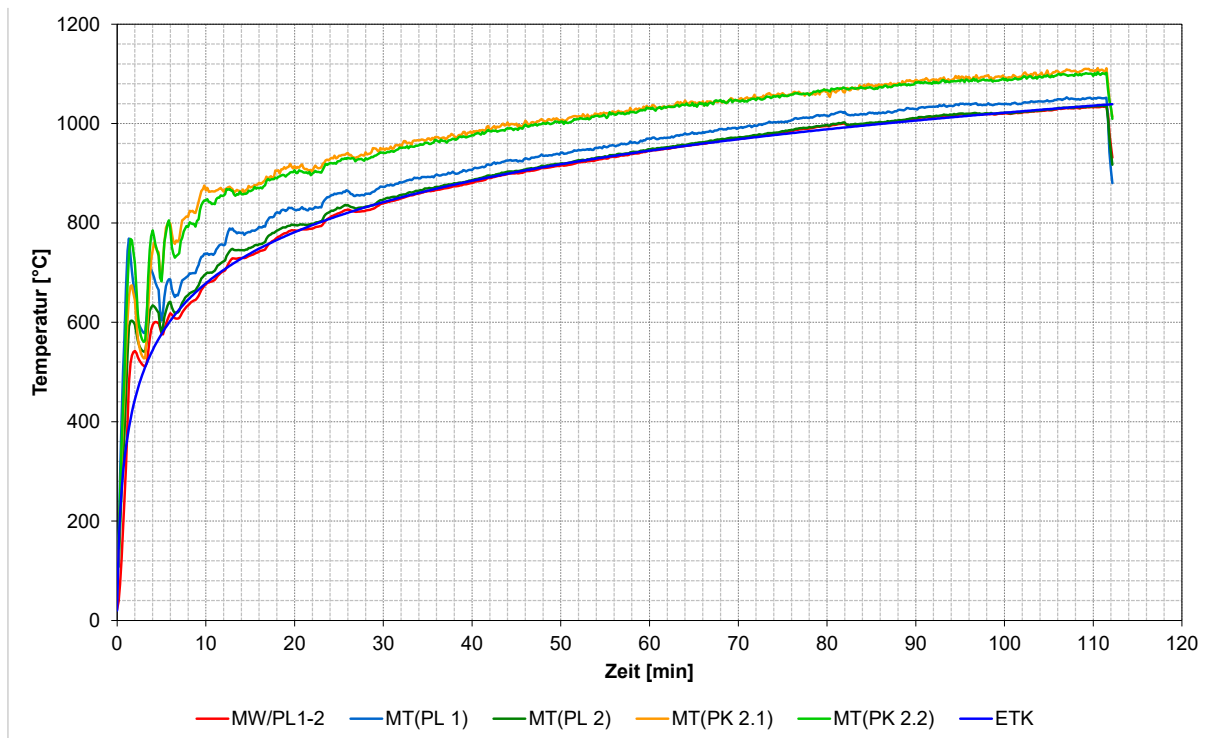


Abbildung 4-24: Temperaturen im Brandraum, gemessen mittels MT aus Versuch V2

Abbildung 4-25 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze in PK 2.1 anhand der RQ- und der Temperaturmessungen. Der unterschiedliche Abbrand, je nach Position der instrumentierten Lamellen 3 und 6 im Prüfofen, wird hier deutlich. Lamelle 3 lag im Abbrandschatten des Prüfofens. Während die ersten 15 Prüfminuten die Abbrandgrenze in beiden Lamellen noch nahezu identisch verläuft, so schreitet die 300°C-Isotherme in Lamelle 6 ab Prüfminute 20 deutlich schneller voran, teilweise mit einem zeitlichen Versatz von 12 *min* zu Lamelle 3. In Prüfminute 107 ist die Abbrandgrenze in Lamelle 3 72 *mm* tief in das Holz vorgeschritten, in Lamelle 6 dagegen bis zu einer Tiefe von 84 *mm*. Beide Kurven zeigen einen linearen Trend. Das 3D-Modell und die manuelle Messung geben nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 124,1 *min* eine Abbrandtiefe von 77 und 78 *mm* an.

Abbildung 4-26 zeigt den Verlauf der 300°C-Isotherme in den instrumentierten Lamellen von PK 2.2 und den Abbrandwert des 3D-Modells. Auch bei PK 2.2 lag Lamelle 3 im Abbrandschatten. Während der Abbrand bis zur 50. Prüfminute in beiden Lamellen nahezu gleich schnell voranschreitet, so verkohlt Lamelle 6 ab diesem Zeitpunkt schneller. Es fällt jedoch auf, dass die Abbrandgrenze in beiden Lamellen gleichzeitig (in Prüfminute 104) dieselbe Tiefe von 66 *mm* erreicht. Im Vergleich zu PK 2.1 liegt die maximale Differenz der Abbrandtiefe bei 18 *mm* (84 *mm* in PK 2.1 (Lamelle 6) in Prüfminute 110 und 66 *mm* in PK 2.2 (Lamelle 3 und 6) in Prüfminute 104). Die Kurve des 3D-Modells liegt sehr eng bei den Kurven der Temperaturmessungen, verläuft aber flacher und endet daher auch nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 123,6 *min* bei einer Abbrandtiefe von nur 74,13 *mm*.

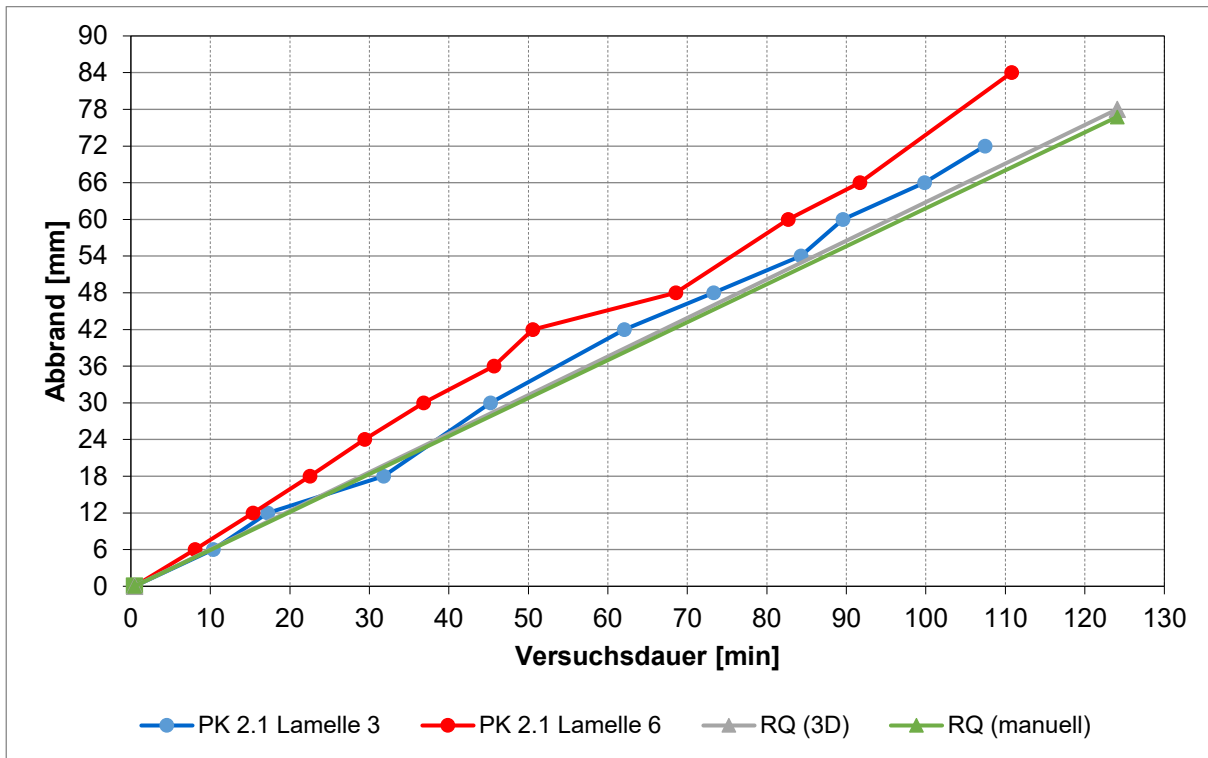


Abbildung 4-25: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 2.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messung

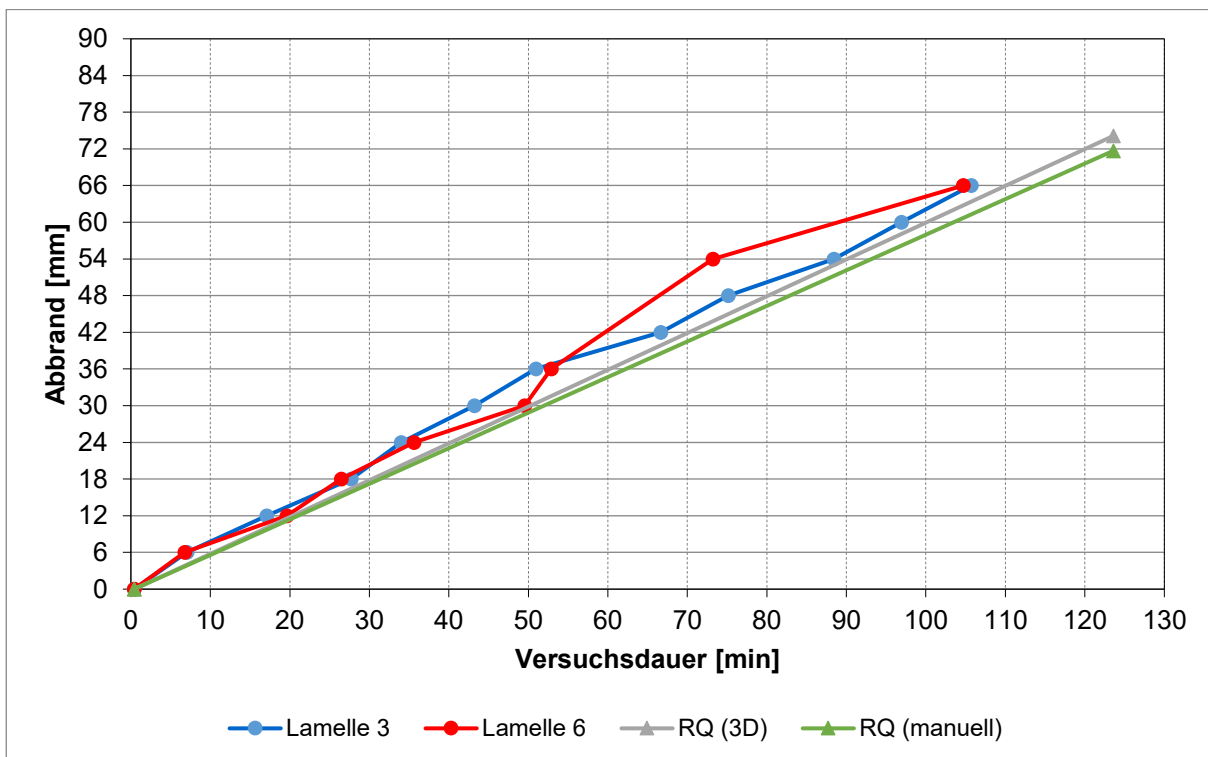


Abbildung 4-26: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 2.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen



Abbildung 4-27: RQ von PK 2.1

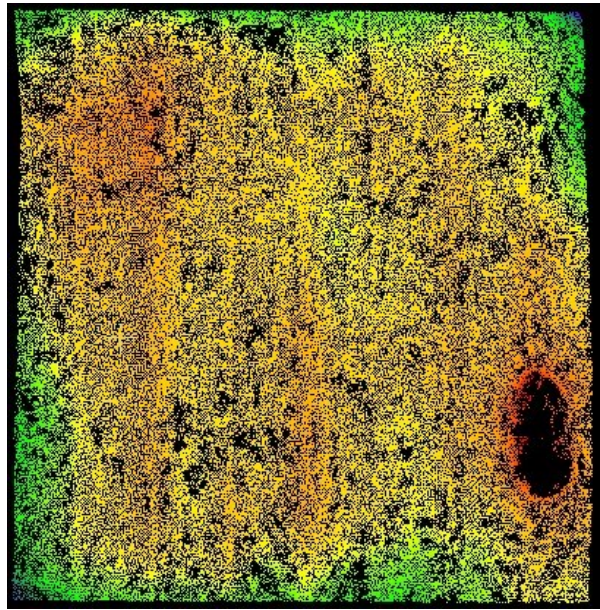


Abbildung 4-28: 3D-Modell von PK 2.1



Abbildung 4-29: RQ von PK 2.2

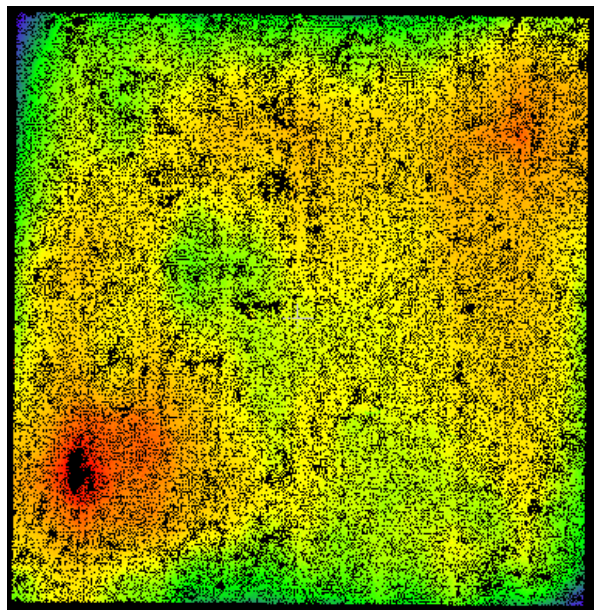


Abbildung 4-30: 3D-Modell von PK 2.2

Abbildung 4-27 bis Abbildung 4-30 zeigen die Restquerschnitt (RQ) von Prüfkörper (PK) 2.1 und 2.2 sowie die entsprechenden 3D-Modelle. Die roten Bereiche weisen einen hohen, die blauen Bereiche einen geringen Abbrand auf. Wie auch bei PK 1 weist die Punktwolke einzelne Lücken auf. Die Anzahl der vermessenen Punkte liegt im Fall von PK 2.1 bei 73594, bei PK 2.2 waren es 111164 Punkte.

Tabelle 4-10 zeigt den ermittelten Abbrand von Prüfkörper (PK) 2.1 und 2.2. Als Bemessungszeit für die Temperaturmessungen wurde die letzte Messstelle verwendet, die 300 °C gemessen hat. Für die Restquerschnittmessungen wurden für PK 2.1 eine Beanspruchungsdauer von 124,1 *min* und für PK 2.2 123,6 *min* angesetzt.

PK 2.1

In Lamelle 3, die sich im Abbrandschatten befand, bewegt sich die Abbrandgrenze anhand von 3D- wie auch Temperaturmessungen langsamer vorwärts als in Lamelle 6. Setzt man die Abbrandwerte ins Verhältnis zur Branddauer, so ergeben sich ebenfalls Unterschiede zwischen den Messmethoden. Während die TE in Lamelle 6 schon nach 110 Prüfminuten 84 *mm* Abbrandtiefe verzeichnen, so ergibt das 3D-Modell nach 124,1 *min* nur einen Abbrand von 76,89 *mm*. Vergleicht man die Mittelwerte der Abbrandtiefen über den ganzen PK 2.1, so sind die Thermoelement- (TE) und die 3D-Messungen zwar identisch, die Restquerschnittmessungen beziehen sich aber auf eine Beanspruchungsdauer von 124,1 *min*, die TE-Messungen auf ca. 109 *min*.

PK 2.2

In beiden instrumentierten Lamellen von Prüfkörper (PK) 2.2 fällt auf, dass die internen TE gleichzeitig (Prüfminute 110) in derselben Tiefe (66 *mm*) die Abbrandgrenze verorten. Die 3D-Messung ergibt ca. 20 *min* später, nach einer insgesamten Beanspruchungsdauer für PK 2.2 von 123,6 *min*, in beiden Lamellen eine identische Abbrandtiefe von ca. 72,5 *mm*. Legt man den aktuell gültigen Normwert des EC 5 von β_0 (0,65 *mm/min*) für einen Vergleich zugrunde, so entsprechen die Mittelwerte der Abbrandtiefe des ganzen PK 2.2 einander im Ausmaß und auch zeitlich. Die Thermoelementmessungen verorten die Abbrandgrenze nach 104 Prüfminuten in 66 *mm* Tiefe, die 3D-Messung ergibt eine Abbrandtiefe bei PK 2.2 von 74,13 *mm* nach 123,6 *min*.

Tabelle 4-10: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V2

Versuch V2 (PK 2.1 und PK 2.2)		Abbrandtiefe anhand von Temperaturmessungen	Abbrandtiefe anhand RQ (3D)	Abbrandtiefe anhand RQ (manuell)
PK 2.1	Lamelle 3	72 mm nach 107 min	76,89 mm nach 124,1 min	73,77 mm nach 124,1 min
	Lamelle 6	84 mm nach 110 min	80,12 mm nach 124,1 min	76,77 mm nach 124,1 min
	Mittelwert (Lamellen) *	78 mm nach 109 min	78,51 mm nach 124,1 min	75,27 mm nach 124,1 min
	Mittelwert (ganzer PK) **	78 mm nach 109 min	78,05 mm nach 124,1 min	76,75 mm nach 124,1 min
PK 2.2	Lamelle 3	66 mm nach 104 min	72,46 mm nach 123,6 min	67,91 mm nach 123,6 min
	Lamelle 6	66 mm nach 104 min	72,61 mm nach 123,6 min	70,40 mm nach 123,6 min
	Mittelwert (Lamellen) *	66 mm nach 104 min	72,54 mm nach 123,6 min	69,16 mm nach 123,6 min
	Mittelwert (ganzer PK) **	66 mm nach 104 min	74,13 mm nach 123,6 min	71,69 mm nach 123,6 min

* Abbrandtiefe und auch Zeit der beiden Lamellen gemittelt

** entspricht bei Temperaturmessungen dem Mittelwert der Lamellen; bei RQ-Messungen der gesamten vermessenen PK-Oberfläche von ca. 350 x 350 mm

Tabelle 4-11 stellt die Abbrandraten aus V2 dar. Zur Berechnung von β_0 anhand der Temperaturmessungen wurden die vorgestellten Rechenmodelle verwendet. β_0 von V2 ergibt sich aus dem Mittelwert der Abbrandraten der beiden PK. Die Ergebnisse der 3D-Messung von PK 2.1 und PK 2.2 sind identisch mit den Abbrandraten aus der M2 von β_0 (Mittelwert: 0,62 mm/min). Die Mittelwerte von M1 (EC 5 Entwurf) und M3 nach Werther (2013), liegen mit 0,70 und 0,69 mm/min ähnlich weiter darüber. Manuelle RQ- und 3D-Messung unterscheiden sich für PK 2.1 um 0,01 mm/min.

Tabelle 4-11: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ-Messungen für V2

Versuch V2 (PK 2.1 und PK 2.2)	Methode M1 (EC)	Methode M2	Methode M3	RQ (3D)	RQ (manuell)
β_0 [mm/min] (PK 2.1)	0,71	0,63	0,68	0,63	0,62
β_0 [mm/min] (PK 2.2)	0,69	0,60	0,69	0,60	0,58
β_0 [mm/min] (V2) (Mittelwert der PK)	0,70	0,62	0,69	0,62	0,60

4.2.6 Versuch V3 (PK 3.1 und 3.2): Einfluss der Temperatursteuerung im Prüfofen

V3 diente ursprünglich dazu, die verschiedenen Arten der Temperatursteuerung (MT und PL) des Prüfofens zu untersuchen. Geplant war die Temperatursteuerung des Prüfofens mittels zweier MT, die jeweils mittig auf der brandbeanspruchten Oberfläche von PK 3.1 und PK 3.2 angebracht waren. Letztlich wurde aufgrund eines Kommunikationsfehlers mit dem Personal der MFPA Leipzig die Brandraumtemperatur mittels zweier Mantelthermoelemente (MT) gesteuert, die jeweils auf den Rückseiten (prüfkörperabgewandt) der Plattenthermoelemente (PL) befestigt waren. Dennoch vergrößerte V3 die Datenlage zu den vorliegenden Untersuchungen des Abbrandverhaltens von Holz und lieferte wertvolle Ergebnisse, die im Folgenden vorgestellt werden.

V3 fand am 06.09.2022 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig statt. Neben den prüfkörperinternen Temperaturmessungen wurden die Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid im Brandraum mit einem *Testo 350* gemessen. Die geplante Beanspruchungsdauer betrug 120 min. In Prüfminute 108 erfolgte bei beiden PK ein Durchbrand. Tabelle 4-12 fasst die wichtigsten Daten zu V3 zusammen.

