

# **Verbesserung des Brandschutzes im konstruktiven Holzbau**

**Masterarbeit**

Holztechnologie und Management

Eingereicht von

**David Obernosterer, B.Sc.**

Mat.Nr.: 1240491

In Zusammenarbeit mit

**Dipl.-Ing. Georg Jeitler**

Haslacher Norica Timber

Betreuer:

**Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth**

**Dipl.-Ing. Dr. Erik van Herwijnen**

Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe  
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik  
Universität für Bodenkultur – Wien

Januar 2018



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth für sein Interesse an diesem Thema und für seine ausgezeichnete Betreuung und fachliche Unterstützung.

Ebenso danke ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. Erik van Herwijnen für seine Bereitschaft, sein exzellentes Fachwissen in diese Arbeit einzubringen.

Ein großes Dankeschön möchte ich der gesamten HASSLACHER Gruppe, insbesondere aber meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing Georg Jeitler für die langjährige gute Zusammenarbeit und die Unterstützung der gemeinsamen Projekte aussprechen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe an der Universität für Bodenkultur in Tulln sowie den Mitarbeitern der Fa. Wood K Plus in Tulln, die mir während meiner Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Familie und allen voran meinen Eltern, die mich immer unterstützen und ohne die das Studium und vieles andere nicht möglich gewesen wäre.



## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Möglichkeiten der Verbesserung des Brandschutzes im Holzbau. Da bestehende Systeme entweder mit einem ressourcenintensiven Verbrauch von Holz einhergehen oder die Holzoberfläche unter Beschichtungen verstecken, soll es Ziel dieser Arbeit sein, Alternativen aufzuzeigen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk darauf, nicht die Oberfläche als Schutzschicht auszuführen, sondern die Klebefuge mit Brandschutzmitteln zu versehen und somit diese Schutzfunktion knapp unter einer Holzoberfläche anzusiedeln.

Die ausgewählten dämmschichtbildenden Brandschutzmittel wurden zuerst einer Reaktivitätsprüfung unterzogen, die den Einfluss auf das Aushärteverhalten des Klebstoffes darstellen soll. Anschließend wurde die Schutzfunktion der Brandschutzmittel im Klebstoff durch Brandversuche ermittelt und bewertet. Die Auswertung ergab dabei eine signifikante Temperaturreduktion in der Struktur abseits der Beflammung durch den Einsatz der Schutzstoffe. Prüfungen der Zugscherfestigkeit ergaben Einbußen der Bindefestigkeit des Klebstoffes durch den Einsatz von Brandschutzmitteln.

Schlagworte: Brandschutz, Holzbau, Dämmschichtbildner, Klebstoff, halogenfrei

## **Abstract**

This master-thesis focuses on the possibilities to improve fire protection in structural timber elements. Current systems either deal with inefficient use of the resource wood or cover the wooden surface with coatings. That is why the main target of this work is to find an alternative way, not to have a protective surface layer, but to improve the glue layer under a thin wooden surface with fire retardants.

The chosen intumescent fire retardants were first tested in a reactivity test, evaluating the impact on the curing behaviour of the adhesive. Afterwards the protection properties of the fire retardant in the adhesive were measured in a burning test, where the evaluation showed a remarkable decrease in temperature of the structure besides the flame when using fire retardants. Further testing showed a decrease in lap shear strength for the combinations with fire protection.

Keywords: fire protection, timber constructions, intumescent, adhesive, halogen free



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>9</b>
1.1	Brandverhalten von Holz	9
1.2	Rechtliche Grundlagen des Brandschutzes in Österreich	11
1.3	Stand der Technik	11
1.4	Lösungsmöglichkeit	12
1.4.1	Intumeszente Brandschutzmittel	13
1.4.1.1	Funktionsweise intumeszenter Brandschutzsysteme	13
1.4.1.2	Aufbau intumeszenter Brandschutzsysteme	13
1.4.1.3	Verwendete Brandschutzmittel	15
1.5	Hypothese und Forschungsfragen	16
<b>2</b>	<b>Material &amp; Methoden</b>	<b>16</b>
2.1	Holz	16
2.2	Klebstoffsystem	16
2.3	Brandschutzmittel	17
2.4	Methoden	19
2.4.1	Bestimmung der Gelierzeit	19
2.4.2	Brandversuche	20
2.4.2.1	Brandstand	20
2.4.2.2	Durchführung der Brandversuche	20
2.4.2.3	Prüfkörper Vorversuch	21
2.4.2.4	Prüfkörper Hauptversuch	23
2.4.2.4.1	Vermessung des Abbrands	23
2.4.3	Ermittlung der Zugscherfestigkeiten	24
2.4.3.1	Ermittlung der Zugscherfestigkeiten an Fichtenproben	24
2.4.3.2	Ermittlung der Zugscherfestigkeiten an Buchenproben	24
2.4.3.3	Bestimmung der Klebefugendicke	25
<b>3</b>	<b>Ergebnisse &amp; Diskussion</b>	<b>26</b>
3.1	Bestimmung der Gelierzeit	26
3.2	Brandversuche	27
3.2.1	Vorversuch	27
3.2.2	Hauptversuch	33
3.2.2.1	Vermessung des Abbrandes	41