Tabelle 4-12: Übersicht V3 (PK 3.1 und PK 3.2)

Versuch V3 (PK 3.1 und PK 3.2)	
Material / Rohdichte [kg/m ³] / r.F. [%]	KVH (Fichte) / 435 / 13,7
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 480 x 115
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal, Lamellen stehend
Instrumentierte Lamelle im Abbrandschatten	Lamelle 3
Mittelwert des Ofendrucks [Pa]	17,9

Mittelwert der O ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	9,3
Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	9,3
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	PK 3.1: 108,0/ PK 3.2: 108,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	PK 3.1: 1,25/ PK 3.2: 0,33 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	PK 3.1: 7,5/ PK 3.2: 7,5
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	Je PK: 1,5
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	PK 3.1: 117,3/ PK 3.2: 118,2
Löschwassermenge [l]	Ca. 2,0
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschrauber) [min]	Je PK: 5,0
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	PK 3.1: 8/7589 PK 3.2: 8/9414
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	PK 3.1: 8/6298 PK 3.2: 6/8096
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	PK 3.1: 56/87510 PK 3.2: 54/107495

Abbildung 4-31 zeigt die Brandraumtemperaturen während V3. Gesteuert wurde die Ofentemperatur über zwei an den Rückseiten der Plattenthermoelementen (prüfkörperabgewandt) befestigten Mantelthermoelementen (MT). Der Mittelwert beider MT verläuft ab der 10. Prüfminute nahezu identisch mit der ETK. Wie in V1 und V2 verzeichnen die MT direkt an den PK höhere Temperaturen als die zur Ofensteuerung verwendeten MT. Die Differenz beträgt hier zwischen 60 und 80 °C.

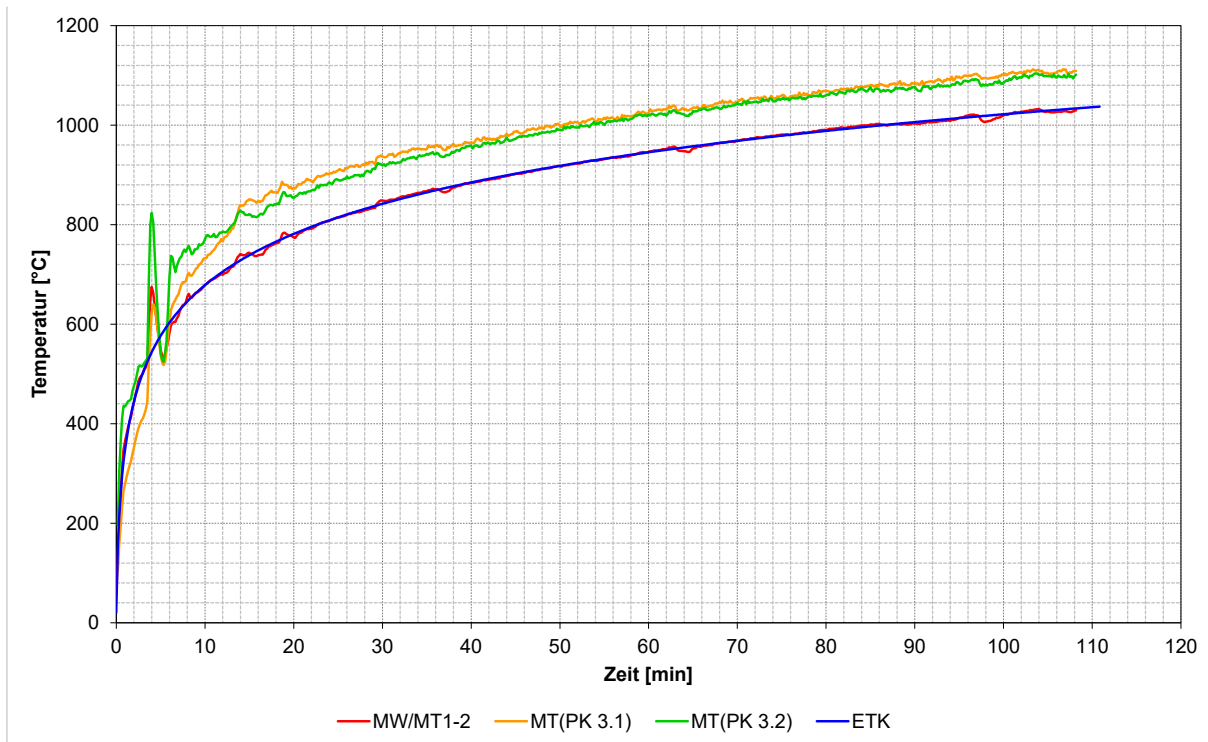


Abbildung 4-31: Temperaturen im Brandraum während V3

Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33 zeigen den Verlauf der Abbrandgrenze, sowie das Ergebnis der 3D-Messungen für PK 3.1 und PK 3.2. Bei beiden Prüfkörpern lag Lamelle 3 im Abbrandschatten des Prüfofens.

PK 3.1

Die Abbrandgrenze verläuft in beiden Lamellen (3 und 6) bis zur 40. Prüfminute annähernd identisch und mit linearem Trend. Ab der 40. Minute verkohlt Lamelle 6 schneller als Lamelle 3 und verzeichnet nach 100 min eine Abbrandtiefe von 66 mm. Lamelle 3 ist nach 98 min bis in eine Tiefe von nur 60 mm verkohlt. Das 3D-Modell verzeichnet nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 117,3 min eine Abbrandtiefe von 78 mm. Die Kurve der Restquerschnittmessung korreliert mit den Kurven der Temperaturmessungen (bis auf die Zeit zwischen 50 und 70 min bei Lamelle 6). Die Temperaturkurven beider Lamellen weisen einen linearen Trend auf.

PK 3.2

Die Abbrandgrenze verläuft in den Messstationen von PK 3.2 (Lamelle 3 und 6) ähnlich wie in Prüfkörper (PK) 3.1. Bis zur 20. Prüfminute schreitet die Abbrandgrenze in beiden Lamellen gleich schnell voran, im weiteren Verlauf verkohlt Lamelle 6 zwischen 4 und 12 min schneller als Lamelle 3. Lamelle 6 verzeichnet nach 96 Prüfminuten eine Abbrandtiefe von 66 mm, Lamelle 3 nach 104 Prüfminuten ebenfalls eine Abbrandtiefe von 60 mm. Wie schon bei PK 3.1 korreliert die Kurve der

3D-Messung mit den Werten der Temperaturmessungen. Nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 118,2 min weist der RQ eine Abbrandtiefe von 78 mm auf. Wie bei allen bisherigen PK weisen auch die Temperaturkurven beider Lamellen von PK 3.2 einen linearen Trend auf.

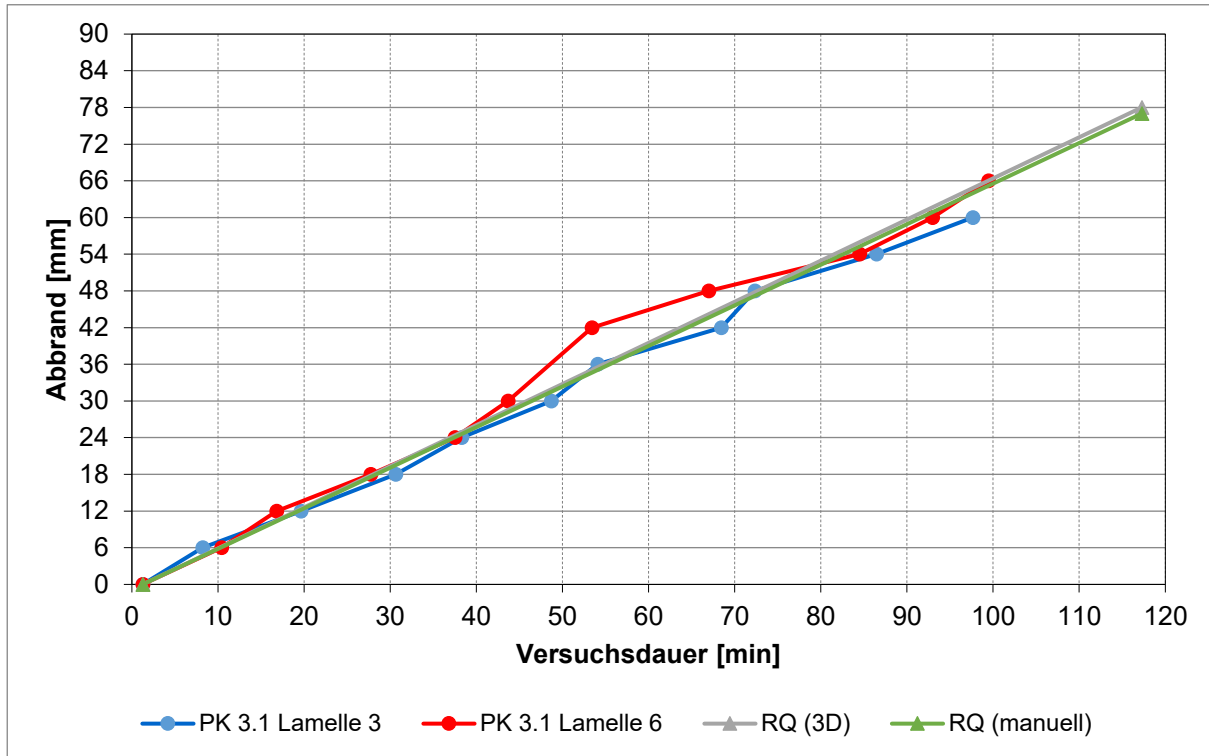


Abbildung 4-32: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 3.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen

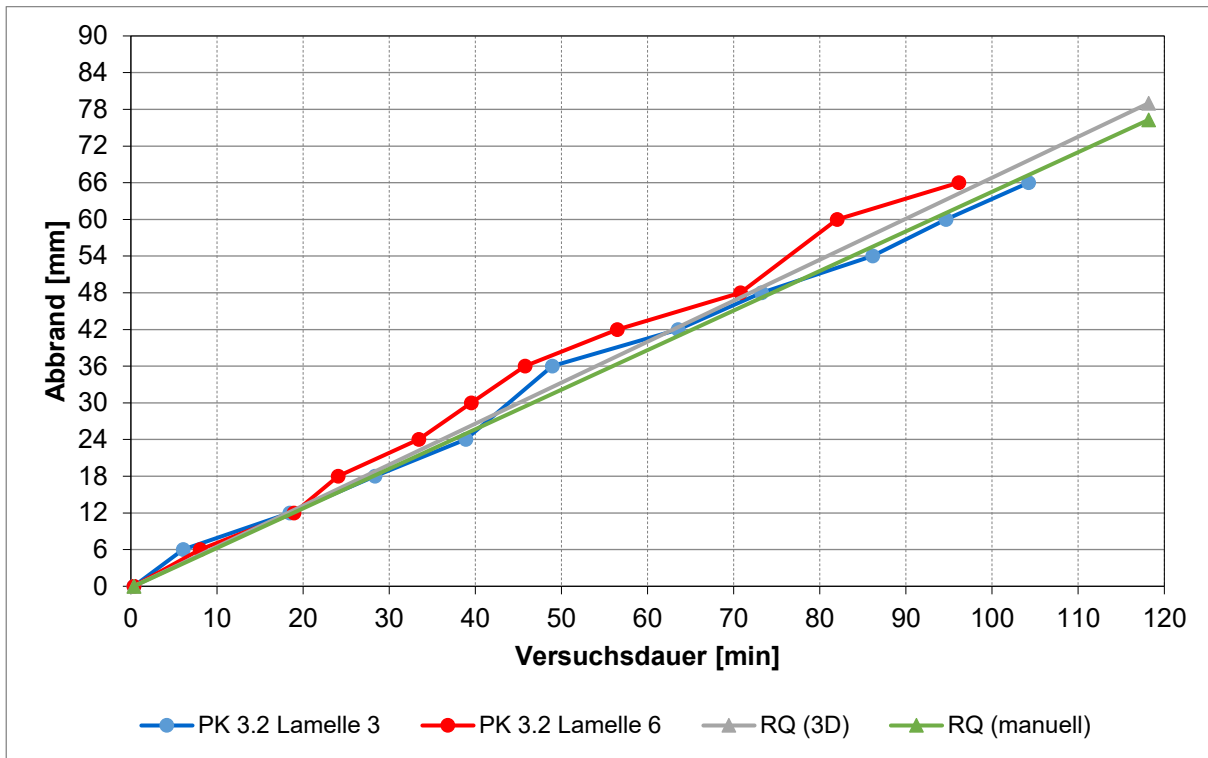


Abbildung 4-33: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 3.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen



Abbildung 4-34: RQ von PK 3.1

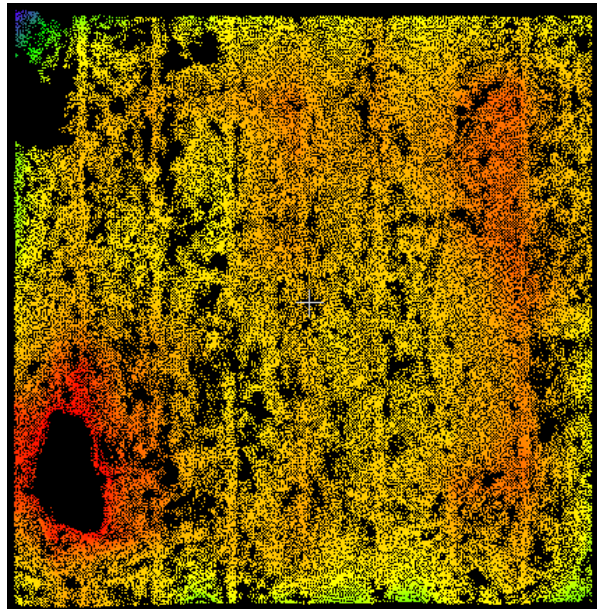


Abbildung 4-35: 3D-Modell von PK 3.1



Abbildung 4-36: RQ von PK 3.2

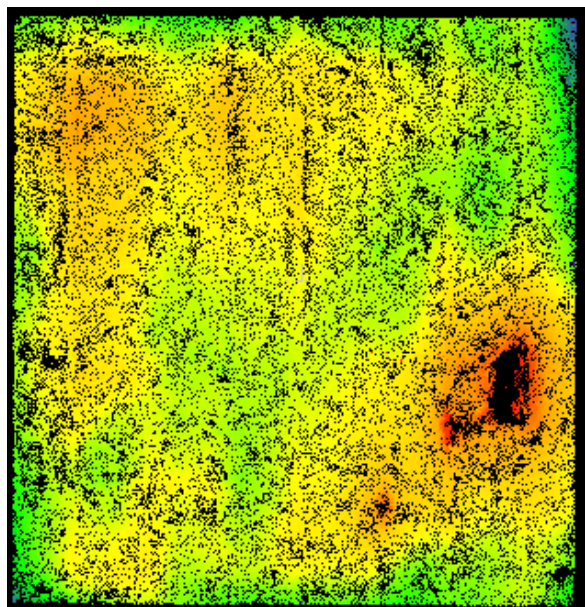


Abbildung 4-37: 3D-Modell von PK 3.2

Abbildung 4-34 bis Abbildung 4-37 zeigen die Restquerschnitt (RQ) von Prüfkörper (PK) 3.1 und 3.2, sowie ihre 3D-Modelle. Rote Bereiche sind stark, blaue Bereiche wenig abgebrannt. Trotz einiger Lücken in den Punktwolken bilden die 3D-Modelle die verkohlten Oberflächen gut ab. Das Modell von PK 3.1 weist größere Lücken auf als die anderen PK. Die zur Bestimmung des RQ vermessene Fläche enthielt bei PK 3.1 87510 und bei PK 3.2 107495 Punkte.

Tabelle 4-13 stellt für V3 die Abbrandwerte der verschiedenen Messmethoden dar. Als Bemessungszeit für die Temperaturmessungen wurde die letzte Messstelle verwendet, die 300 °C gemessen hat. Für die 3D-Messung wurde für PK 3.1 und PK 3.2 eine gesamte Beanspruchungsdauer von 117,3 min und 118,2 min zugrunde gelegt, vgl. Tabelle 4-12.

PK 3.1

Geht man näherungsweise von einer Abbrandrate von 0,65 mm/min aus (gültiger Wert im EC 5), so ergänzen sich die Ergebnisse von 3D- und Temperaturmessungen der einzelnen Lamellen sinnvoll. Die Temperaturmessungen ergeben nach ca. 99 min eine Abbrandtiefe zwischen 60 und 66 mm, die 3D-Messung nach 117,3 min ergeben zwischen 73 und 75 mm. Auffällig ist der Unterschied der 3D-Messungen zwischen den einzelnen Lamellen und der Abbrandtiefe des gesamten PK 3.1. Die mittlere Abbrandtiefe der Lamellen 3 und 6 beträgt nach 117,3 min 74,19 mm, die von PK 3.1 insgesamt fast 5 mm mehr (79,00 mm). Der Abbrand der beiden Lamellen 3 und 6 repräsentiert hier den Abbrand des gesamten PK nur bedingt.

PK 3.2

Geht man auch hier vom aktuellen Normwert der Abbrandrate von 0,65 mm/min (EC 5), so entsprechen sich die Ergebnisse von Thermoelement- und 3D-Messung. Auffällig ist die 3D-Messung von Lamelle 6 mit einer erhöhten Abbrandtiefe von 82,12 mm (im Vergleich Lamelle 3: 70,57 mm). Der im Vergleich hohe Wert von Lamelle 6 ist dadurch bedingt, dass die Messstation stark im Einflussbereich des Durchbrands lag, vgl. Abbildung 4-36 und Abbildung 4-37.

Tabelle 4-13: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V3

Versuch V3 (PK 3.1 und PK 3.2)		Abbrandtiefe anhand von Temperaturmessungen	Abbrandtiefe anhand RQ (3D)	Abbrandtiefe anhand RQ (manuell)
PK 3.1	Lamelle 3	60 mm nach 98 min	73,41 mm nach 117,3 min	71,76 mm nach 117,3 min
	Lamelle 6	66 mm nach 99 min	74,96 mm nach 117,3 min	75,50 mm nach 117,3 min
	Mittelwert (Lamellen) *	63 mm nach 99 min	74,19 mm nach 117,3 min	73,63 mm nach 117,3 min
	Mittelwert (ganzer PK) **	63 mm nach 99 min	79,00 mm nach 117,3 min	77,00 mm nach 117,3 min
PK 3.2	Lamelle 3	66 mm nach 104 min	70,57 mm nach 118,2 min	73,59 mm nach 118,2 min

Lamelle 6	66 mm nach 96 min	82,12 mm nach 118,2 min	78,36 mm nach 118,2 min
Mittelwert (Lamellen) *	66 mm nach 100 min	76,35 mm nach 118,2 min	75,98 mm nach 118,2 min
Mittelwert (ganzer PK) **	66 mm nach 100 min	78,28 mm nach 118,2 min	76,28 mm nach 118,2 min

* Abbrandtiefe und auch Zeit der beiden Lamellen gemittelt

** entspricht bei Temperaturmessungen dem Mittelwert der Lamellen; bei RQ-Messungen der gesamten vermessenen PK-Oberfläche von ca. 350 x 350 mm

Abbildung 4-38 zeigt die Brandgaskonzentration von Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid im Brandraum. Die Messsonde befand sich (im Gegensatz zu V1) auf der Brenner-abgewandten Seite des Prüfofens, Abbildung 4-39. Die O₂-Konzentration fällt stetig bis zur 30. Prüfminute und bleibt anschließend bei ca. 8 %. Die CO₂-Konzentration verläuft gegengleich zur Sauerstoffkonzentration. Bis zur 10. Prüfminute steigt die Menge an CO teilweise auf bis zu 1 %, um dann für die restliche Versuchsdauer bei 0 % zu bleiben.



Abbildung 4-38: Gaskonzentration im Brandraum während V3



Abbildung 4-39: Position der Gasmesssonde bei V3 (orange markierter Kreis)

Tabelle 4-14 fasst die Abbrandraten aus V3 zusammen. Die eindimensionale Abbrandrate β_0 von V3 ergibt sich aus dem Mittelwert der Abbrandraten beider Prüfkörper. Bei Prüfkörper 3.1 schwanken die Abbrandraten zwischen 0,62 und 0,70 mm/min . Die Interpolation liefert den geringsten Wert, der EC 5 (Entwurf) den höchsten. Im Fall von Prüfkörper 3.2 liegen die Werte dichter zusammen, zwischen 0,64 (Interpolation) und 0,69 mm/min (EC 5 (Entwurf)). Die Mittelwerte für V3 zeigen eine

dementsprechend ähnliche Streuung. Am nächsten kommt dem Wert der 3D-Messung (0,67 mm/min im Mittel) mit 0,68 mm/min das Ergebnis nach Werther (2013). Auch der EC 5 (Entwurf) liegt mit 0,70 mm/min nur geringfügig darüber.

Tabelle 4-14: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ-Messungen für V3

Versuch V3 (PK 3.1 und PK 3.2)	Methode M1 (EC5)	Methode M2	Methode M3	RQ (3D)	RQ (manuell)
β_0 [mm/min] (PK 3.1)	0,70	0,62	0,68	0,67	0,66
β_0 [mm/min] (PK 3.2)	0,69	0,64	0,68	0,66	0,65
β_0 [mm/min] (V3) (Mittelwert der PK)	0,70	0,63	0,68	0,67	0,66

4.2.7 Versuch V4 (PK 4.1 und 4.2): Einfluss des Prüfkörpermaterials

V4 fand am 06.09.2022 an der MFPA Leipzig statt und diente dazu, das angestrebte Verfahren zur Ermittlung der Abbrandrate auf seine Eignung für die Prüfung von Holzwerkstoffplatten zu untersuchen. Die zwei gleichzeitig geprüften Prüfkörper 4.1 und 4.2 bestanden aus drei Lagen Spanplatten (eine Prüfplatte und zwei Hinterlegungen, je 19 mm), von denen die brandraumseitige Platte den eigentlichen Prüfgegenstand darstellte. Die geplante Prüfdauer betrug 60 min, weswegen die Prüfplatte vollständig abbrannte. Daher wurde der Abbrand hier nur mittels interner Thermoelemente gemessen. Diese Thermoelemente wurden zwischen den 19 mm-Lagen installiert. Zwischen der zu prüfenden Platte und der ersten Hinterlegung die Thermoelemente 1 bis 5 (Messebene 1) und zwischen Hinterlegung 1 und 2 ein sechstes Thermoelement (Messebene 2). Tabelle 4-15 gibt einen Überblick über die wichtigsten Randbedingungen von V4.

Tabelle 4-15: Übersicht V4 (PK 4.1 und PK 4.2)

Versuch V4 (PK 4.1 und PK 4.2)	
Material / Rohdichte [kg/m ³] / r.F. [%]	Spanplatte / 611 / 7,4
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 490 x 57
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal
TE-Nr. im Abbrandschatten	PK 4.1 und PK 4.2: TE Nr. 2
Mittelwert des Ofendruckes [Pa]	14,6
Mittelwert der O ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	8,7
Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	9,9
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	PK 4.1: 59,0/ PK 4.2: 59,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	PK 4.1: 0,24/ PK 4.2: 0,24 (geht negativ ein)
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	PK 4.1: 6,50/ PK 4.2: 6,50
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	Nicht relevant, da kein RQ
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	PK 4.1: 68,3 / PK 4.2: 68,2
Löschwassermenge [l]	Nicht relevant, da kein RQ
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschrauber) [min]	Keine HK entfernt, da kein RQ
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	Keine, da kein RQ

Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6)
manuell/3D

Keine, da kein RQ

Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK)
manuell/3D

Keine, da kein RQ

Abbildung 4-40 zeigt die Messkurven der im Brandraum befindlichen Mantel- und Plattenthermoelemente. Die rote Kurve stellt den zur Ofensteuerung verwendeten Mittelwert der beiden Plattenthermoelemente (PL 1 und PL 2) dar. Ab der 10. Prüfminute verläuft sie nahezu identisch mit der angestrebten ETK. Die Kurven von Mantelthermoelemente (PL 1) und (PL 2) (beide je auf der Rückseite (Prüfkörper-abgewandt) des Plattenthermoelemente befestigt) zeigen höhere Temperaturen als die PL selbst. Die Differenz ist gering und beträgt hier zwischen 20 und 40 °C. Die beiden Kurven der an den brandbeanspruchten Oberflächen der Prüfkörper befestigten Mantelthermoelemente zeigen, wie schon in den Versuchen zuvor, deutlich über ETK-Niveau liegende Temperaturen. Der Unterschied beträgt hier zwischen 60 und 120 °C.

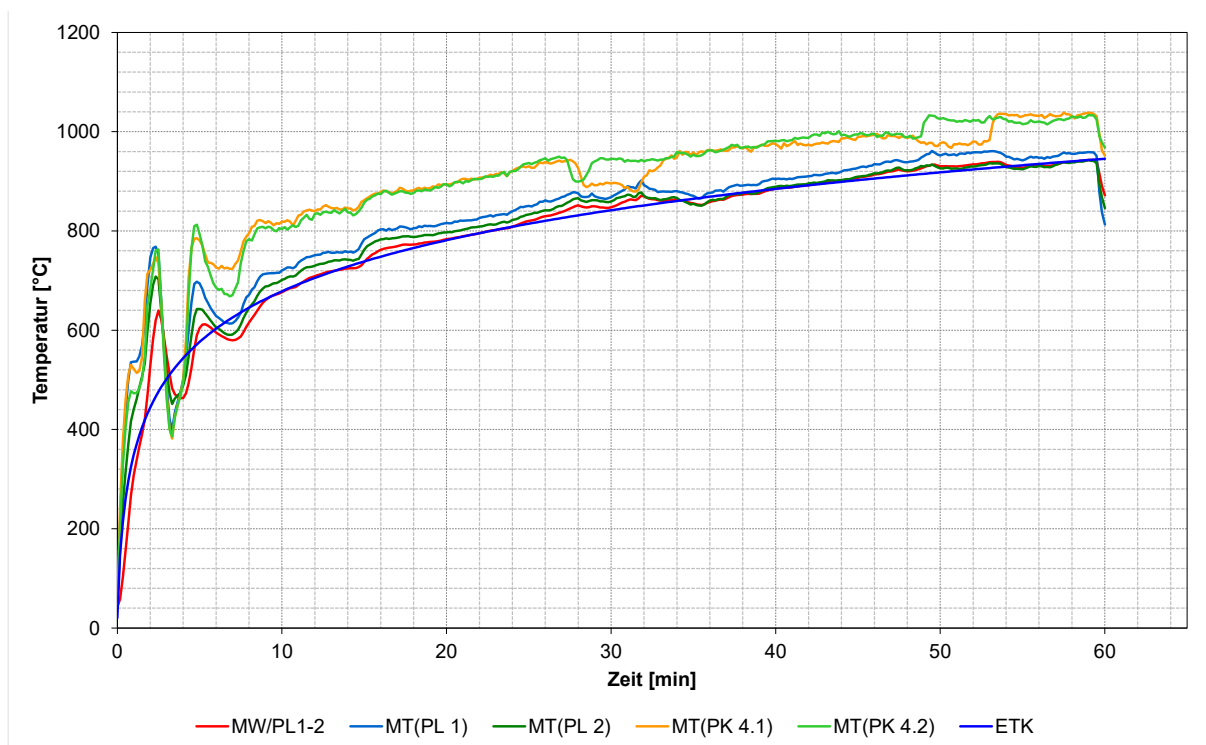


Abbildung 4-40: Temperaturen im Brandraum während V4
Abbildung 4-41 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze in Prüfkörper 4.1 anhand der internen Thermoelemente-Messungen. Alle 5 TE der ersten Messebene erreichten zwischen der 28. und 30. Prüfminute 300°C. In der Grafik wurden die Zeitpunkte gemittelt und ergeben einen vollständigen Abbrand der zu prüfenden Platte nach 29 min. Die erste Hinterlegung brennt schneller ab. So verzeichnet das TE in der zweiten Hinterlegung bereits nach weiteren 19 min (in Prüfminute 48) 300°C. Die Kurve ‚Durchbrand‘ berechnet sich aus

dem Quotienten aus Gesamtdicke des Prüfkörper (57 mm) und der gesamten Beanspruchungsdauer für Prüfkörper 4.1 von $68,3\text{ min}$, vgl. Tabelle 4-15. Die Kurve verläuft steiler als die Kurven der beiden Messebenen. Das Durchbrandverhalten des 57 mm dicken Prüfkörper ist also nicht mit dem Abbrandverhalten der einzelnen Platten gleichzusetzen.

Die entsprechenden Verläufe der Abbrandgrenze in Prüfkörper 4.2 finden sich in Abbildung 4-42. Hier zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei Prüfkörper 4.1. Die 5 Thermoelemente in Messebene 1 verzeichneten im Mittel nach 28 min 300°C , das Thermoelement in Messebene 2 nach weiteren 19 min . Auch Prüfkörper 4.2 brennt nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 65 min durch. Wie bei Prüfkörper 4.1 ist auch hier anzumerken, dass eine einfache Superposition des Abbrands der einzelnen Platten nicht das Abbrandverhalten des ganzen Prüfkörpers (57 mm dick) widerspiegelt.

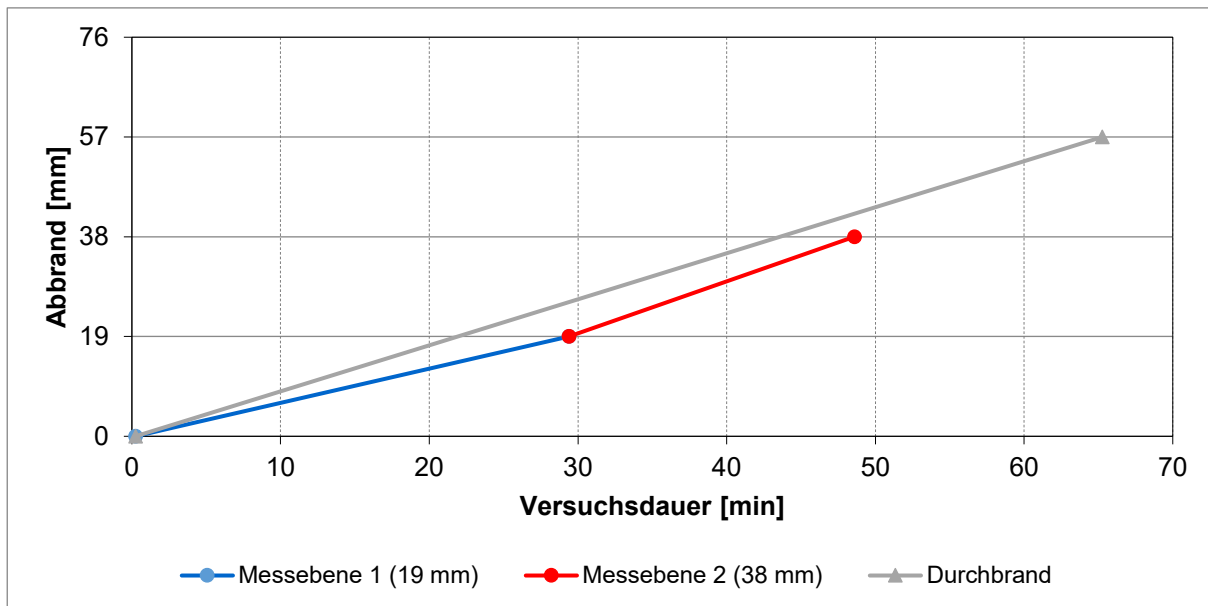


Abbildung 4-41: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 4.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus)

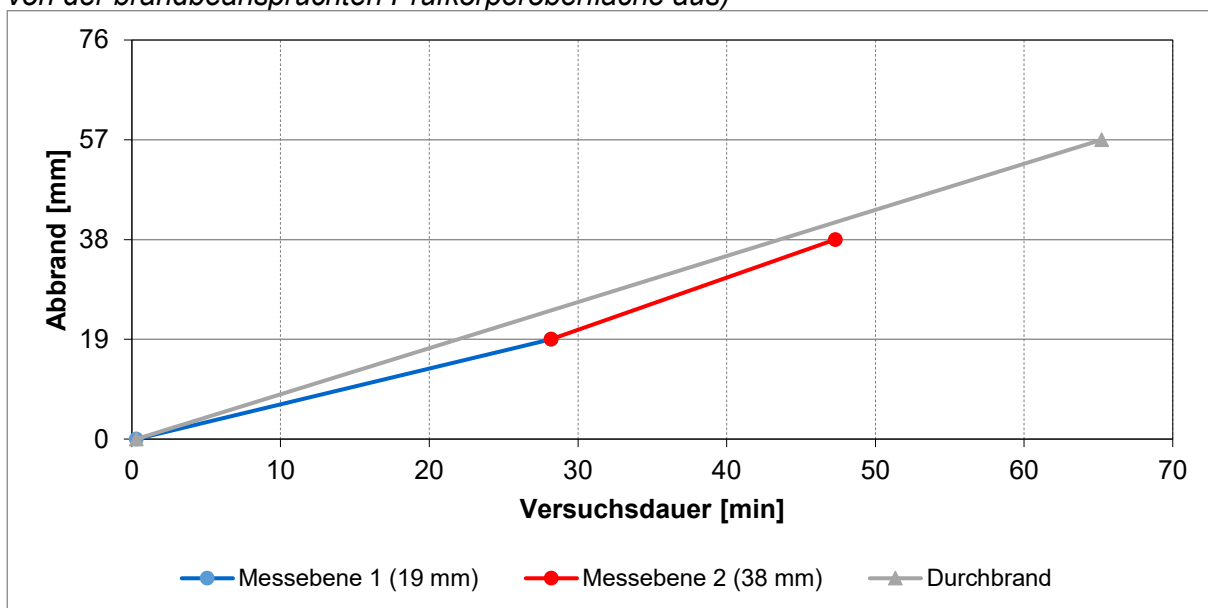


Abbildung 4-42: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 4.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus)

Tabelle 4-16 zeigt die Zeitpunkte der 5 Thermoelemente (TE) in Messebene 1 von Prüfkörper (PK) 4.1 und 4.2. Bei beiden Prüfkörpern befand sich Thermoelement 2 im Abbrandschatten des Prüfofens, Thermoelemente im thermisch höher beanspruchten Bereich. Thermoelement 2 von Prüfkörper 4.1 verzeichnet mit ca. 31 min die längste, Thermoelement 4 die kürzeste Zeit bis zum Erreichen der 300°C. In Prüfkörper 4.2 ist Thermoelement 2 ausgefallen, Thermoelement 4 zeigt jedoch ebenfalls die geringste Zeit bis zur Messung von 300°C aller 5 Thermoelemente in Messebene 1.

Tabelle 4-16: Zeit bis Erreichen der 300°C der TE in Messebene 1 während V4

Versuch V4	TE 1	TE 2	TE 3	TE 4	TE 5
PK 4.1	29,34 min	30,96 min	29,00 min	28,75 min	28,92 min
PK 4.2	28,79 min	ausgefallen	28,20 min	27,30 min	28,42 min

Tabelle 4-17 stellt die Abbrandraten für V4 dar, berechnet mit 2 verschiedenen Rechenmodellen. Die Interpolation (M2) der Abbrandrate ergibt höhere Werte als die Berechnung nach EC 5 (M1). Prüfkörper 4.2 weist bei beiden Modellen höhere Abbrandraten auf als Prüfkörper 4.1.

Tabelle 4-17: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (2 Rechenmodelle) für V4

Versuch V4	EC 5 (Entwurf)	Interpolation
β_0 [mm/min] (PK 4.1)	0,57	0,60
β_0 [mm/min] (PK 4.2)	0,60	0,64
β_0 [mm/min] (V4) - (Mittelwert der PK)	0,59	0,62

Abbildung 4-43 zeigt die Konzentration von O₂, CO₂ und CO im Brandraum während V4. Die Messsonde befand sich, wie in V1, auf der Brenner-zugewandten Seite, vgl. Abbildung 4-23. Bis zur 10. Prüfminute verzeichnen die Kurven von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid große Schwankungen zwischen 0 und knapp 20 %. Nach Prüfminute 10 stabilisiert sich der CO₂-Wert bei ca. 10,5 %, der O₂-Wert bei ca. 8 %. Die CO-Konzentration zeigt in den ersten 8 min Ausschläge bis 1 % und fällt anschließend bis zum Versuchsende auf 0 %.



Abbildung 4-43: Gaskonzentration im Brandraum während V4 Allgemeines zu den Versuchen an der MPA Stuttgart

In der MPA Stuttgart fanden die Versuche V 5, V 6 und V7 statt. Während Prüfkörper (PK) 5 und 6 jeweils einzeln vertikal geprüft wurden, wurde Prüfkörper 7 horizontal in den Prüföfen eingebaut, um den Einfluss der Probekörperorientierung auf das Abbrandverhalten zu untersuchen. Wie schon bei den Versuchen in Leipzig wurde darauf geachtet, dass bei vertikalem Einbau der Balken-PK die Lamellen stehend orientiert sind. Die Temperaturen in den PK wurden (nicht wie in Leipzig alle 10 s) alle 30 s aufgezeichnet. Da sich jeweils nur ein Prüfkörper im Prüföfen befand wurde die Temperatur im Brandraum auch nur mit einem PL gesteuert (und nicht wie bei der gleichzeitigen Prüfung von zwei PK über den Mittelwert zweier PL).

Bei allen Versuchen wurden die Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid mit einem *Testo 350* gemessen und aufgezeichnet. Hierzu wurde eine Rauchgassonde aus Edelstahl (Industriesonden-Set 1200°C von *Testo*) verwendet. Die Rauchgassonde befand sich im oberen Drittel des Prüföfens, mittig vor den Prüfkörpern und zeichnete ebenfalls die Temperatur im Brandraum auf. Zur weiteren Untersuchung der Temperatursteuerung des Prüföfens wurden Mantelthermoelemente im Brandraum installiert. Für V5 und V6 wurde ein Mantelthermoelement, wie bei den Versuchen in Leipzig, mit Rödeldraht auf der Rückseite (PK-abgewandte Seite) des Plattenthermoelements (PL) befestigt, das zur Ofensteuerung verwendet wurde. Das PL befand sich ca. 100 mm von der Prüfkörperoberfläche entfernt. Ein weiteres Mantelthermoelement befand sich ca.

10 mm neben dem Plattenthermoelement auf der Brenner-abgewandten Seite des Prüfofens und ein drittes vor dem PL (auf der PK-zugewandten Seite des PL), vgl. Abbildung 4-44.



Abbildung 4-44: Anordnung der TE (vor, neben und hinter PL) im Brandraum (Stahlrohr neben PL: Gasmesssonde des Testo 350; MT hinter PL nicht sichtbar)

Für V7 (bei dem der Prüfkörper horizontal geprüft wurde) wurden 2 Plattenthermoelemente (PL) zur Steuerung der Ofentemperatur verwendet (eines auf brennerzugewandten und eines auf der abgewandten Seite von Prüfkörper 7), vgl. Abbildung 4-45. Hier wurde je ein Mantelthermoelement (MT) neben den 2 PL durch die Decke des Prüfofens eingeführt (die Öffnung wurde mit Mineralwolle fest verstopft). Ein weiteres MT befand sich mittig in ca. 100 mm Abstand vor der brandbeanspruchten Oberfläche von Prüfkörper 7. Ein viertes MT befand sich, wie bei allen anderen Prüfkörpern, mittig direkt auf der brandraumseitigen Oberfläche von Prüfkörper 7. Die Gasmesssonde wurde durch die Ofenwand in den Brandraum eingeführt, die Messspitze befand sich, wie eines der MT, mittig in ca. 100 mm Abstand vom Prüfkörper entfernt. Die Öffnung zur Durchführung wurde fest mit Mineralwolle verstopft.



Abbildung 4-45: Anordnung der PL und MT während V7 (rote Markierungen: MT neben PL 1 und 2)

Die MPA Stuttgart verfügt über keine kontinuierliche Aufzeichnung des Brandraumdrucks. Daher wurde ca. alle 5 *min* der Druck abgelesen und am Ende ein Mittelwert gebildet. Nach dem Ausbau der Prüfkörper aus dem Prüfofen wurden sie mit dem kompletten Inhalt einer Gießkanne (10 l) abgelöscht.

4.2.9 Versuch V5 (PK 5): Einfluss des Prüfofens

Versuch V5 fand am 11.10.2022 an der MPA Stuttgart statt und diente dazu, den Einfluss unterschiedlicher Prüfofen auf das Abbrandverhalten von Holz zu untersuchen. Vergleichsversuche wurden an der MFPA Leipzig durchgeführt. Tabelle 4-18 gibt eine Übersicht der wichtigsten Daten zu V5.

Tabelle 4-18: Übersicht V5.1 (PK 5.1)

Versuch V5 (PK 5.1)	
Material / Rohdichte [kg/m ³] / r.F. [%]	KVH (Fichte) / 435 / 13,7
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 480 x 115
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal, Lamellen stehend
Instrumentierte Lamelle im Abbrandschatten	Lamelle 3
Mittelwert des Ofendrucks [Pa]	16,3
Mittelwert der O ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	0,2
Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	16,0
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	122,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	1,16 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	-2,0 (geht negativ ein)
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	3,0
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	121,8
Löschwassermenge [l]	Ca. 10
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschrauber) [min]	3,0
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	8/14191
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	8/13377
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	64/167634

Abbildung 4-46 stellt die Temperaturen im Brandraum während V5 dar. In den ersten 10 *min* liegt die Brandbeanspruchung (gemessen mittels Plattenthermoelements, rote Kurve) über ETK und verläuft über die weitere Versuchsdauer nahezu identisch mit der ETK. Im Gegensatz zu den Versuchen an der MFPA Leipzig fällt auf, dass die Temperatur direkt an der Prüfkörperoberfläche (gelbe Kurve) bis zur 70. Prüfminute unter ETK-Niveau liegt. Die Differenz beträgt hier zwischen ca. 20 und 100 °C. Nach Minute 70 verläuft die Kurve mit wenigen °C Unterschied parallel zur ETK. Die Kurven aller

Mantelthermoelemente (MT), die am Plattenthermoelement (PL) befestigt sind (neben, vor (prüfkörperzugewandt) und hinter (prüfkörperabgewandt) dem PL, vgl. Abbildung 4-44) weisen höhere Temperaturen auf als das PL selbst, das zur Temperatursteuerung im Prüfofen verwendet wurde. Die Gasmesssonde des *Testo 350* verzeichnet ab der 10. Prüfminute ähnliche Temperaturen wie das PL und scheint somit im Vergleich zu den MT ähnlich träge zu sein wie das PL.