3.3	Ermittlung der Zugscherfestigkeit _____	43
3.3.1	Ermittlung der Zugscherfestigkeit an Fichtenproben _____	43
3.3.2	Ermittlung der Zugscherfestigkeit an Buchenproben _____	44
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerung</b> _____	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>Ausblick</b> _____	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> _____	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> _____	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> _____	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>Anhang (Abbildungs- und Tabellenanhang, Dokumentation)</b> _____	<b>59</b>
9.1	Zugscherfestigkeitsprüfung an Fichtenproben _____	59
9.2	Zugscherfestigkeitsprüfung an Buchenproben _____	60

# 1 Einführung

Der Brandschutz stellt den modernen Holzbau vor große Herausforderungen und zählt bisweilen zu den limitierenden Faktoren beim Einsatz von Holz im mehrgeschossigen Hochbau. Aufgrund seiner Funktion auch als Brennstoff gibt es noch immer Vorbehalte gegenüber Holz als Baumaterial. Pech et. al. (2016) beschreibt große Vorbehalte der Bevölkerung bezüglich des Brandschutzes bei der Verwendung brennbarer Bauweisen. Jedoch gibt er zu bedenken, dass die großen Feuerkatastrophen der vergangenen Jahrhunderte nicht grundsätzlich auf die Verwendung von brennbaren Materialien zurückzuführen sind, sondern auch unter anderem durch den sorglosen Umgang mit offenem Feuer und dem Fehlen von brandbekämpfenden Maßnahmen ermöglicht wurde.

Im heutigen modernen Hochbau hingegen gewährleisten bauliche, organisatorische und anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen brandschutztechnisch sichere Gebäude. So gibt es heutzutage keinen Zusammenhang mehr zwischen der Bauweise und der Anzahl der Brandtoten. Auch sind nicht brennbare Bauweisen brandschutztechnisch nicht sicherer als brennbare Bauweisen. (Pech, A. et.al., 2016)

## 1.1 Brandverhalten von Holz

Grundsätzlich lässt sich das Verhalten von Holz bei steigender Temperatur wie folgt einteilen: (Bobacz, 2006) (Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., 2009)

- **100 °C:** Trocknung des Holzes, Verlust des freien und gebundenen Wassers
- **150 – 200 °C:** Beginn des Abbaus von Lignin und Hemicellulose, Start der Pyrolyse
- **Bis ca. 275°C:** langsamer Verlauf der Reaktionen
- **Ab ca. 275 °C:** Abbau von Cellulose, Bildung einer Kohleschicht (Pyrolyse), Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit
- **290 °C:** Enormer Massenverlust des Holzes (Bis zu 39 M-%)
- **Ab ca. 700°C:** Verbrennen der Kohleschicht

Niemz & Sonderegger (2017) hingegen beschreiben eine Zersetzung des Holzes bereits ab 105 °C. Außerdem geben sie drei wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Holz an:

### Flammpunkt

Der Flammpunkt von Holz liegt im Bereich von 200 bis 275 °C und beschreibt die Temperatur, bei der das Holz bei Vorhandensein einer Fremdflamme zu brennen beginnt. Da er von Faktoren wie der Holzart, der Rohdichte, usw. abhängt, kann er ebenso wie die folgenden Kenngrößen nicht eindeutig definiert werden.