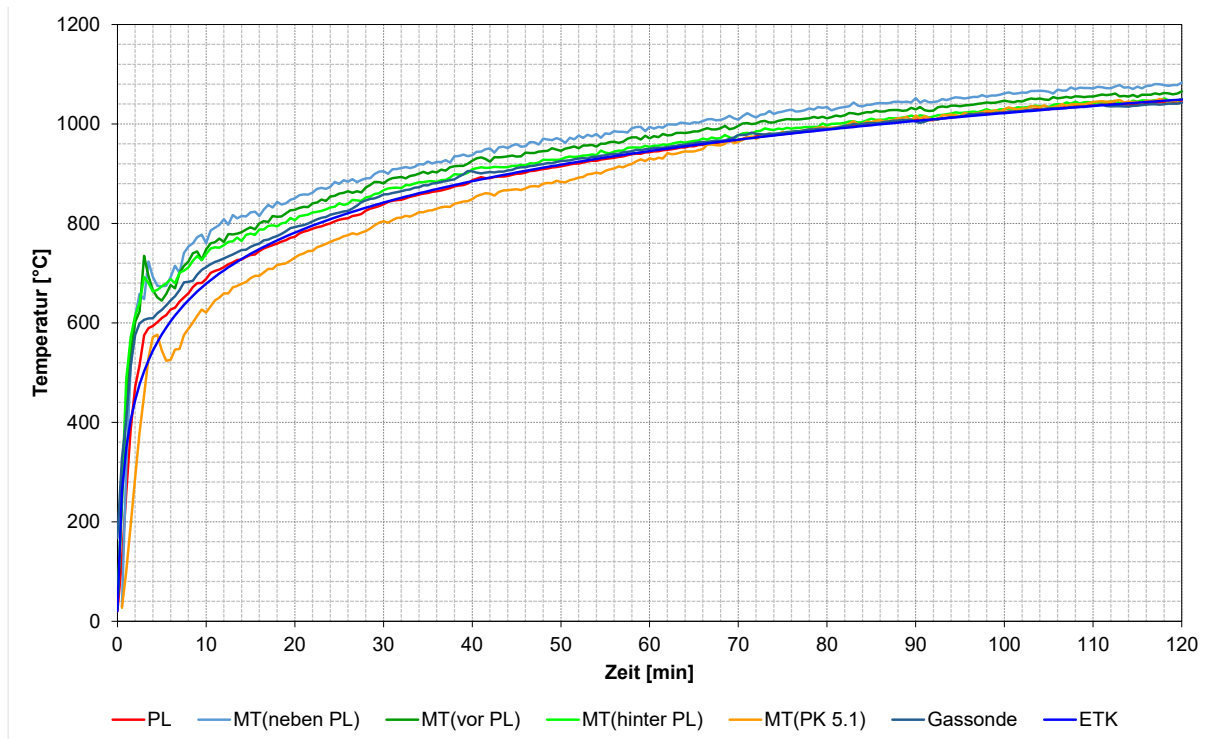


Abbildung 4-46: Temperaturen im Brandraum während V5

Abbildung 4-47 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze in Prüfkörper 5 anhand der internen Temperaturmessungen und der Restquerschnittmessungen. Letzteres beziehen sich auf eine gesamte Beanspruchungsdauer von 121,8 min (vgl. Tabelle 4-18). Lamelle 3 lag im Abbrandschatten des Prüfofens. Bis zur 30. Prüfminute schreitet die 300 °C-Isotherme in beiden Lamellen annähernd gleich schnell voran, im weiteren Verlauf verkohlt Lamelle 6 mit einem zeitlichen Versatz von bis zu 15 min schneller als Lamelle 3. Nach einer Prüfdauer von 104 min verzeichnet Lamelle 3 eine Abbrandtiefe von 60 mm, Lamelle 6 dagegen 72 mm. Insgesamt weisen die Kurven beider Lamellen einen linearen Trend auf. Die Kurven der Restquerschnittmessungen (3D und manuell) sind nahezu identisch. Sie liegen zwischen den Kurven der Temperaturmessungen und weisen eine ähnliche Steigung auf. Nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 121,8 min ergibt die manuelle Messung des Restquerschnitts eine Abbrandtiefe von 72,7 mm, die des 3D-Modells 73,6 mm.

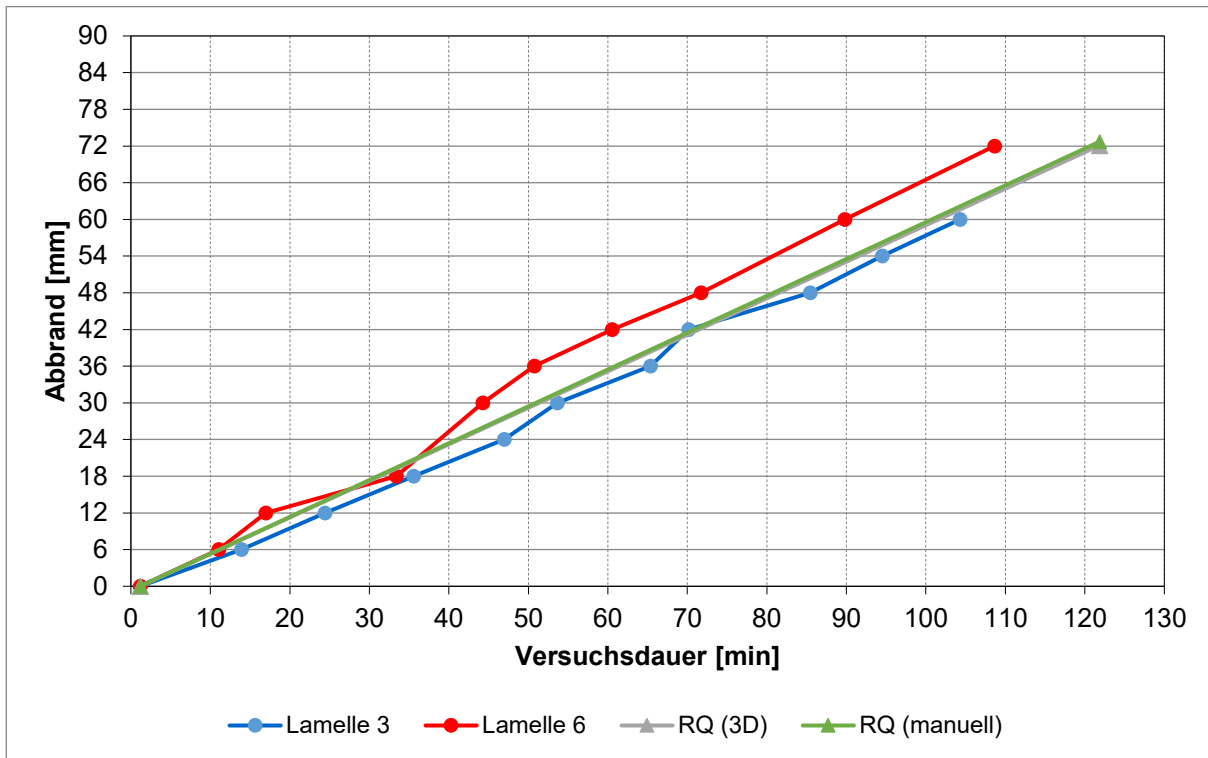


Abbildung 4-47: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 5 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen

Abbildung 4-48 und Abbildung 4-49 zeigen den Restquerschnitt von Prüfkörper 5 und das zugehörige 3D-Modell. Rote Bereiche weisen hohen, blaue geringen Abbrand auf. Der sehr gleichmäßige Abbrand von Prüfkörper 5 (die 64 manuellen Messpunkte hatten eine Standardabweichung σ von 4,0 mm; alle anderen Prüfkörpern wiesen bei 64 Messpunkten ein σ von 4 bis 8 mm auf) wird durch das 3D-Modell, bis auf wenige Lücken in der Punktwolke, gut abgebildet.



Abbildung 4-48: RQ von PK 5

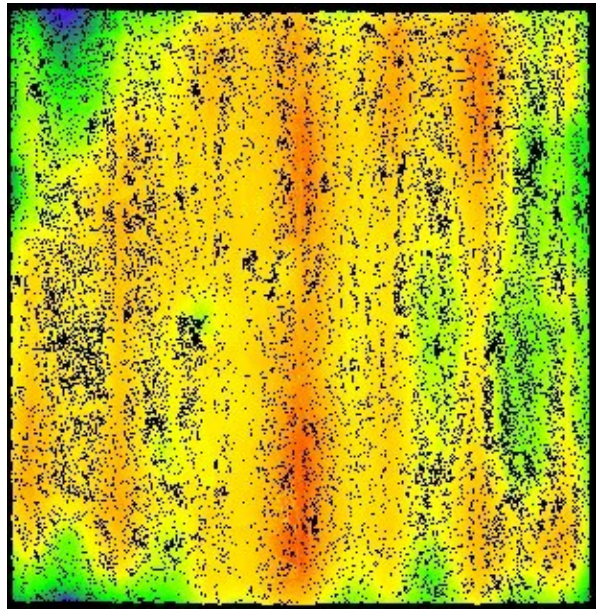


Abbildung 4-49: 3D-Modell von PK 5

Tabelle 4-19 fasst die mit unterschiedlichen Methoden ermittelten Abbrandtiefen von Prüfkörper 5 zusammen. Legt man für einen Vergleich eine Abbrandrate von $0,65 \text{ mm/min}$ (gültiger Normwert nach EC 5) zugrunde, so korrelieren der manuell gemessene Restquerschnitt von Lamelle 3 und die zugehörige Temperaturmessung (im Bereich der natürlichen Streuung) miteinander. Die internen Thermoelemente in Lamelle 3 zeigen nach 104 min eine Abbrandtiefe von 60 mm an, die manuelle Restquerschnittmessung $71,07 \text{ mm}$ nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von $121,8 \text{ min}$. Betrachtet man den Mittelwert beider Lamellen und des gesamten Prüfkörpers, so zeigen die Thermoelementmessungen etwas höhere Abbrandtiefen an als die Restquerschnittmessungen (RQ). Manuelle RQ- und 3D-Messung unterscheiden sich im Mittelwert für den ganzen Prüfkörper um $0,61 \text{ mm}$, bei den Lamellen liegt die maximale Differenz bei $1,25 \text{ mm}$.

Tabelle 4-19: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V5.1

Versuch V5.1 (PK 5.1)	Abbrandtiefe anhand Temperaturmessungen	Abbrandtiefe anhand RQ (3D)	Abbrandtiefe anhand RQ (manuell)
Lamelle 3	60 mm nach 104 min	71,01 mm nach 121,8 min	72,07 mm nach 121,8 min
Lamelle 6	72 mm nach 108 min	73,04 mm nach 121,8 min	71,79 mm nach 121,8 min
Mittelwert (Lamellen) *	66 mm nach 106 min	72,03 mm nach 121,8 min	71,93 mm nach 121,8 min
Mittelwert (ganzer PK) **	66 mm nach 106 min	72,09 mm nach 121,8 min	72,70 mm nach 121,8 min

* Mittelwert der Abbrandtiefen und auch der Zeit beider Lamellen

** entspricht bei Temperaturmessungen dem Mittelwert der Lamellen; bei RQ-Messungen der gesamten vermessenen PK-Oberfläche von ca. 350 x 350 mm

Abbildung 4-50 stellt die Konzentration verschiedener Brandgase im Brandraum während V5 dar. Im Gegensatz zu den Versuchen an der MFPA Leipzig zeigt sich hier ein anderes Bild. Die O₂-Konzentration sinkt innerhalb der ersten 5 Prüfminuten auf 0 %, die CO-Konzentration bewegt sich dagegen im Mittel zwischen 1 und 2 %. In Prüfminute 4 ist deutlich zu erkennen, wie der CO-Gehalt sprunghaft ansteigt, sobald der Sauerstoffgehalt unter 1 % sinkt. Der CO₂-Gehalt bewegt sich nach Minute 5 durchgängig bei ca. 16,0 %.

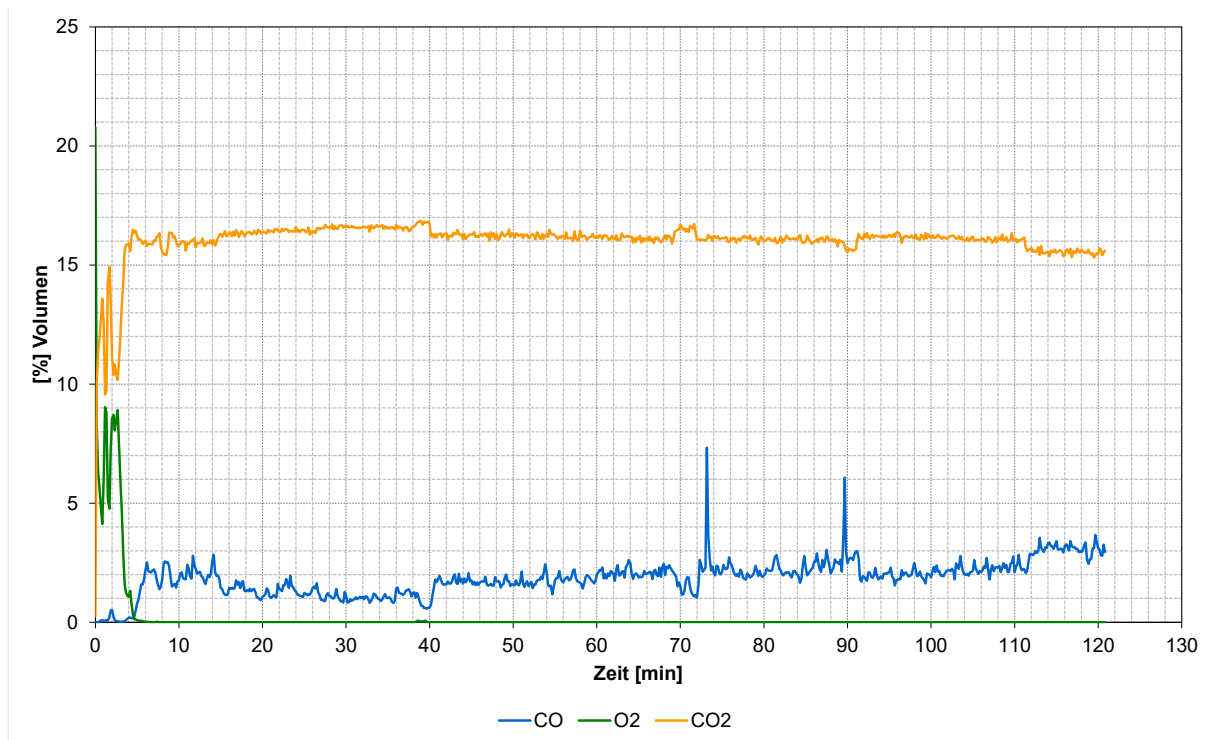


Abbildung 4-50: Gaskonzentration im Brandraum während V5.1 Tabelle 4-20 stellt die Abbrandraten für V5 zusammen. Die Berechnung nach EC 5 (M1) ergibt den höchsten Wert mit $0,72 \text{ mm/min}$. Die manuellen Restquerschnittmessungen, sowie die Berechnung nach Methode M2 ergeben eine Abbrandrate von $0,60 \text{ mm/min}$, die 3D-Messung $0,59 \text{ mm/min}$. Die Interpolation liegt mit $0,63 \text{ mm/min}$ zwischen Thermoelement- und Restquerschnittmessungen.

Tabelle 4-20: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ-Messungen für V5.1

Versuch V5.1 (PK 5.1)	M1 (EC 5))	M2	M3	RQ (3D)	RQ (manuell)
β_0 [mm/min] (PK 3.1)	0,72	0,63	0,60	0,59	0,60

4.2.10 Versuch V6 (PK 6): Einfluss des Prüfofens und des Prüfkörpermaterials

V6 fand am 11.10.2022 an der MPA Stuttgart statt und diente der Erweiterung der Datenlage zum Vergleich des Einflusses verschiedener Prüfofen auf das Abbrandverhalten von Holzwerkstoffplatten. Vergleichsversuche wurden an der MFPA Leipzig durchgeführt. Tabelle 4-21 fasst die wichtigsten Daten zu V6 zusammen.

Tabelle 4-21: Übersicht V6 (PK 6)

Versuch V6 (PK 6)	
Material / Rohdichte [kg/m^3] / r.F. [%]	Spanplatte / 611 / 7,4
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 490 x 57
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal
TE-Nr. im Abbrandschatten	TE Nr. 4
Mittelwert des Ofendrucks [Pa]	9,6
Mittelwert der O_2 -Konzentration im Prüfofen [%]	0,58
Mittelwert der CO_2 -Konzentration im Prüfofen [%]	16,1
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	80,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	2,11 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	-1,5 (geht negativ ein)
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	Nicht relevant, da kein RQ
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	77,4
Löschwassermenge [l]	Nicht relevant, da kein RQ
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschrauber) [min]	Keine HK entfernt, da kein RQ
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	Keine, da kein RQ
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	Keine, da kein RQ
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	Keine, da kein RQ

Abbildung 4-51 stellt die Brandraumtemperaturen während V6.1 dar. Während die Messkurven von Plattenthermoelementen (PL) (zur Temperatursteuerung im Prüfofen verwendet) und Mantelthermoelemente (vor PL), das auf der prüfkörperzugewandten Seite des PL befestigt war (vgl. Abbildung 4-44), ab der 6. Prüfminute identisch mit der ETK verlaufen, so weisen die anderen MT am PL (daneben und dahinter) höhere Temperaturen als die ETK auf. Das MT direkt auf der brandbeanspruchten Oberfläche von Prüfkörper 6.1 weist bis zu Minute 48 unter ETK-Niveau liegende Temperaturen auf, um dann bis zum Prüfende identisch mit der ETK zu verlaufen.

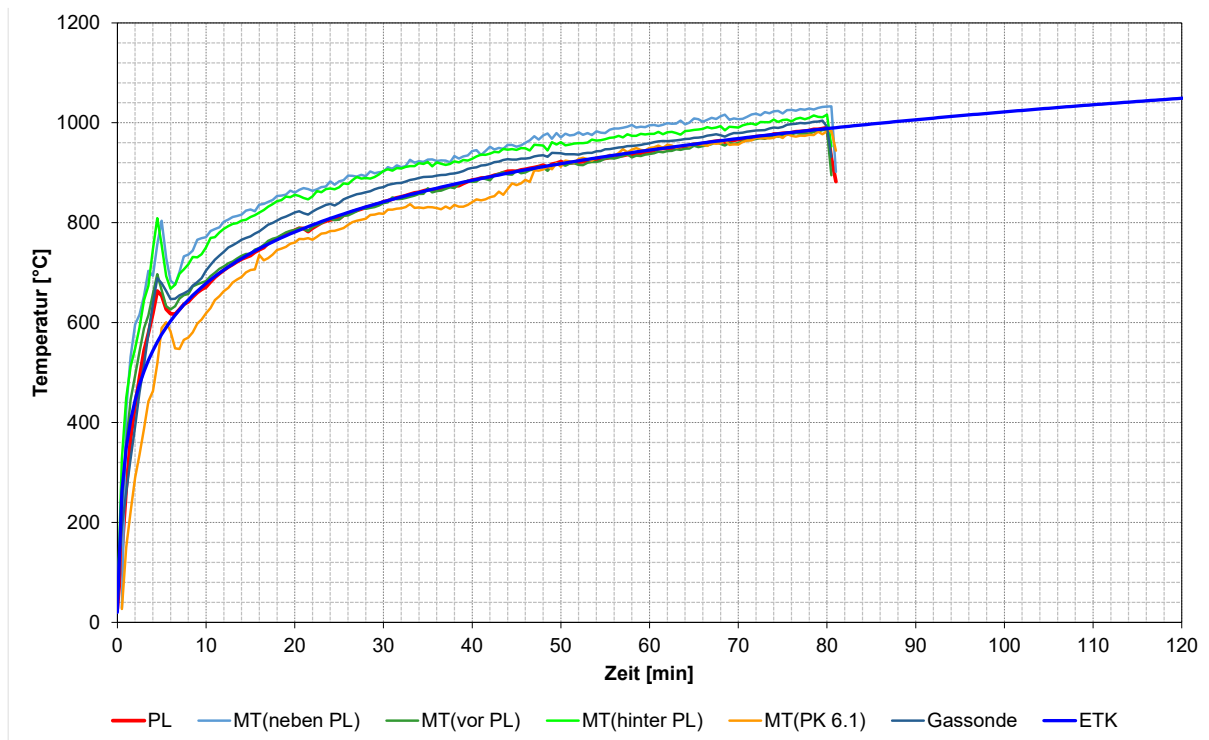


Abbildung 4-51: Temperaturen im Brandraum während V6

Abbildung 4-52 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze in Prüfkörper 6 anhand von Temperaturmessungen. Die Prüfkörperoberfläche erreicht erst nach Minute 2 eine Temperatur von 300 °C. Nach 34 Prüfminuten erreicht die 300 °C-Isotherme die erste Messebene in 19 mm Tiefe, nach weiteren 28 min Messebene 2 in 38 mm Tiefe. Die graue Kurve setzt die Prüfkörperdicke (57 mm) zur gesamten Beanspruchungsdauer von 77,4 min ins Verhältnis. Die Kurve verläuft steiler als die zwei Kurven der beiden Messebenen. Das bedeutet, dass das Durchbrandverhalten des Prüfkörpers nicht dem Abbrandverhalten der einzelnen Platten entspricht.

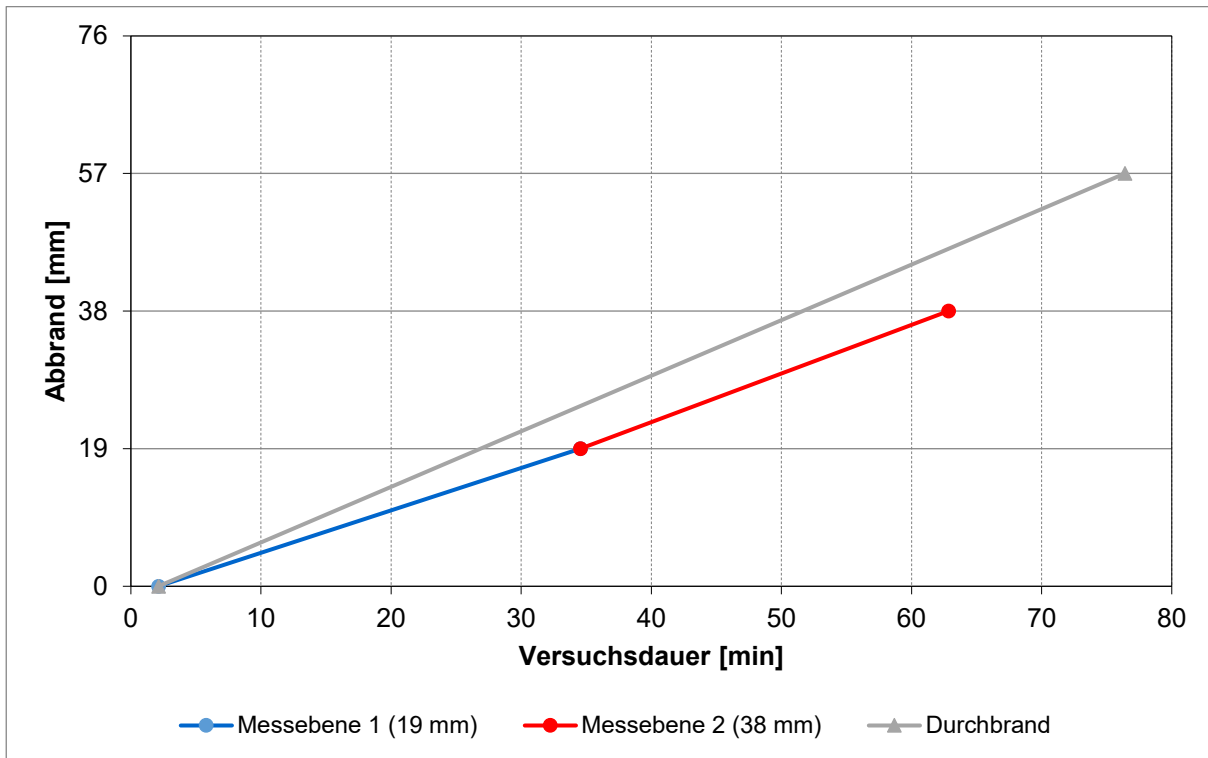


Abbildung 4-52: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 6 (Messebene 1 (5 TE) in 19 mm, Messebene 2 (1 TE) in 38 mm Tiefe); Erreichen der 300°C am PK 2,11 min nach Versuchsbeginn

Tabelle 4-22 zeigt die Zeiten bis zum Erreichen von 300 °C aller Thermoelemente (TE) in Messebene 1 (5 TE). Thermoelement 4 lag im Abbrandschatten, Thermoelement 2 im thermisch stärker beanspruchten Bereich des Prüfofens.

Tabelle 4-22: Zeit bis Erreichen der 300 °C der TE in Messebene 1 von PK 6

Versuch V6	TE 1	TE 2	TE 3	TE 4	TE 5
PK 6.1	34,93 min	33,48 min	35,09 min	36,83 min	32,38 min

Tabelle 4-23 beinhaltet die mit verschiedenen Berechnungsmethoden ermittelten Abbrandraten für Prüfkörper 6. Das Modell nach EC 5 (M1) ergibt ein β_0 von 0,57 mm/min, die Interpolation (M2) von β_0 liegt mit 0,60 mm/min etwas darüber.

Tabelle 4-23: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (2 Rechenmodelle)

Versuch V6	Methode M1 (EC 5)	Methode M2
β_0 [mm/min] (PK 6)	0,57	0,60

Abbildung 4-53 zeigt die Konzentration von Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid während V6.1. Nach starken Schwankungen der Konzentrationen in den ersten 10 Prüfminuten sinkt der O₂-

Gehalt auf 0 %, der CO₂-Gehalt pendelt sich bei 16,5 % ein. Die CO-Konzentration liegt bis Minute 35 bei unter 1 % und steigt dann stetig bis Versuchsende auf bis zu 2 %.

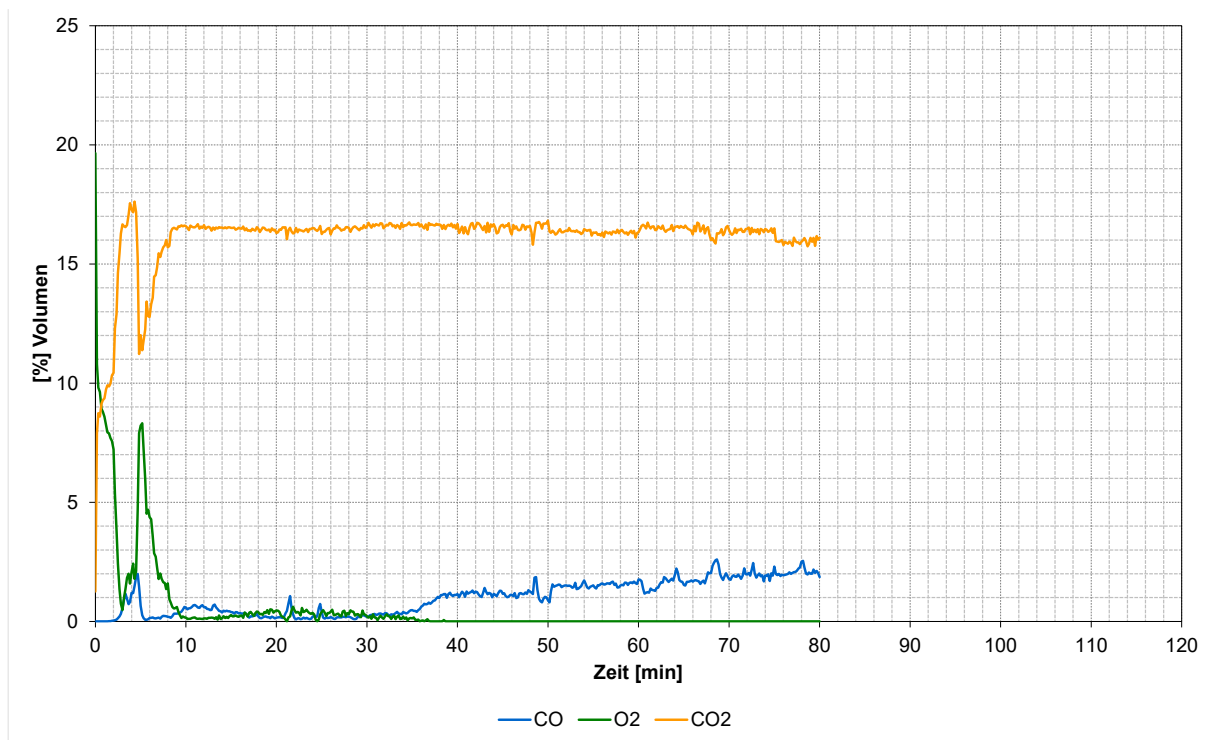


Abbildung 4-53: Gaskonzentration im Brandraum während V6 (gemessen durch Testo 350)

4.2.11 Versuch V7 (PK 7): Einfluss der Prüfkörperorientierung

Versuch V7 fand am 10.10.2022 an der MPA Stuttgart statt und diente der Untersuchung der Prüfkörperorientierung während eines Brandversuchs. Prüfkörper (PK) 7 wurde so eingebaut, dass die Lamellen quer zur Längsachse des Prüfofens orientiert waren, vgl. Abbildung 4-54. Somit war die Messstation in Lamelle 3 auf der Brenner-zugewandten Seite und die Messstation in Lamelle 6 auf der Brenner-abgewandten Seite des Prüfofens. Eine Besonderheit beim horizontalen Einbau von PK 7 war die Tatsache, dass die brandbeanspruchte Oberfläche bündig mit der Ofendecke abschließt. Der 50 mm breite Versatz durch die Ofenwand entfällt hier und es ist somit kein unregelmäßiger Abbrand aufgrund des Abbrandschattens durch die Ofenwand zu erwarten.



Abbildung 4-54: Horizontaler Einbau von PK 7 (Brenner auf der linken, Abzug auf der rechten Seite)

Tabelle 4-24 fasst die wichtigsten Daten zu V7 zusammen.

Tabelle 4-24: Übersicht V7 (PK 7)

V7 (PK 7)	
Material / Rohdichte [kg/m³] / r.F. [%]	KVH (Fichte) / 435 / 13,7
Maße L x B x H (ohne GF) [mm]	490 x 480 x 115
Angestrebte Beanspruchung	ETK nach DIN EN 1363-1:2020
Prüfkörperorientierung	Vertikal, Lamellen stehend
Instrumentierte Lamelle im Abbrandschatten	Lamelle 3
Mittelwert des Ofendrucks [Pa]	13,5
Mittelwert der O ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	0,8
Mittelwert der CO ₂ -Konzentration im Prüfofen [%]	15,8
Versuchsdauer (bis „Brenner aus“) [min]	122,0
Zeit bis PK 300 °C erreicht (gemessen mit MT, mittig am PK) [min]	1,18 (geht negativ ein)
Zusätzliche Zeit Delta t "Abweichung von ETK" [min]	6,5
Zeit bis zum Ablöschen des PK [min]	2,0
Gesamte Beanspruchungsdauer des PK [min]	129,3

Löschwassermenge [l]	Ca. 10
Dauer des Entferns der Holzkohle (mit Spachtel und Drahtbürste (Stahldrähte) im Akkuschrauber) [min]	2,0
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 3) manuell/3D	8/19224
Anzahl der Messpunkte (Abbrand Lamelle 6) manuell/3D	8/21861
Anzahl der Messpunkte (Abbrand gesamter PK) manuell/3D	64/252591

Abbildung 4-55 zeigt die Brandraumtemperaturen während V7. Der Mittelwert der beiden zur Temperatursteuerung im Prüfofen verwendeten Plattenthermoelemente (PL) 1 und 2 (rote Kurve) bildet die ETK fast identisch ab. Aufgrund eines Steckfehlers im Messbrett existieren für die ersten 10 Prüfminuten keine Temperaturmessungen der Mantelthermoelemente (MT). Ab Minute 10 fällt auf, dass alle MT deutlich über ETK-Niveau liegende Temperaturen messen. Das MT an PL 2 (Abzug-Seite des Prüfofens) weist zwischen 20 und 40 °C niedrigere Temperaturen auf als das MT an PL 1 (Brennerseite des Prüfofens). Die Messung der Gasmesssonde und des direkt daneben befindlichen MT (vor Prüfkörper 7) weisen über die gesamte Versuchsdauer ebenfalls eine Temperaturdifferenz von ca. 40 °C auf.

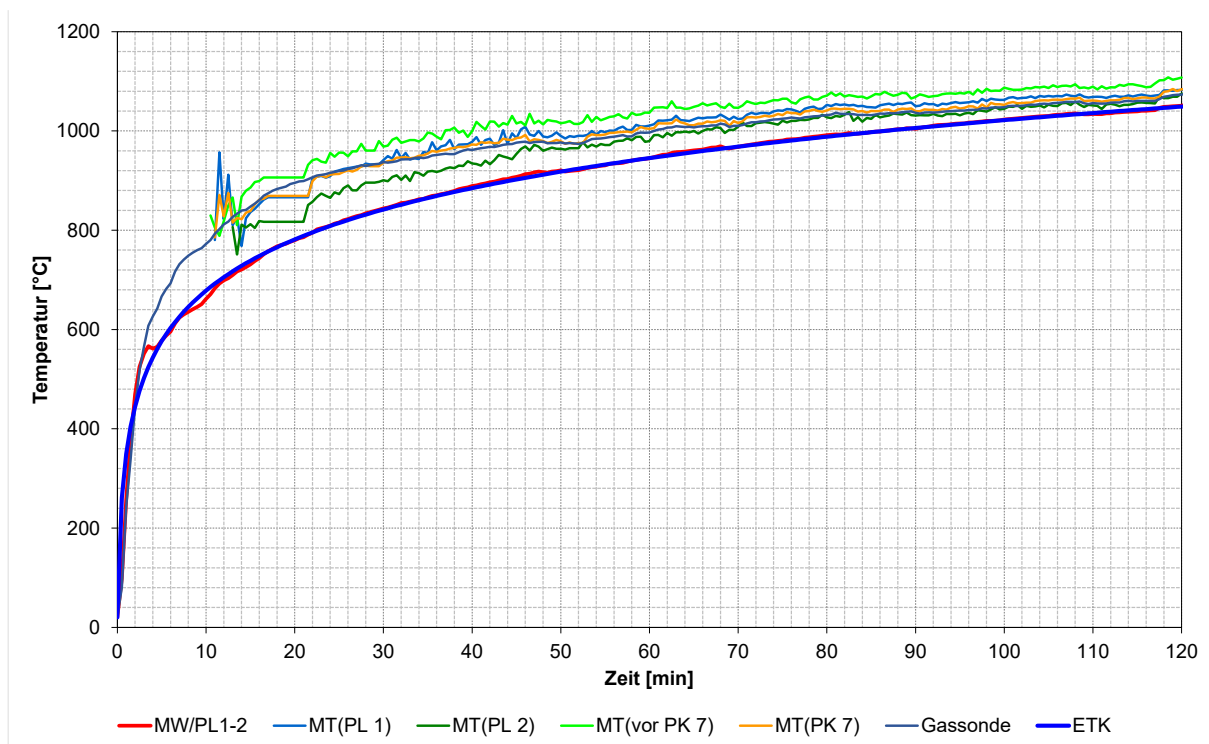


Abbildung 4-55: Temperaturen im Brandraum während V7
Abbildung 4-56 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze anhand der verschiedenen Messverfahren in Prüfkörper 7. Lamelle 3 lag im Abbrand-schatten des Prüfofens. Lamelle 6 verkohlt mit einer zeitlichen Differenz von ca. 5 min schneller als

Lamelle 3. Insgesamt liegen die Kurven der beiden Lamellen eng zusammen und zeigen einen linearen Trend. Nach einer Versuchsdauer von 119 *min* verzeichnen beide Lamellen eine Abbrandtiefe von 66 *mm*. Die Kurven der Restquerschnittmessungen verlaufen weniger steil als die der Lamellen und enden daher bei einer ähnlichen Abbrandtiefe wie die Thermoelementmessungen (3D: ca. 68 *mm*, manuell: ca. 67 *mm*), jedoch nach einer gesamten Beanspruchungsdauer von 129,3 *min*.

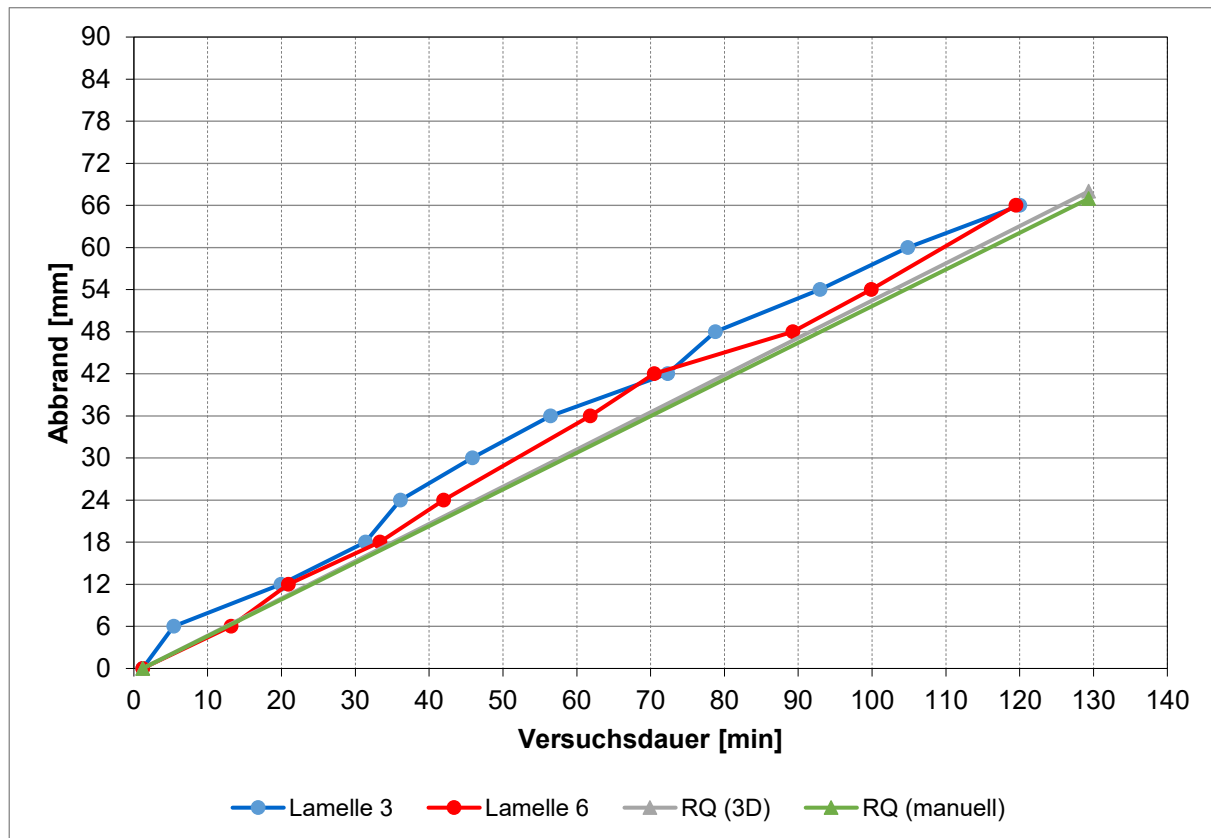


Abbildung 4-56: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 7 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen

Abbildung 4-57 und Abbildung 4-58 zeigen den Restquerschnitt von Prüfkörper 7 und das zugehörige 3D-Modell. Wie bei den Prüfkörpern zuvor bildet die Punktwolke des 3D-Modells die verkohlte Oberfläche treffend ab. Stellenweise weist die Punktwolke Lücken auf.



Abbildung 4-57: RQ von PK 7 (eigene Aufnahme)

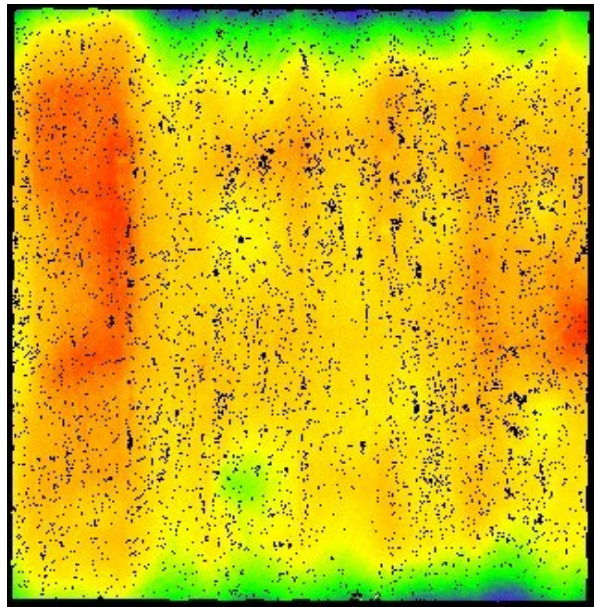


Abbildung 4-58: 3D-Modell von PK 7

Tabelle 4-25 fasst die unterschiedlich ermittelten Abbrandwerte zusammen. Obwohl sich die Messwerte der Lamellen der unterschiedlichen Messverfahren um bis zu 6 mm unterscheiden, so liegen die Mittelwerte für den gesamten Prüfkörper 7 dennoch eng zusammen (maximale Differenz von 2 mm).

Tabelle 4-25: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V7

Versuch V7 (PK 7)	Abbrandtiefe anhand Temperaturmessungen	Abbrandtiefe anhand RQ (3D)	Abbrandtiefe anhand RQ (manuell)
Lamelle 3	66 mm nach 119 min	70,90 mm nach 129,3 min	64,44 mm nach 129,3 min
Lamelle 6	66 mm nach 119 min	69,90 mm nach 129,3 min	64,83 mm nach 129,3 min
Mittelwert (Lamellen) *	66 mm nach 119 min	70,40 mm nach 129,3 min	64,64 mm nach 129,3 min
Mittelwert (ganzer PK) **	66 mm nach 119 min	68,00 mm nach 129,3 min	66,96 mm nach 129,3 min

* Mittelwert der Abbrandtiefen und auch der Zeit beider Lamellen

** entspricht bei Temperaturmessungen dem Mittelwert der Lamellen; bei RQ-Messungen der gesamten vermessenen PK-Oberfläche von ca. 350 x 350 mm

Tabelle 4-26 enthält die unterschiedlich ermittelten Abbrandraten für V7. Die Methoden nach EC 5 (M1) und M3 auf Basis der Thermoelementmessungen weisen mit 0,66 mm/min den höchsten Wert

für β_0 auf. Die Restquerschnittmessungen stellen mit 0,52 (manuell) und 0,53 mm/min (3D) die niedrigsten Werte dar und unterscheiden sich damit nur geringfügig voneinander. Die Interpolation von β_0 liegt mit einer Differenz von maximal 0,03 mm/min nahe an den Restquerschnittmessungen.