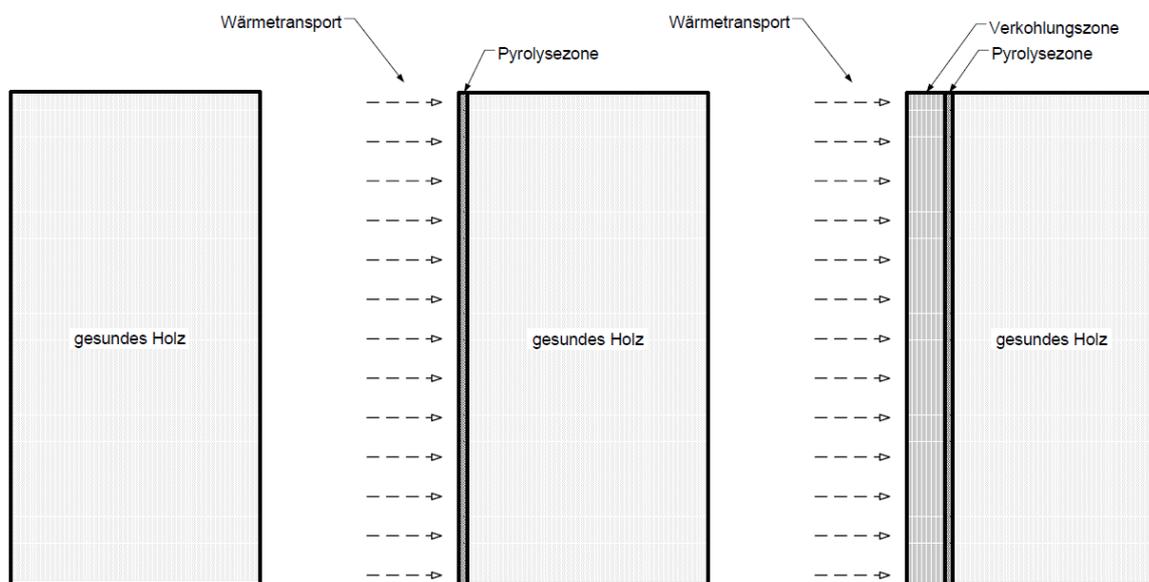
### Brennpunkt

Dieser liegt im Bereich von 260 – 290 °C und bezeichnet die Temperatur, bei der Holz mit bleibender Flamme ohne äußere Einwirkung weiterbrennt.

## Zündpunkt

Im Temperaturbereich von 330 – 520 °C kann sich Holz bei Sauerstoffzufuhr selbst entzünden.

Im Falle eines Brandes kommt es ab einer Temperatur von etwa 275°C zum Abbau der Holzsubstanz durch Pyrolyse, wodurch sich brennbare Gase bilden. Diese Pyrolysezone wandert selbst immer weiter ins gesunde Holz und bildet hinter sich, also an der feuerzugewandten Seite eine Kohleschicht aus (Abb. 1). Diese Schicht zeichnet sich durch eine geringe Dichte (etwa 20% der Ursprungsrohddichte) und eine ebenfalls niedrige Wärmeleitfähigkeit aus und schützt somit das unter ihr liegende Holz (Bobacz, D. et.al., 2005).



**Abb. 1: Schematische Darstellung des Brandverhaltens von Holz (Bobacz, D. et.al., 2005)**

Unter der Kohleschicht kommt es aber bereits zu einem Verlust der Festigkeiten aufgrund des Temperatureinflusses. Buchanan & Abu (2017) beschreiben eine signifikante Reduktion bis zu 25 mm unter der gebildeten Kohleschicht. Da ein verlaufender Festigkeitsverlust, wie er in der Realität besteht schwer in die Berechnungen einzubeziehen ist, wurde für die Bemessung angenommen, dass ein Teil dieser Schicht keine Festigkeit mehr besitzt, der Rest allerdings unverändert ist. Aus diesem Grund wird in der Bemessung des reduzierten Querschnitts nach EN 1995-1-2 (2010) eine Schicht von 7 mm (zero strength layer) abgezogen, um diesem Umstand gerecht zu werden.

## 1.2 Rechtliche Grundlagen des Brandschutzes in Österreich

In Österreich kommen im Wesentlichen zwei Regelwerke bezüglich Brandschutz zu Anwendung. Einerseits regelt der Eurocode allgemein und der Eurocode 5 im Speziellen die statische Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Die Bemessung von Holztragwerken im Brandfall wird im Eurocode 5, Teil 1-2 geregelt (DIN EN 1995-1-2, 2010). Auf Basis des hier dargestellten Formelwerkes und der angegebenen Kennzahlen können sowohl Bauteile als auch Verbindungsmittel bemessen werden. Über definierte Abbrandraten kann zurückgerechnet werden, wie ein Bauteil dimensioniert sein muss, um im Brandfall eine bestimmte Zeit die im Brandfalle zugewiesenen Brandlasten ableiten zu können.