Tabelle 4-26: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ-Messungen für V7

Versuch V7 (PK 7)	Methode M1 (EC 5)	Methode M2	Methode M3	RQ (3D)	RQ (manuell)
β_0 [mm/min] (PK 3.1)	0,66	0,55	0,66	0,53	0,52

Abbildung 4-59 stellt den Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 und CO im Brandraum während V7 dar. Nach der 10. Prüfminute stellt sich im Falle von CO_2 ein Mittelwert von ca. 16 % ein. In den ersten 10 Prüfminuten fällt der Sauerstoffgehalt stetig bis auf unter 1 %. Hier zeigt sich eine deutliche Korrelation zum CO -Gehalt. Sobald die O_2 -Konzentration auf unter ca. 0,5 % sinkt, steigt der CO -Gehalt sprunghaft an (erkennbar bei Prüfminute 50 und 68). Nach 80 min fällt der O_2 -Gehalt bis zum Versuchsende auf 0 %, woraufhin die CO -Konzentration auf bis zu 6 % ansteigt.

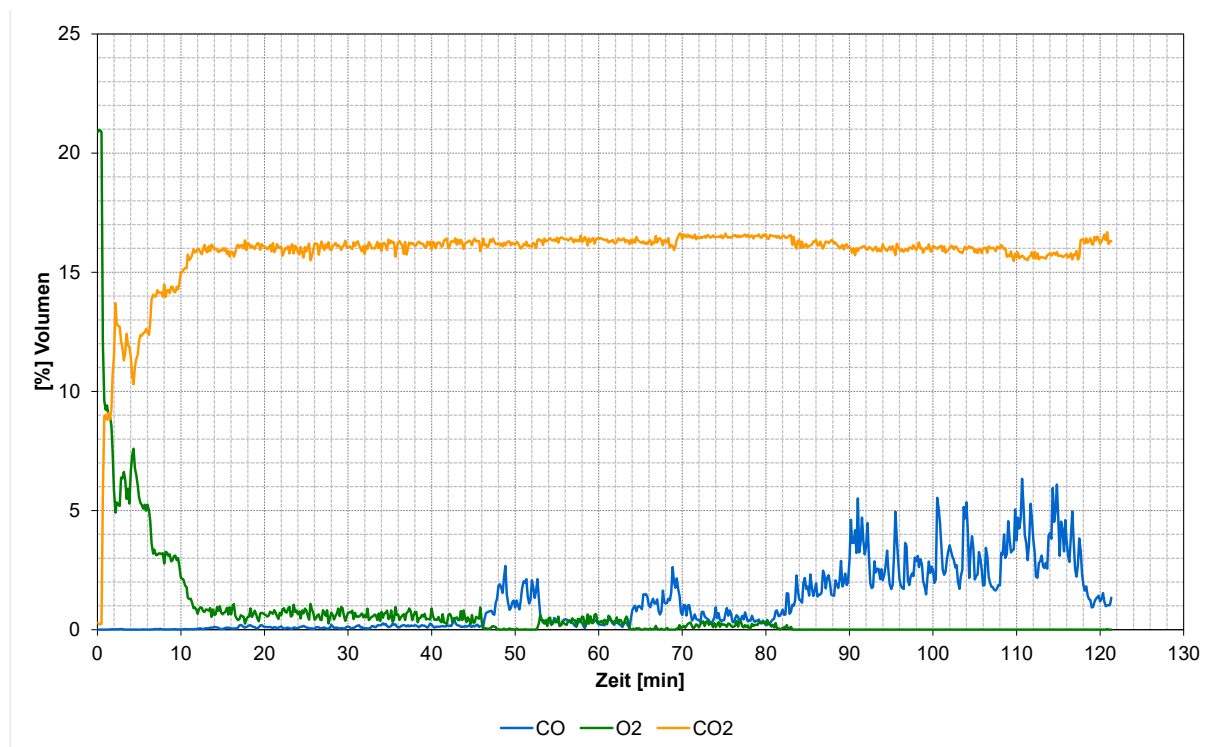


Abbildung 4-59: Gaskonzentration im Brandraum während V7 (gemessen durch Testo 350)

4.2.12 Versuche V10, V10 und V11

Die Versuche wurden innerhalb der Bachelorarbeit von Ross [42] an der TUM durchgeführt und sind nicht direkter Gegenstand dieser Auswertung. Da es sich hier nur um einen Vergleichsversuch von in Faserrichtung beanspruchten Lamellen aus Brettspertholz mit unterschiedlichen Abmessungen (Teil 8 und 1m- Versuch) handelt, konnte hieraus kein direkter Vergleich zu den Abbrandraten an Konstruktionsvollholz gezogen werden. Dennoch konnte der Einfluss der Probekörperabmessungen bzw. des Prüfofens auf die Abbrandtiefe abgeleitet werden.

4.3 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

In Tabelle 4-27 sind die Ergebnisse der 3D- Auswertung sowie die aus den Restquerschnitten ermittelten Abbrandraten dargestellt. Für die Auswertung des 3D- Restquerschnittes wurden zusätzlich die Abbrandraten ohne Berücksichtigung der Ablöschzeit aber mit der Korrekturzeit durch die Abweichung zur ETK (ohne Berücksichtigung der Ablöschzeit) dargestellt.

Tabelle 4-27: Zusammenfassung der Ergebnisse für Massivholzquerschnitte

Versuch und PK	Abbrand (3D) [mm]	Abbrand (manuell) [mm]	β_0 (3D) [mm/min]	β_0 (manuell) [mm/min]	β_0 (3D) [mm/min] ohne Berücksichtigung der Ablöschzeit	β_0 (3D) [mm/min] Zeit Brenner an
V1 (KVH, Beanspruchungsdauer 124,2 min (inkl. 2 min Ablöschzeit),						
PK 1	80,44	79,37	0,65	0,64	0,66	0,72
V2 (KVH, Beanspruchungsdauer 124,1 (PK 2.1) und 123,6 min (PK 2.2)) (inkl. 1 min Ablöschzeit)						
PK 2.1	78,05	76,75	0,63	0,62	0,64	0,70
PK 2.2	74,13	71,69	0,6	0,58	0,60	0,66
Mittelwert V2	76,09	74,22	0,62	0,6	0,62	0,68
V3 (KVH, Beanspruchungsdauer 117,3 (PK 3.1) und 118,2 min (PK 3.2)) (inkl. 1,5 min Ablöschzeit)						
PK 3.1	79	77	0,67	0,66	0,68	0,73
PK 3.2	78,28	76,28	0,66	0,65	0,68	0,72
Mittelwert V3	78,64	76,64	0,67	0,66	0,68	0,73
V5 (KVH, Beanspruchungsdauer 121,8 min) (inkl. 3 min Ablöschzeit)						
V5 (PK 5)	72,09	72,7	0,59	0,6	0,61	0,59
V7 (KVH, Beanspruchungsdauer 129,3 min) (inkl. 2 min Ablöschzeit)						
V7 (PK 7)	68	66,96	0,53	0,52	0,53	0,56

Zur digitalen Auswertung der Restquerschnitte wurden zusätzlich unterschiedliche Messraster durch Schleimer [46] miteinander verglichen und sind nachfolgen in Tabelle 4-28 gezeigt.

Tabelle 4-28: Vergleich der manuellen Messraster (die angegebene Anzahl an Messpunkten beinhaltet nicht die ausgeklammerten Messpunkte aufgrund von Durchbrand (maximal 10)) [46]

Versuch und PK	Abbrand (außen, 64 Messpunkte) [mm]	Abbrand (innen, 48 Messpunkte) [mm]	Abbrand (Kern, 24 Messpunkte) [mm]
V1 (KVH, Beanspruchungsdauer 124,2 min)			
PK 1	79,37	79,04	75,75
V2 (KVH, Beanspruchungsdauer 124,1 (PK 2.1) und 123,6 min (PK 2.2))			
PK 2.1	76,75	77,49	77,61
PK 2.2	71,69	72,53	70,51
Mittelwert V2	74,22	75,01	74,06
V3 (KVH, Beanspruchungsdauer 117,3 (PK 3.1) und 118,2 min (PK 3.2))			
PK 3.1	77,00	76,30	72,84
PK 3.2	76,28	75,70	74,30
Mittelwert V3	76,64	76,00	73,57
V5.1 (KVH, Beanspruchungsdauer 121,8 min)			
V5.1 (PK 5.1)	72,70	73,00	73,09
V7 (KVH, Beanspruchungsdauer 129,3 min)			
V7 (PK 7)	66,96	69,08	69,15

Nachfolgend sind die die Messergebnisse der Durchbrandzeit (angenommen mit dem 300°C Kriterium) der Thermoelemente hinter der Holzwerkstoffplatte in Tabelle 4-29 dargestellt.

Tabelle 4-29: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Thermoelementmessungen hinter den Holzwerkstoffplatten

Versuch und PK	Mittelwerte der Thermoelementmessung (300 °C Kriterium)	Abbrandrate bezogen auf 300 °C Kriterium und die Dicke der Platte
V4 (Holzwerkstoffplatte, Leipzig)		
PK 4.1	29,4 min	0,65 mm/min
PK 4.1	28,2 min	0,67 mm/min
Mittelwert V4	28,8 min	0,66 mm/min
V6 (Holzwerkstoffplatte, Stuttgart)		
PK 6	34,54 min	0,55 mm/min

5 Auswertung und Interpretation der experimentellen Ergebnisse hinsichtlich der Einflussfaktoren auf den Abbrand

5.1 Ofengeometrie und Maßstabeffekte

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen im Prüfofen nach DIN 4102-8 war eine gezielte Betrachtung des Einflusses von Ofengeometrie und von Maßstabseffekten allein nicht möglich. Somit wurden ergänzend in begleitenden Arbeiten, wie durch Ross [42] (V10, V11 und V12) zugehörige Brandversuche hinsichtlich vorbenannter Einflüsse ausgewertet. Innerhalb dieser Untersuchung wurde u.a. ein Probekörper im 1m²- Ofen (horizontal eingebaut) und ein baugleicher Probekörper im Teil 8- Ofen betrachtet. Innerhalb dieser Vergleichsuntersuchung konnte kein direkter Einfluss der Ofengröße auf das Versuchsergebnis des Abbrandes abgeleitet werden. Durch Rauch [41] wurden Holztafelbauelemente in den unterschiedlichen Ofengrößen an der MFPA in Leipzig miteinander verglichen. Hierbei stellte sich heraus, dass im Vergleich direkt brandbeanspruchter Holzwerkstoffplatten im 1-m- Versuch etwas höhere Abbrandgeschwindigkeiten vorlagen und somit die konservativsten Ergebnisse erzielt wurden. Alle Versuche im Kleinmaßstab (1m-Ofen bzw. Teil 8-Ofen) lieferten konservative Ergebnisse hinsichtlich des Durchbrands der Holzwerkstoffplatte im Vergleich zum 3 x 3m- Wandofen. Dieses Ergebnis gilt allerdings nur dann, wenn der Durchbrand / Abbrand oder der Temperaturdurchgang gemessen wird. Eine Bewertung des Versagens / Abfallens von Schichten oder Teilen, bzw. von mehrschichtigen Aufbauten mit entsprechenden Versagensformen ist im Teil-8- Ofen nicht abschließend möglich, da dieses Verhalten maßgeblich von der Plattengeometrie, Unterstützungsabständen und der Befestigung mitbestimmt wird.

Basierend auf diesen Ergebnissen kann der Abbrand von massivem Holz- oder der Durchbrand / Abbrand von Holzwerkstoffplatten im Kleinmaßstab (1m- Ofen bzw. Teil 8- Ofen nach DIN 4102-8 [3] ermittelt werden.

Einzig wird darauf hingewiesen, dass mit zunehmender Dicke des Prüfkörpers auch die Einflüsse der seitlichen Ränder zunehmen (Abschattungseffekte, Kühlwirkung). Damit Randeffekte keinen Einfluss auf die Messung des Abbrandes nehmen, wird empfohlen die Dicke des Prüfkörpers auf eine Maß zu begrenzen, dass sich aus dem Minimalabstand der Position eingebrachter Thermoelemente zum Ofenrand (Rand des Prüfkörpers) abzüglich 40 mm ergibt.

5.2 Ausrichtung des Probekörpers

Innerhalb der durchgeführten experimentellen Untersuchungen des Vorhabens wurden ausschließlich Versuche im Brandofen nach/in Anlehnung an DIN 4102-8 durchgeführt. Die Messung und Steuerung der Versuche erfolgte nach DIN EN 1363-1 unter ETK-Beanspruchung. Der Einfluss der Ausrichtung des Probekörpers konnte nur in Stuttgart untersucht werden (V5 und V7). Im Vergleich zum

vertikal eingebauten Probekörper (Abbrandtiefe ca. 72 mm) wurde nach ca. 120 Minuten im horizontal eingebauten Massivholzprobekörper eine im Mittel um 4 mm geringere Abbrandtiefe, von ca. 68 mm gemessen. Die der prEN 1995-1-2 [5] zugrundeliegenden Ergebnisse zeigen für Querschnitte, bei denen ein Abfallen von Holzkohleteilen beobachtet wurde, durchweg höhere Abbrandraten von horizontal eingebauten Probekörpern. Resultierend aus den Untersuchungen von V5 und V7 ist davon auszugehen, dass die Streubreite mm der Messergebnisse von 8 (72 mm bis 80 mm Abbrandtiefe (vgl. Tabelle 4-27)) in unterschiedlichen Brandprüföfen die Streubreite zwischen vertikalem und horizontalem Abbrand (4 mm) übersteigt. Somit wäre ein horizontaler oder vertikaler Einbau zur Bestimmung der Abbrandrate möglich, wenn ein Abfallen von Einzelschichten (z.B. Lamellen bei Brettsperholz) ausgeschlossen werden kann.

Hierbei ist anzumerken, dass im Sinn der prEN 1995-1-2 [5] ein Grundwert der Abbrandrate nur für den Werkstoff als Produktkennwert bestimmt wird. Bei geklebten Massivholzprodukten kann die Abbrandtiefe nicht nur durch die Abbrandrate und Zeit, sondern auch durch das Verhalten der Verklebung im Brandfalls beeinflusst werden (bond line integrity). Liegt ein Einfluss der Verklebung vor wird das Abbrandverhalten für solche Produkte nicht als Materialkennwert der Abbrandrate sondern als Systemverhalten im Rahmen eines Abbrandmodells beschrieben.

Zur Bestimmung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen kann für Produkte, bei denen kein Einfluss von Klebefugen zu erwarten ist, damit auch auf den vertikalen Einbau gemäß DIN 4102-8 zurückgegriffen werden.

5.3 Dauer und Art der Brandbeanspruchung

Innerhalb der Untersuchungen wurden Probekörper ausschließlich unter ETK-Beanspruchung untersucht. Alle Versuche mit Massivholzprobekörpern wurden mit einer Beanspruchungsdauer zwischen 90 Minuten und 120 Minuten durchgeführt. Resultierend aus der Restquerschnittsmessung kann somit nur eine lineare, gemittelte Abbrandrate abhängig von der Versuchszeit bestimmt werden. Eine zeitliche Betrachtung der Abbrandrate ist hingegen nur anhand von Messungen mit eingebrachten Thermoelementen möglich. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die zeitabhängige Abbrandrate resultierend aus der Auswertung der eingebrachten Thermoelemente zu Beginn etwas höhere Werte liefert (hier ist noch keine ausreichend dicke Holzkohleschicht ausgebildet) und ab ca. 30 Minuten sich die Abbrandrate, ermittelt aus den Restquerschnittsmessungen nach 90 und 120 Minuten, annähert (Abweichung von der ETK in der Auswertung berücksichtigt).

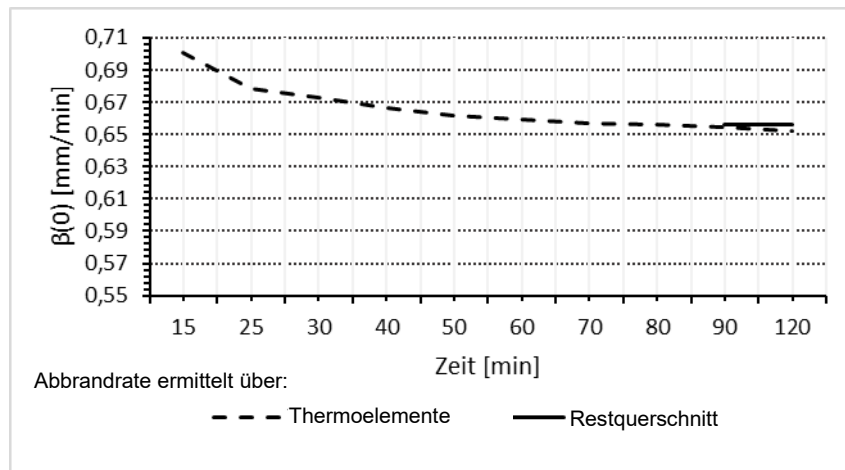


Abbildung 5-1: Zeitabhängigkeit der Abbrandrate, Restquerschnittsmessung bezogen auf die Dauer der Brandbeanspruchung ohne Korrektur

Hiermit wird der bereits in der Literatur [54] dargestellte Zusammenhang zwischen Abbrandrate und Beanspruchungszeit bestätigt. Ab einer Abbrandtiefe von 25 mm entsprechend DIN EN 1995-1-2 [4] kann von einer voll ausgebildeten Holzkohleschicht ausgegangen werden. Das entspricht bei einer Abbrandrate von 0,65 mm/min ca. 38 min Beanspruchungszeit. Entsprechend Abbildung 5-1 zeigt sich, dass ab einer Zeit von ca. 40 Minuten ETK-Beanspruchung von einer nahezu linearen Abbrandrate ausgegangen werden kann, die dann nur noch geringfügig abfällt.

Einen großen Einfluss auf die berechnete Abbrandrate in der Methode mit Restquerschnitt zeigt die zur Auswertung herangezogene Beanspruchungszeit. Durch Zeitkorrekturen infolge von Abweichungen des Beanspruchungsniveaus im Brandversuch zur ETK bzw. durch die zusätzliche Zeit bis zum vollständigen Ablöschen sind verschieden Ansätze hinsichtlich der genutzten Beanspruchungszeit möglich, die zu unterschiedlichen Abbrandraten führen vgl. Tabelle 4-27.

Durch den Mitbrand der Probekörper wurden bei Sauerstoffkonzentrationen zwischen 4% und 10% an der Probekörperoberfläche höhere Temperaturen als im Brandraum gemessen. Somit führt eine Umrechnung auf eine Äquivalente EKT-Beanspruchung zu einer längeren Beanspruchung als die tatsächlich geprüft Zeit. Die Beanspruchung während des Ablöschvorgangs kann nicht quantifiziert werden, einerseits weil zwischen Ende der ETK-Beanspruchung und Beginn des Ablöschens i.d.R. keine Temperaturmessungen im Brandraum, mehr stattfinden und diese Zeit sich i.d.R. mit zunehmender Prüfkörpergröße verlängert. Ebenso nehmen die technischen Randbedingungen der Prüfstelle hierbei einen Einfluss auf die Zeit, ab der nach offiziellem Ende der ETK-Brandbeanspruchung kein Abbrand mehr auftritt.

Aus diesem Grund wird folgender Ansatz zur Bestimmung der Abbrandrate empfohlen:

- Als Zeit zur Bestimmung der Abbrandrate kann die tatsächliche Dauer der ETK-Beanspruchung herangezogen werden (Zeit zwischen Brenner „an“ und Brenner „aus“). Diese Methode führte bei den Brandversuchen mit üblicher Sauerstoffkonzentration (4% bis 10%) innerhalb dieses Vorhabens zu konservativen Ergebnissen und ist die einfachste Methode zur praktischen Anwendung.
- Eine Korrektur und Umrechnung in eine äquivalente Branddauer ist möglich, wenn die Temperaturen zusätzlich direkt an der Probekörperoberfläche gemessen werden bzw. wenn die Temperaturen im Brandraum und der Prüfkörperoberfläche auch noch bis zum vollständigen Ablöschen erfasst werden und dies auf eine zusätzliche Beanspruchungszeit unter ETK-Beanspruchungsniveau ungerechnet wird. Dies führt ggf. zu wirtschaftlicheren Ergebnissen innerhalb der Bestimmungsmethode mit Restquerschnitten.

Bei nicht quantifizierbarer Beanspruchungsdauer und Beanspruchungsniveau während des Ausbaus und des Ablöschvorgangs sollte diese Zeit nicht mitberücksichtigt werden. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig, um diesen Einfluss statistisch in seinem Ausmaß zu quantifizieren. Für die praktische Anwendung in der Ermittlung der Abbrandrate mittels des Restquerschnitts wird daher die Anwendung der ETK-Beanspruchungszeit im Sinne eines konservativen Ansatzes empfohlen. Prüfenden obliegt es damit die Zeit von Ende der Brandbeanspruchung bis zum Ende des Ablöschens so kurz wie möglich zu halten.

Da die Brandbeanspruchungsdauer einen Einfluss auf die Abbrandrate hat, sollte der gesamte spätere Anwendungsbereich, z.B. von 30 min bis 120 min betrachtet werden, um eine realistische mittlere Abbrandrate zu ermitteln. Eine Extrapolation der Abbrandrate über die maximale versuchstechnische Beanspruchungsdauer hinaus ohne Kenntnis des zeitabhängigen Verlaufes wird nicht empfohlen.

Liegt eine hohe Abweichung der Abbrandraten zwischen den unterschiedlichen Beanspruchungsdauern vor, müsste eine zeitabhängige Differenzierung der Abbrandrate vorgenommen werden, was hinsichtlich einer anwendungsbezogenen ingenieurtechnischen Nachweismethode jedoch nicht empfohlen wird. Hier kann der konservativste Wert (größte Wert) als globale Abbrandrate für die geprüften Anwendungsbereiche als praxistaugliche Lösung empfohlen werden.

Die Abweichung für Fichte/Kiefer (entsprechend Abbildung 5-1) liegt unter 10% und kann als geringfügig angesehen werden. Somit kann die Abbrandrate aus einem Versuch mit der maximalen Beanspruchungsdauer abgeleitet werden. Für andere Holzarten oder neue Produkte wird vorerst eine zeitabhängige Betrachtung empfohlen, um den Einfluss der Beanspruchungsdauer auf das spezifische Materialverhalten im Abbrand werten zu können.

5.4 Sauerstoffgehalt im Brandraum

Ergänzend zu den normativen Vorgaben der DIN EN 1363-1 wurde in den Untersuchungen der Sauerstoffgehalt im Brandraum in den Versuchen mitgemessen. Nachfolgend sind die Ergebnisse der mittleren Sauerstoffgehalte im Brandraum für die untersuchten Massivholzprobekörper dargestellt.

Tabelle 5-1: Abbrandrate in Bezug auf die gemessene Sauerstoffkonzentration

Versuch und PK	Gemessene Abbrandrate bezogen auf die Beanspruchungszeit	Sauerstoffkonzentration
V1	0,72 mm/min	8,1 %
V2	0,68 mm/min	7,3 %
V3	0,73 mm/min	9,3 %
V5	0,59 mm/min	0,2 %
V7	0,56 mm/min	0,8 %

Tabelle 5-1 zeigt, dass alle Versuche mit einer höheren Sauerstoffkonzentration im Ofen zu einer höheren Abbrandrate führen. Um die Werte zu quantifizieren sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dennoch zeigt sich hierbei, dass zukünftig bei der Ermittlung der Abbrandrate die Sauerstoffkonzentration im Brandraum mit zu erfassen ist bzw. Grenzwerte vorzugeben sind. Seitens der prEN 1995-1-2 wird hierfür aktuell eine Obergrenze des Sauerstoffgehalts von 10% empfohlen, die während der Prüfung nicht überschritten werden soll. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch ebenso, dass besonders die Definition einer Untergrenze wesentlich für konservative Versuchsergebnisse ist. Seitens der Autoren wird hier zum aktuellen Zeitpunkt in jedem Fall empfohlen, den nach DIN EN 1363-1 gegebenen Mindestwert von 4 % Sauerstoffgehalt in der Ofenatmosphäre auch bei brennbaren Prüfkörpern nicht zu unterschreiten. Zugehörige spezifische Untersuchungen scheitern aktuell an den Fähigkeiten in Prüfinstituten den Sauerstoffgehalt gezielt während des Versuchs beeinflussen zu können. Hinsichtlich dieses Sachverhalts sollte daher zukünftig ergänzend zu den Prüfergebnissen nach DIN EN 1363-1 mindestens eine Erfassung und Dokumentation des Sauerstoffgehalts im Brandraum erfolgen. Ebenso werden weiterführende Untersuchungen empfohlen.

5.5 Messmethoden des Restquerschnittes

Bei den Messmethoden des Restquerschnittes hat sich gezeigt, dass die flächendeckende, kontinuierliche Auswertung (z.B. Oberflächenscan) und die händische Messung zu vergleichbaren Ergebnissen führen können (vgl. Tabelle 4-27 und Tabelle 4-28). Bei einer gleichmäßigen Verteilung der

Messpunkte zur händischen Erfassung des Restquerschnitts am Probekörper konnte nur ein geringer Einfluss des Messraster festgestellt werden (vgl. Tabelle 4-28). Ein großer Einfluss zeigt sich, wenn das Messraster den Randbereich, beeinflusst durch die Ofengeometrie miterfasst. Infolge von Abschattungseffekten am Randbereich der Prüfkörper führt dies zu einer zu geringen Abbrandtiefe (vgl. Tabelle 4-28, V7 außen und Mitte). Aus diesem Grund muss der Bereich des Messrasters entsprechend gewählt werden, um den beeinflussten Randbereich nicht mit zu erfassen (vgl. Abbildung 5-2). Bei den untersuchten Probekörpern war ein Abstand von 50 mm bis zum beanspruchten Rand ausreichend, um den Randeinfluss auszuschließen.



Abbildung 5-2: Randbereiche am Beispiel eines Probekörpers aus der Versuchsreihe von Ross [42]

Resultierend aus den Ergebnissen dieser Versuche hat sich folgendes Messraster als geeignet erwiesen:

- Probekörper ca. 50 cm x 50 cm → Messraster 50 mm (entspricht ca. 10 Messpunkte pro Kante)
- Probekörper ca. 100 cm x 100 cm → Messraster 100 mm (entspricht ca. 10 Messpunkte pro Kante)
- Alle anderen Probekörper: Kantenlänge / 10 ± 1 cm um eine gerade Anzahl der Messpunkte zu erreichen

Im Nachgang kann die minimale Anzahl mittels der Gleichung 3-1 (vgl. Abs. 3.3.2) überprüft werden. Alle angewendeten digitalen Messmethoden liefern eine wesentlich höhere Auflösung und führen zu vergleichbaren Ergebnissen bei gleichem in Bezug genommenen Messbereich.

5.6 Statistische Auswertemethode zur Messung mittels Thermoelemente

Die Auswertemethode hat einen erheblichen Einfluss auf das über Thermoelemente gemessene Ergebnis der Abbrandrate (vgl. Abs. 3.4.3 bzw. Ergebnisse entsprechend Abs. 4.2. Hier hat sich die Methode „lineare Interpolation jeder Messtiefe“ (Methode 3), die auch durch Werther [54] angewandt

wurde, als praktisch geeignetste und robuste Methode gezeigt. Durch den Bezug des Abbrandes bis zur ursprünglichen Probekörperoberfläche führen besonders bei einer automatischen Auswertemethodik Streuungen in der Abbrandtiefe zu einem geringeren Fehler. Ebenso werden in diesem Ansatz Ergebnisse ohne Aussagekraft, wie beispielsweise negative Abbrandraten, die aus dem Erreichen der 300 °C an der Messstelle $i+1$ vor dem Erreichen an der Messstelle i resultieren) ausgeschlossen.

6 Prüfmethode nach prEN 1995-1-2 und Methode basierend auf dem Restquerschnitt

6.1 Beschreibung der Methodik

Eine Methode zur Bestimmung der Abbrandrate basierend auf der Messung mittels Thermoelemente ist im Entwurfsdokument der prEN 1995-1-2 [5], Anhang C, enthalten. Im Wesentlichen hat sich basierend auf den Versuchsergebnissen innerhalb dieses Forschungsvorhabens diese Methode als geeignete Messmethode zur Bestimmung des Abbrandes gezeigt. Die detaillierten Randbedingungen sind im Anhang C der prEN 1995-1-2 [5] dargestellt und werden hier nicht nochmals aufgeführt. Im nachfolgenden Abschnitt werden Optimierungsmöglichkeiten zu dieser Methodik, basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens aufgezeigt und eine weitere geeignete Methode, basierend auf der Bestimmung des Restquerschnittes, in Abs. 6.3 vorgeschlagen.

6.2 Optimierung der Messmethode nach prEN 1995-1-2

Im Gegensatz zur prEN 1995-1-2 [5] kann der Abbrand auch innerhalb eines kleineren Brandprüfofens gemäß DIN 4102-8 [3], vertikal oder horizontal eingebaut, ermittelt werden. Da der Sauerstoffgehalt einen Einfluss auf das Abbrandverhalten zeigt, sollte dieser während des Versuches dokumentiert werden. Der Maximalgehalt von 10% entsprechend prEN 1995-1-2, Abs. C.4(2) wurde in allen Versuchen dieser Untersuchung eingehalten. Da sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen zu geringeren Abbrandraten führen, ist neben der bereits vorbenannten Dokumentation ebenso die Festlegung eines Mindestwertes sinnvoll. Hier sollte der Mindestwert der Sauerstoffkonzentration in der Ofenatmosphäre von 4% auch auf brennbare Baustoffe angewendet werden. Zur Bestimmung eines abschließenden Grenzwertes sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die ebenso die aktuellen prüftechnischen Fähigkeiten der Prüfinstitute miteinschließen. Zum aktuellen Zeitpunkt wird empfohlen, den im Brandraum während der Versuche vorliegenden Sauerstoffgehalt zu dokumentieren, um auf Basis zukünftiger weiterführender Untersuchungen eine weitere rechnerische Anpassung vornehmen zu können.

Entsprechend Figure C.3 der prEN 1995-1-2 [5] werden die Thermoelemente kaskadenförmig mit einem Horizontalabstand von mindestens 20 mm angeordnet. Es hat sich gezeigt, dass durch die dadurch große horizontale Ausdehnung bei einem gleichzeitig ungleichmäßigen Abbrand des Probekörpers, verfälschte Ergebnisse der Abbrandrate auftreten können. Fehlstellen im Holz können dazu führen, dass 300 °C an der Messstelle i+1 vor der Messstelle i erreicht werden und dies zu einer negativen Abbrandrate beim zugehörigen Auswerteverfahren führt. Somit wird empfohlen, die horizontale Ausdehnung innerhalb einer Messreihe zwischen 10 mm und 20 mm zu begrenzen.

Anstelle die Abbrandraten zwischen den einzelnen Messstellen zu interpolieren, hat sich die Methode 3, die Abbrandraten zwischen der beanspruchten Ausgangsoberfläche und der Messstelle zu interpolieren als robuster herausgestellt (vgl. Abs. 3.4.3). Negative oder sehr kleine Abbrandraten aus Fehlmessungen zwischen zwei Inkrementen werden hierdurch ausgeschlossen.

6.3 Bestimmung des Abbrandes über den Restquerschnitt

Eine Möglichkeit, den Abbrand über den Restquerschnitt zu bestimmen ist bisher in der prEN 1995-1-2 nicht enthalten. Diese Methode wird bereits seit vielen Jahren in der Forschung und Praxis eingesetzt und bietet eine zuverlässige Möglichkeit, die Abbrandrate für eine diskrete Messtiefe und Beanspruchungsdauer zu bestimmen. Basierend auf den Ergebnissen entsprechend Abs. 5 ergeben sich folgende Randbedingungen bei der Bestimmung der Abbrandrate über den Restquerschnitt:

- Es sollten mindestens zwei Probekörper mit der minimalen und maximal angestrebten Klassifikationszeit betrachtet werden.
- Probekörperabmessungen analog zu prEN 1995-1-2 [5] ($> 450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$)
- Restquerschnitt nach dem Versuch sollte eine Mindestdicke von 19 mm aufweisen, da Abbrand und Durchbrand voneinander zu differenzieren sind. (in Anlehnung an die Separating Function Method nach prEN 1995-1-2 [5])
- Die Zeiten zum Ausbau des Prüfkörpers aus dem Prüfofen und die Ablöschzeiten sind zu dokumentieren und möglichst zu minimieren.
- Während des Ablöschens mit Wasser oder unmittelbar danach ist die Kohleschicht mit einer Spachtel und Stahl- bzw. Messingbürste vollständig zu entfernen.
- Der Restquerschnitt ist im Bereich (ohne Randeinfluss) des Probekörpers zu bestimmen (Abstand $\geq 50 \text{ mm}$ bis zum beanspruchten Rand).
- Das Messraster ist bei Probekörpergrößen bis $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ mit einem maximalen Abstand von Kantenlänge / $10 \pm 1 \text{ cm}$, um eine gerade Anzahl zu erreichen, zu platzieren.
- Das Messraster kann linear auf einzelne Lamellen / Schnitte oder lineare Bauteile übertragen werden.
- Anstelle der händischen Messung kann der Probekörper auch über 3-D Messverfahren (Photogrammetrie / LiDar oder Laserscan) vermessen werden, vorausgesetzt die Messgenauigkeit (Auflösung) liegt über der händischen Messung (mind. Faktor 10 wird empfohlen).
- Zur Bestimmung des Restquerschnittes kann die feuerabgewandte Seite des Probekörpers als gedachte Ebene / Linie angenommen werden. Bei unebenen Oberflächen (feuerabgewandt) ist diese Ebene / Linie zwischen den Eckpunkten und mindestens einem Mittelpunkt jeder Kante zu mitteln.

- Die Abbrandtiefe ist über alle Messpunkte zu mitteln. Die Abbrandrate resultiert aus dem Quotienten aus dem Wert des Abbrandes und der Prüfzeit.
- Ablöschzeiten sind für die Abbrandrate nicht mit zu berücksichtigen, aber zu dokumentieren.
- Bei mehreren Messungen mit unterschiedlichen Beanspruchungszeiten und unterschiedlichen Abbrandraten, ist eine zeitabhängige Abbrandrate anzugeben. Alternativ kann der Maximalwert angegeben werden, was für die ingenieurtechnische Anwendung empfohlen wird.

7 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde basierend auf einer umfangreichen Literaturlauswertung entsprechend Abs. 2 und 3 sowie dem Entwurfsdokument der prEN 1995-1-2 [5] eine experimentelle Serie von Kleinbrandversuchen durchgeführt, um Einflussfaktoren auf die Abbrandrate β_0 sowie Einflussfaktoren auf die Methodik zur Bestimmung der Abbrandrate zu untersuchen. Die Abbrandrate ist ein Schlüsselparameter zur Brandschutzbemessung von Holzbauteilen und Holzkonstruktionen. Hierfür wurden ein Brandversuche im Kleinmaßstab (ca. 1,2 x 1,4 m) und elf Kleinbrandversuche in Brandprüföfen nach DIN 4102-8 [3] und den Randbedingungen der DIN EN 1363-1 [7] (ETK, Ofendruck, Ofensteuerung) an unterschiedlichen Brandprüfstellen innerhalb von Deutschland durchgeführt und ausgewertet. Das in der prEN 1995-1-2, Anhang C [5], enthaltene Verfahren zur Bestimmung der Abbrandrate mittelst eingebohrter Thermoelemente und einer Abbrandgrenze, definiert über die 300°C Isotherme konnte bestätigt werden. Ein modifizierter Ansatz zur Berücksichtigung eines Mindestsauerstoffgehaltes sowie eine alternative Methode der statistischen Auswertung erhöhen die Robustheit des Verfahrens und sind in Abs. 6.2 genauer beschrieben. Neben dem Verfahren zur Bestimmung der Abbrandrate basierend auf Thermoelementen wurde die Messmethodik basierend auf dem Restquerschnitt untersucht. Hier wurde die These, dass die Abbrandrate mit zunehmender Beanspruchungsdauer abnimmt und der Sauerstoffgehalt im Brandraum die Abbrandtiefe beeinflusst bestätigt. Ebenso wurden Vorschläge zum Ablöschen, Entfernen der Holzkohle und zur Messmethodik des Restquerschnittes erarbeitet. Es hat sich gezeigt, dass händischen Messverfahren sowie digitale Messmethoden basierend auf Photogrammetrie / LiDar oder Laserscan vergleichbare Ergebnisse für den Restquerschnitt liefern. Basierend auf dem Restquerschnitt ist es möglich den Abbrand und die Abbrandrate für diskrete Beanspruchungsdauern zu bestimmen. Hierfür liefert die tatsächliche Prüfzeit ohne Berücksichtigung der Ablöschzeit konservative Ergebnisse der Abbrandrate. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde in Abs. 6.3 eine Systematik vorgeschlagen, um ergänzend zur Methode über eingebohrte Thermoelemente die Abbrandrate basierend auf dem Restquerschnitt zu ermitteln.

8 Ausblick

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens konnte gezeigt werden, dass die Abbrandrate unter den erarbeiteten Randbedingungen basierend auf der Methode über den Restquerschnitt sowie mittels Thermoelemente bestimmt werden kann. Um den Einfluss des Sauerstoffgehaltes genauer zu ermitteln und einen Mindestwert zu quantifizieren, sollte eine weitere Versuchsreihe durchgeführt werden. Ebenso würde eine Vergleichsuntersuchung unterschiedlicher Probekörper der gleichen Holzcharge, geprüft im Wand- und Deckenofen entsprechend DIN EN 1363-1 [7] im Vergleich zu einer Prüfung im 1m- Ofen und einem Versuch im Teil 8-Ofen in Anlehnung an DIN 1402-8 [3], jeweils horizontal und vertikal eingebaut, einen Vergleich der unterschiedlichen Prüfsituationen ermöglichen und somit als weitere Belegversuchsreihe zur Anwendung der kleinmaßstäblichen Versuche dienen.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Darstellung der Abbrandgrenze [54]	9
Abbildung 2-2: Temperaturprofil hinter der Abbrandgrenze in Anlehnung nach einer Brandbeanspruchung von 30 Minuten unter der Annahme einer Abbrandgrenze bei 300 °C (Modifikation der Gleichung von Scheer [8] auf Basis von prEN1995-1-2 [5]).	10
Abbildung 2-3: Einflussfaktoren auf die Abbrandgeschwindigkeit nach Lache [31]. Externe, vom Holz unabhängige Einflussfaktoren sind rot umrandet.	11
Abbildung 3-1: Kleinbrandprüfstand der HFM	13
Abbildung 3-2: 3 x 3 m Wandprüfstand der HFM	13
Abbildung 3-3: Prüfkörpervariante mit Thermoelementen, im Messbereich parallel zur Isotherme geführt (während der Produktion eingelegt)	18
Abbildung 3-4: Verfahren zur Bestimmung des Abbrandes (in Anlehnung an Wörle 2019 [58])	21
Abbildung 3-5: Händisches Entfernen der Holzkohle nach dem Brandversuch mittels einer Drahtbürste.	21
Abbildung 3-6: Brennende Holzoberfläche nach dem Brandversuch.	22
Abbildung 3-7: mit Wasser abgelöschter Probekörper nach dem Brandversuche – Oberfläche der Holzkohle.	22
Abbildung 3-8: Mit Spachtel und Drahtbürste bis zur Abbrandgrenze entfernte Holzkohle.	22
Abbildung 3-9: Messung der Abbrandtiefe und daraus resultierend des Restquerschnittes an einem Punkt nach dem Ende des Versuchs mit einer Schublehre [46].	22
Abbildung 3-10: Messung des Restquerschnittes über eingesetzte Abbrandkörper [26]	23
Abbildung 3-11: Messung der Abbrandtiefe mit einer Keramiklanze [33]	25
Abbildung 3-12: Keramiklanzen und Probekörper im Brandprüfstand [Quelle Holzforschung München]	25

Abbildung 3-13: Unterschiedliche Arten von Thermoelementen [41] linke Seite: Mantelthermoelement mit unterschiedlichen Spitzenausbildungen rechte Seite: Thermodrähte mit unterschiedlichen Spitzenausbildungen.....	25
Abbildung 3-14: TE-Installationen in Prüfkörpern aus Balken (links) oder CLT (rechts); 1: isothermen-parallel in kurzen Bohrlöchern; 2 und 3: senkrecht zu den Isothermen in Bohrlöchern; 4: isothermen-parallel zwischen Brettlagen eingelegt.....	26
Abbildung 3-15: Einbau von horizontal, parallel zur Isotherme eingeführten TE in unterschiedlichen Tiefen und Herausführen zur Rückseite des Probekörpers (links). Einbau von Thermoelementen zwischen zwei Holzwerkstoffplatten und damit parallel zur erwarteten Isotherme (rechts). ...	26
Abbildung 3-16: Aufnahme des Probekörpers mittels einer Kamera in Schmid et al.[47].....	30
Abbildung 3-17: Probekörper und verschiedene Aufnahmepositionen nach [21].....	30
Abbildung 3-18: Ergebnis eines 3-D-Scans mittels LIDAR und der App Polycam	30
Abbildung 3-19: Definition der Messbereiche für die händische Messung [46].....	32
Abbildung 3-20: Messraster aus der Photogrammetrie, ausgewertet mit der Software CloudCompare [46].....	32
Abbildung 3-21: reale thermische Beanspruchung des PK anhand von Messwerten [46].	34
Abbildung 3-22: Entstehende Abweichung durch die Temperaturdifferenz [46].....	35
Abbildung 3-23: Thermoelemente zur Bestimmung der Abbrandrate entsprechend prEN 1995-1-2 [5].....	37
Abbildung 3-24: Beispieldarstellung des Probekörpers PK 1 (vgl. Abs. 4) zweier Messtationen mit vergleichbaren Zeiten bis zum Erreichen des 300°C Kriteriums in unterschiedlichen Tiefen [46]	39
Abbildung 3-25: Zusammenstellung der Abbrandraten für Fichte; rote Raute - Mittelwert	52
Abbildung 3-26: Zusammenstellung der Abbrandraten für Kiefer; rote Raute - Mittelwert (inkl. Southern Pines)	53