Das Bauwesen in Österreich ist grundsätzlich in den Bauordnungen der Bundesländer geregelt, jedoch beziehen sich diese auf die Richtlinien des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB). Der Brandschutz im Speziellen ist dabei in der OIB-Richtlinie 2 von 2015 geregelt, die mit Ausnahme von Niederösterreich (OIB-Richtlinie 2 von 2011 noch in Kraft, Stand Juni 2017) in allen Bundesländern in Kraft getreten ist (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017).

In den Begriffsbestimmungen der OIB-Richtlinien (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015a) werden auch fünf Gebäudeklassen definiert. Die Einteilung ist unter anderem abhängig von:

- Anzahl der oberirdischen Geschoße
- Brutto-Grundfläche der oberirdischen Geschoße
- Art der Nutzung
- Fluchtniveau

Anhand dieser Gebäudeklassen werden auch die notwendigen Brandschutzeigenschaften vorgegeben. So werden in der OIB-Richtlinie 2 die allgemeinen Anforderungen an das Brandverhalten (nach EN 13501-1 (2010)) sowie den Feuerwiderstand (nach EN 13501-2 (2016)) für verschiedene Bauteile in den jeweiligen Gebäudeklassen festgelegt. (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015b)

## 1.3 Stand der Technik

Um die Brandschutzvorgaben zu erreichen, werden aktuell in der Praxis Wände mit größerer Stärke errichtet (Aseeva, Serkov, & Sivenko, 2014). Da Nadelholz mit einer konstanten Abbrandrate von 0,65 mm/min (DIN EN 1995-1-2, 2010) bemessen wird, führen stärkere Wände dazu, dass der für die Belastung minimale erforderliche Restquerschnitt später erreicht wird und die Wand somit dem Feuer länger standhält. Für Deckenelemente wird eine Querschnittserhöhung zur Erreichung der Brandschutzanforderungen nicht benötigt, da diese ohnehin bezogen auf ihre Festigkeiten überdimensioniert werden müssen, um die für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS-Nachweis) notwendigen Durchbiegungs- und Schwingungswerte einhalten zu können.

Die Erhöhung der Wandstärken rein zur Verbesserung der Feuerwiderstandsfähigkeit stellt einen sehr ineffizienten Einsatz des Rohstoffes Holz dar, da die zusätzlich verbaute Menge statisch nie benötigt wird, ausgenommen natürlich im Falle eines Brandes als Schutz- und Opferschicht für den erforderlichen minimalen Restquerschnitt. Da einerseits ein ressourcenschonender Umgang mit nachwachsenden Rohstoffen notwendig ist um eine nachhaltige Nutzung zu gewährleisten und sich andererseits der Mehrverbrauch an Holz in den Kosten der Holzbauprodukte niederschlägt, ist es das Ziel dieser Arbeit, eine alternative Lösung dieses Problems zu finden.

#### **1.4 Lösungsmöglichkeit**

Eine Möglichkeit, um die Herausforderung des hohen Ressourcenbedarfs der aktuellen Brandschutzstrategien zu lösen, wäre der Einsatz von intumeszenten Brandschutzanstrichen, wie sie im Stahlbau schon seit geraumer Zeit zum Einsatz kommen. Diese Anstriche schäumen im Brandfall auf und bilden eine wärmedämmende Kohlenstoffschicht (Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., 2009).

Durch den Einsatz dieser Anstriche sind jedoch die Möglichkeiten der Oberflächengestaltung stark eingeschränkt und Holzoberflächen sind gänzlich ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber dieser Arbeit, der Fa. NORITEC Holzindustrie GmbH (Sachsenburg, Österreich), die Idee geboren, ein intumeszentes Klebstoffsystem für den konstruktiven Holzbau zu entwickeln. Dieses soll vorwiegend auf Brettsperrholz-Wänden unter einer Deckschicht aus Holz bzw. Holzwerkstoffen eingesetzt werden, um die Möglichkeiten bei der Oberflächenwahl trotz Brandschutzeigenschaften zu erhöhen und um den Einsatz von Holz- sowie Holzwerkstoffoberflächen zu ermöglichen.

Grundsätzlich wäre es auch denkbar, die Holzoberfläche unter der Deckschicht mit Brandschutzsalzen zu imprägnieren, jedoch weist diese Möglichkeit zahlreiche Nachteile auf. Hier zeigen sich auch die aus dem chemischen Holzschutz bekannten Probleme wie Einbringmenge, Eindringtiefe und Wirtschaftlichkeit (Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., 2009). In diesem speziellen Fall ist zusätzlich die notwendige Oberflächenbehandlung (Hobeln/Schleifen) vor der Verklebung als weiterer Hinderungsgrund zu nennen, der die ohnehin schon geringe Eindringtiefe weiter reduziert.