Abbildung 3-27: Zusammenstellung der Abbrandraten für Buche (inkl. Weiß- und Rotbuche); rote Raute - Mittelwert	53
Abbildung 3-28: Zusammenstellung der Abbrandraten für Eiche (inkl. Rot- und Weißeiche); rote Raute - Mittelwerte [46]	54
Abbildung 3-29: Zusammenstellung der Abbrandraten von Spanplatten; rote Raute - Mittelwert	55
Abbildung 3-30: Zusammenstellung der Abbrandraten von OSB; rote Raute - Mittelwert	55
Abbildung 4-1: Einbau des Probekörpers im Falz des Prüfofens, somit zurückgesetzt im Vergleich zur Ofeninnenwand.....	60
Abbildung 4-2: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MFPA Leipzig.....	61
Abbildung 4-3: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MPA Stuttgart	61
Abbildung 4-4: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an TU in Kaiserslautern	61
Abbildung 4-5: Massivholzprobekörper, verklebt mit zwei instrumentierten Lamellen	62
Abbildung 4-6: Massivholzprobekörper, verklebt mit zwei instrumentierten Lamellen	62
Abbildung 4-7: Systematische Darstellung der instrumentierten Lamelle, Horizontalabstand der Messpunkte: 20 mm, Vertikalabstand 6 mm.....	62
Abbildung 4-8: Systematische Darstellung der instrumentierten Lamelle, eingebohrte Probekörper	62
Abbildung 4-9: Probekörper Spanplatte, 19 mm dick, hinterlegt im zwei 19 mm dicken Spanplatten und 5 Messpunkten über die Fläche verteilt.	63
Abbildung 4-10: Probekörper Spanplatte, 19 mm dick, hinterlegt im zwei 19 mm dicken Spanplatten. Thermoelemente in den Zwischenlagen	63
Abbildung 4-11: Probekörper stirnseitig beanspruchtes Brettsperrholz – Ansicht mit zwei instrumentierten Balken (V10 und V11)	63
Abbildung 4-12: Probekörper stirnseitig beanspruchtes Brettsperrholz – Ansicht feuerabgewandt mit zwei instrumentierten Balken (V10 und V11)	63

Abbildung 4-13: Anordnung der Thermoelemente im Probekörper - Winkel von 60 °.....	64
Abbildung 4-14: Einbau der Thermoelemente.....	64
Abbildung 4-15: Gasanalysegerät Testo 350	65
Abbildung 4-16: Messlanze für die Gasanalyse, Ansaugöffnung angeordnet in der Ebene des Thermoelementes zur Ofensteuerung, ca. 100 mm vor dem Probekörper (Beispiel Stuttgart)	65
Abbildung 4-17: Vergleich der Messergebnisse (SICK der MFPA Leipzig) zur Validierung der Gasmessung mit dem TESTO 350 (Testo)	65
Abbildung 4-18: Temperaturen im Brandraum, gemessen mittels MT	68
Abbildung 4-19: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messung.....	69
Abbildung 4-20: RQ von PK 1 (Draufsicht).....	70
Abbildung 4-21: RQ von PK 1 als 3D-Modell	70
Abbildung 4-22: Gaskonzentration im Brandraum während V1 (gemessen durch SICK SIDOR und Testo 350).....	71
Abbildung 4-23: Position der Gasmesssonden (rote Markierung) während V1	72
Abbildung 4-24: Temperaturen im Brandraum, gemessen mittels MT	75
Abbildung 4-25: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 2.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messung.....	76
Abbildung 4-26: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 2.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen.....	76
Abbildung 4-27: RQ von PK 2.1	77
Abbildung 4-28: 3D-Modell von PK 2.1	77
Abbildung 4-29: RQ von PK 2.2.....	77

Abbildung 4-30: 3D-Modell von PK 2.2	77
Abbildung 4-31: Temperaturen im Brandraum während V3	82
Abbildung 4-32: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 3.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen	83
Abbildung 4-33: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 3.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen	84
Abbildung 4-34: RQ von PK 3.1	85
Abbildung 4-35: 3D-Modell von PK 3.1	85
Abbildung 4-36: RQ von PK 3.2	85
Abbildung 4-37: 3D-Modell von PK 3.2	85
Abbildung 4-38: Gaskonzentration im Brandraum während V3	88
Abbildung 4-39: Position der Gasmesssonde bei V3 (orange markierter Kreis)	88
Abbildung 4-40: Temperaturen im Brandraum während V4	91
Abbildung 4-41: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 4.1 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus)	93
Abbildung 4-42: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 4.2 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus)	93
Abbildung 4-43: Gaskonzentration im Brandraum während V4	95
Abbildung 4-44: Anordnung der TE (vor, neben und hinter PL) im Brandraum (Stahlrohr neben PL: Gasmesssonde des Testo 350; MT hinter PL nicht sichtbar)	96
Abbildung 4-45: Anordnung der PL und MT während V7 (rote Markierungen: MT neben PL 1 und 2)	97
Abbildung 4-46: Temperaturen im Brandraum während V5	99

Abbildung 4-47: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 5 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen.....	100
Abbildung 4-48: RQ von PK 5.....	101
Abbildung 4-49: 3D-Modell von PK 5	101
Abbildung 4-50: Gaskonzentration im Brandraum während V5.1	103
Abbildung 4-51: Temperaturen im Brandraum während V6.....	105
Abbildung 4-52: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 6 (Messebene 1 (5 TE) in 19 mm, Messebene 2 (1 TE) in 38 mm Tiefe); Erreichen der 300°C am PK 2,11 min nach Versuchsbeginn	106
Abbildung 4-53: Gaskonzentration im Brandraum während V6 (gemessen durch Testo 350).....	107
Abbildung 4-54: Horizontaler Einbau von PK 7 (Brenner auf der linken, Abzug auf der rechten Seite)	108
Abbildung 4-55: Temperaturen im Brandraum während V7	109
Abbildung 4-56: Verlauf des Abbrandes (aus 300°C-Isotherme) in PK 7 (interne TE alle 6 mm von der brandbeanspruchten Prüfkörperoberfläche aus) und RQ-Messungen.....	110
Abbildung 4-57: RQ von PK 7.....	111
Abbildung 4-58: 3D-Modell von PK 7	111
Abbildung 4-59: Gaskonzentration im Brandraum während V7 (gemessen durch Testo 350).....	112
Abbildung 5-1: Zeitabhängigkeit der Abbrandrate, Restquerschnittsmessung bezogen auf die Dauer der Brandbeanspruchung ohne Korrektur	117
Abbildung 5-2: Randbereiche am Beispiel eines Probekörpers aus der Versuchsreihe von Ross [42]	120

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Darstellung des Einflusses der unterschiedlichen Annahmen für die Beanspruchungszeiten mit Bezug auf die ETK am Beispiel von Versuch V1 entsprechend Abs. 4 [46].....	36
Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Methode "Messung mit Sonden"	40
Tabelle 3-3: Bewertung des Verfahrens "Messung mit Sonden"	41
Tabelle 3-4: Zusammenstellung der Methode "Messung mit TE"	42
Tabelle 3-5: Bewertung der Methode "Messung mit TE"	43
Tabelle 3-6: Zusammenstellung der Methode "Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter"	44
Tabelle 3-7: Bewertung des Verfahrens "Messung des Sauerstoffverbrauchs im Kegelkalorimeter"	45
Tabelle 3-8: Zusammenstellung des Verfahrens "Messung des Masseverlusts"	45
Tabelle 3-9: Bewertung der Methode "Messung des Masseverlusts"	46
Tabelle 3-10: Zusammenstellung des Verfahrens "Messung des RQ (manuell)	47
Tabelle 3-11: Bewertung der Methode "Messung des RQ (manuell)"	49
Tabelle 3-12: Zusammenstellung des Verfahrens „Messung des RQ (digital)	50
Tabelle 3-13: Bewertung der Methode "Messung des RQ (digital)"	51
Tabelle 4-1: Versuchskonzept mit geplanter Beanspruchungsdauer, V1 bis V11 im Brandprüfofen nach DIN 4102-8 [3], V12 im 1-m Maßstab und horizontaler Ausrichtung.....	57
Tabelle 4-2: Einflussfaktoren der Abbrandrate in den Versuchen V1 bis V12, fett dargestellte Parameter wurden innerhalb dieser Untersuchung variiert.	59
Tabelle 4-3: Unterschiedliche „Teil-8“ – Brandprüfeinrichtungen.....	61

Tabelle 4-4: Darstellung der Probekörper (V1 bis V 9).....	62
Tabelle 4-5: Teil-8 Probekörper aus der Untersuchung von stirnseitig beanspruchtem Brettsper Holz	63
Tabelle 4-6: Übersicht V1 (PK 1)	66
Tabelle 4-7: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden.....	71
Tabelle 4-8: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und für PK 1	73
Tabelle 4-9: Übersicht V2 (PK 2.1 und PK 2.2).....	74
Tabelle 4-10: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V2	79
Tabelle 4-11: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ- Messungen für V2.....	80
Tabelle 4-12: Übersicht V3 (PK 3.1 und PK 3.2).....	80
Tabelle 4-13: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V3	86
Tabelle 4-14: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ- Messungen für V3.....	89
Tabelle 4-15: Übersicht V4 (PK 4.1 und PK 4.2).....	90
Tabelle 4-16: Zeit bis Erreichen der 300°C der TE in Messebene 1 während V4.....	94
Tabelle 4-17: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (2 Rechenmodelle) für V4.....	94
Tabelle 4-18: Übersicht V5.1 (PK 5.1)	98
Tabelle 4-19: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V5.1	102
Tabelle 4-20: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ- Messungen für V5.1	103
Tabelle 4-21: Übersicht V6 (PK 6)	104

Tabelle 4-22: Zeit bis Erreichen der 300 °C der TE in Messebene 1 von PK 6	106
Tabelle 4-23: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (2 Rechenmodelle)	106
Tabelle 4-24: Übersicht V7 (PK 7)	108
Tabelle 4-25: Vergleich des Abbrands verschiedener Messmethoden für V7	111
Tabelle 4-26: Abbrandraten aus den Temperaturmessungen (3 Rechenmodelle) und RQ-Messungen für V7	112
Tabelle 4-27: Zusammenfassung der Ergebnisse für Massivholzquerschnitte	113
Tabelle 4-28: Vergleich der manuellen Messraster (die angegebene Anzahl an Messpunkten beinhaltet nicht die ausgeklammerten Messpunkte aufgrund von Durchbrand (maximal 10))	114
Tabelle 4-29: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Thermoelementmessungen hinter den Holzwerkstoffplatten	114
Tabelle 5-1: Abbrandrate in Bezug auf die gemessene Sauerstoffkonzentration	119

11 Literaturverzeichnis

- [1] CEN/TC 250/SC 5/WG 4 N 109, Letter EOTA Morfini 2019-02-01
- [2] DIN 4102-4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Beuth Verlag, 2016-05.
- [3] DIN 4102-8: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Beuth Verlag, 2016-05.
- [4] DIN EN 1995-1-2: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Beuth Verlag, 2010-12.
- [5] prEN 1995-1-2: Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-2: Structural fire design; Final Draft, for Formal Enquiry_v20_5.8.2022, 2022-08.
- [6] DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Beuth Verlag, 1977-09.
- [7] DIN EN 1363-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung EN 1363-1:2012, Beuth Verlag, 2012-10.
- [8] DIN EN 1364-1: Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile - Teil 1: Wände; Deutsche Fassung EN 1364-1:2015-09, Beuth Verlag, 2015-09.
- [9] DIN EN 13381-7: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile; Beuth Verlag, 2019-09.
- [10] [Australia New Zealand Standards: AS/NZS 1720.4 - Timber Structures, Part 4 - Fire Resistance of timber elements. Council of Standards Australia, 2019.
- [11] EAD 130308-00-0304 (2018): Structural Composite Lumber Product: Laminated Strand Lumber (LSL)
- [12] Ehrlenspiel, R. (1995): Nr. 954 136. Brandverhalten von 'Delignit BFU Bu 100'. im Auftrag der Firma Blomberger. Unter Mitarbeit von R. Ehrlenspiel. Hg. v. Holzforschung München. Holzforschung München. München.
- [13] Ehrlenspiel, R. (1998): Bericht Nr. 944 080. Abbrandverhalten Von Holzarten Und Holzwerkstoffen. im Auftrag der Firma Schörghuber. Unter Mitarbeit von R. Ehrlenspiel. Hg. v. Holzforschung München. Holzforschung München. München.
- [14] Ehrlenspiel, R. (1998): Bericht Nr. 954 054. Abbrandverhalten Von Holzarten Und Holzwerkstoffen. im Auftrag der Firma Schörghuber. Unter Mitarbeit von R. Ehrlenspiel. Hg. v. Holzforschung München. Holzforschung München. München.
- [15] Ehrlenspiel, R., & Hoch, A. (1998): Abbrandverhalten verschiedener Holzarten und Holzwerkstoffe. TU München, Institut für Holzforschung.
- [16] Ehrlenspiel, R. (2016): Historie der Abbrandmessung von Holz und Holzwerkstoffen bei HFM-TUM. Abschlussbericht. In Bauforschung, Band T 33389, Verlag Fraunhofer irb.

- [17] Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Werther, N. (2020): *TIMPuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau*. In: *Bautechnik* 97 (S2).
- [18] Fahrni, R.; Klippel, M.; Just, A.; Ollino, A.; Frangi, A. (2017): *Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties*. In: *Fire Safety Journal* 107, S. 1–9. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.11.003.
- [19] Fahrni, R.; Schmid, J.; Klippel, M.; Frangi, A. (2018): *Correct temperature measurement in fire exposed wood*, World Conference on Timber Engineering, Seoul, Korea, WCTE 2018.
- [20] Fahrni, R.; Schmid, J.; Klippel, M.; Frangi, A. (2018): *Investigation of Different Temperature Measurement Designs and Installations in Timber Members as low conductive material*. In: A. Nadjai, Faris, A. Franssen, J-M. und O. Vassart (Hg.): *10th international conference of structures in fire. Structures in Fire SiF' 2018. Structures in Fire. Belfast, 06.06.2018-08.06.2018. Ulster University*, S. 257–264.
- [21] Fahrni, R.; Frangi, A. (2021): *Model scale standard fire experiments on solid timber panels – Charring and mass loss investigation to determine the variability of the charring rate*.
- [22] Fischer, N.; Treml, S. (2012): *Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Rohdichte, der Spangröße und der Ausrichtung der Späne*. In: *Eur. J. Wood Prod.* 70 (1-2). DOI: 10.1007/s00107-011-0565-8.
- [23] Fornather J. H. (2003): *Brandverhalten von Holz unter besonderer Berücksichtigung stiftförmiger Verbindungsmittel – experimentelle und numerische Untersuchungen*. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien.
- [24] Goth, L. (2021): *Experimentelle und numerische Untersuchung zu Abbrandraten von Holzwerkstoffplatten*. Master's Thesis. TUM, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- [25] Huggett, C. (1980): *Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements*. In: *Fire and Materials* 4 (2), S. 61–65.
- [26] Huntierová, Z. (1995): *Analyse des Brandverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Feuerschutzmitteln*. Dissertation, LMU München.
- [27] Just, A.; Schmid, J.; Werther, N.; Frangi, A. (2014): *Fire protection of timber members – Determination of the fire protection system characteristics*, Proceedings, 8th International Conference on Structures in Fire SiF2014, Shanghai, China.
- [28] Klippel, M.; Schmid, J.; Fahrni, R.; Kleinhenz, M.; Frangi, A. (2019): *Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettsperrholz im Brandfall*. In: *Bautechnik* 96 (11), S. 824–831. DOI:10.1002/bate.201900019.
- [29] König, J.; Walleij, L. (1999): *One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and post-protection situations*. Rapport I 9908029. Trätekt. Stockholm.
- [30] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C. (1983): *Holz-Brandschutz-Handbuch*, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., München.

- [31] Lache, M. (1992): *Untersuchungen zur Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz und zur Feuerwiderstandsdauer biegebeanspruchter Brettschichtholzträger*, Dissertation, Ludwig Maximilian Universität München.
- [32] Lache, M. (1992): *Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffen*. AIF-Forschungsvorhaben 7796 und 8744. Hg. v. Institut für Holzforschung. München.
- [33] Lingens, A. (2003): *Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau*. Dissertation. TU München, Fakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement.
- [34] Martinka, J.; Rantuch, P.; Liner, M. (2018): *Calculation of charring rate and char depth of spruce and pine wood from mass loss*. In: *J Therm Anal Calorim* 132 (2), S. 1105–1113. DOI: 10.1007/s10973-018-7039-8.
- [35] Mikkola, Esko (1990): *Charring of Wood*. Research reports 689. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- [36] Njankouo, J.M.; Dotreppe, J.-C; Franssen, J.-M. (2004): *Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods*. In: *Fire and Materials* (28).
- [37] Pandtle, K. (2015): *Evaluation of differences between the determination of the charring rates following the DIN and EN standard using comparable experimental setups*. Proceedings of the 1st European Workshop "Fire Safety of Green Buildings" COST FP 1404, Berlin.
- [38] Parker, W. J.: *An investigation of the fire environment in the ASTM E 84 tunnel test*.
- [39] Parker, W. J. (1992): *Wood materials. Prediction of the heat release from basic measurements*. In: Vytenis Babrauskas und R. B. Williamson (Hg.): *Heat Release in Fires*. London: Elsevier Applied Science, S. 333–356.
- [40] Pope, I.; Hidalgo, J. P.; Torero, José L.: *A correction method for thermal disturbances induced by thermocouples in a low-conductivity charring material*. In: *Fire Safety Journal*. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103077.
- [41] Rauch, M. (2022): *Beurteilung der raumabschließenden Funktion brandbeanspruchter Holzbauteile mittels einer „Component Additive Method“*, Dissertation, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
- [42] Ross, W. (2022): *Untersuchung der Abbrandraten von stirnseitig beanspruchtem Brettsperrholz*, Bachelorthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
- [43] Schaffer, L. (1967): *Charring rate of selected woods – Transverse to grain*, Forest Service Research Paper FPL 69, Forest Product Laboratory, Madison, USA.
- [44] Scheer, C., Knauf, T. Meyer-Ottens, C. (1992): *Rechnerische Brandschutzbemessung unbedeckter Holzbauteile – Grundlage für DIN 4102 Teil 4 (Entwurf)*, Sonderdruck Bautechnik 69, Heft 4, Informationsdienst Holz.
- [45] Schleifer, V.; Frangi, A.; Fontana, M. (2007): *Experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Plattenelementen*. Hg. v. ETH Zürich. Institut für Baustatik und Konstruktion. Zürich.

- [46] Schleimer, T. (2023): *Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der eindimensionalen Abbrandrate*, Masterarbeit, TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- [47] Schmid, J.; Klippel, M.; Viertel, M.; Presl, R.; Fahrni, R.; Totaro, A.; Frangi, A.: *Charring of timber. Determination of the residual cross section and charring rates*. WCTE 2020.
- [48] Schmid, Joachim (2020): *Natural Fire Exposure of Structural Timber-Contribution to Determine the In-fluence in the Fully Developed and the Decay Phase*. ETH Zurich.
- [49] Schröck, M. (2010): *Einfluss von Brandschutzlacken auf das Abbrandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen*. Bachelorarbeit. TUM, München. Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik.
- [50] Terrei, L.; Acem, Z.; Marchetti, V.; Lardet, P.; Boulet, P.; Parent, G. (2021): *In-depth wood temperature measurement using embedded thin wire thermocouples in cone calorimeter tests*. In: *International Journal of Thermal Sciences* (162). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106686.
- [51] Tran, Hao C.; White, Robert H. (1992): *Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter*. In: *Fire and Materials* (16), S. 197–206.
- [52] Tsantaridis, L.; Östman, B. (1998): *Charring of Protected Wood Studs*. In: *Fire and Materials* (22), S. 55–60.
- [53] Tsantaridis, L. (2003): *Reaction to fire performance of wood and other building products. Cone Calorimeter results and analysis*. Dissertation. Königliche Technische Hochschule, Stockholm. Department of Civil and Architectural Engineering.
- [54] Werther, N. (2016): *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren*, Dissertation, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
- [55] Werther, N.; Matthäus, C.; Kammerer, E. (2017): *Temperature deviation resulting from different measurement setups in fire exposed timber elements*, Technical University of Munich, Chair of Timber structures and Building Construction, project report.
- [56] White, R. H.; Tran, H. C. (2000): *Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure*. In: *Fire Technology* 28 (1).
- [57] White, R. H.; Tran, H. C. (1996): *Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Heat Flux*. *Wood & Fire Safety; 3rd International Scientific Conference*. Slowakei.
- [58] Wörle, V. (2019): *Ganzheitliche Betrachtung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen*, Masterarbeit, TU München, Holzforschung München – Professur für Holztechnologie.
- [59] CEN/TC 250/SC 5/WG 4 N 109, Letter EOTA Morfini 2019-02-01
- [60] Zellner, J. (2011): *Zerstörungsfreie Messverfahren zur Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen*. Masterarbeit, TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion sowie Holzforschung München – Lehrstuhl für Holzwissenschaft, 2011