## **1.4.1 Intumeszente Brandschutzmittel**

### **1.4.1.1 Funktionsweise intumeszenter Brandschutzsysteme**

Intumeszente Brandschutzmittel kennzeichnen sich dadurch, dass sie beim Erreichen einer kritischen Temperatur an ihrer Oberfläche eine kohlenstoffreiche, hochviskose Schicht ausbilden. Dies beruht auf einer Vielzahl an endothermen Reaktionen zwischen den Bestandteilen des Systems. Anschließend werden inerte Gase freigesetzt, welche in der hochviskosen Schicht Blasen bilden und somit ein Aufschäumen dieser Schicht bewirken. Der dabei entstehende Schaum schützt in weiterer Folge das unter ihm liegende Material, da seine Wärmeleitfähigkeit sehr gering ist und somit die Erwärmung des Trägermaterials viel langsamer vonstattengeht. Zusätzlich sorgen die bereits beschriebenen sowie weitere endotherme Vorgängen (z.B. Verdampfen von Wasser) zu einer Verringerung der Temperatur und die gebildeten inerten Gase reduzieren den für einen Brand notwendigen Sauerstoffgehalt der Luft an der Materialoberfläche. (Duquesne & Futterer, 2014)

### **1.4.1.2 Aufbau intumeszenter Brandschutzsysteme**

Grundsätzlich sind drei Komponenten notwendig, um intumeszente Brandschutzeigenschaften zu erhalten: (Duquesne & Futterer, 2014)

- Säurespender
- Kohlenstoffspender
- Treibmittel

#### Säurespender

Als Säurespender dienen anorganische Säuren, die entweder frei im Brandschutzsystem vorliegen oder durch Temperatureinwirkung aus einer Vorstufe entstehen. Anorganische Säurespender können unter anderem sein:

- Säuren (Phosphor-, Bor-, Schwefelsäure)
- Ammoniumsalze (Phosphate, Polyphosphate, Sulfate, etc.)
- Aminophosphat, Phosphoramid (Harnstoffphosphat, Melaminphosphat, etc.)

### Kohlenstoffspender

Als Kohlenstoffquelle werden kohlenstoffreiche Substanzen eingesetzt, bei welchen in Gegenwart von Säuren eine Dehydratation oder Desaminierung einsetzt. Diese setzen typischerweise Wasser oder andere Zersetzungsnebenprodukte bei der Bildung von C=C Doppelbindungen frei. Als Kohlenstoffspender werden meist folgende Substanzen eingesetzt:

- Stärke
- Dextrine
- Sorbit
- Pentaerythritol
- Polymere (Polyamide, Polyester, etc.)
- Phenol-Formaldehyd-Harze
- Methylol-Melamin

### Treibmittel

Treibmittel setzen große Mengen an nichtbrennbaren Gasen wie CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl oder H<sub>2</sub>O frei. Diese bilden die in Punkt 1.4.1.1 beschriebenen Blasen und sind somit für das Aufschäumen des Brandschutzmittels verantwortlich.

- Chlorparaffin
- Tetrachlorphthalatharze (TCP-Harze)
- Melamin

Zusätzlich zu diesen drei Komponenten beschreibt Kittel (2008) weitere vier Bestandteilgruppen, welche in einem intumeszenten Brandschutzsystem vorhanden sein müssen/sollen. Dabei legt er seinen Fokus aber auf die Anwendung in Beschichtungen. Laut Kittel muss das verwendete Bindemittel oder Harz thermoplastische Eigenschaften aufweisen. Dies würde die Einsatzmöglichkeiten von intumeszenten Brandschutzsystemen in Klebstoffen reduzieren, da diese duroplastische Eigenschaften aufweisen müssen um im konstruktiven Holzbau in tragenden Elementen eingesetzt werden zu können. Duquesne & Futterer (2014) beschreiben jedoch auch den Einsatz von intumeszenten Brandschutzsystemen in Matrizen mit duroplastischen Eigenschaften.

### Bindemittel/Harz

Das laut Kittel thermoplastische Bindemittel/Harz darf im Brandfall weder zu flüssig noch zu hochviskos sein, um eine optimale Ausbildung der Schaumschicht zu gewährleisten. Dies ist dabei unabhängig davon ob es sich um ein wasserbasiertes (W) oder lösemittelhaltiges (L) System handelt. Verwendet werden dafür vorwiegend:

- Copolymere auf Basis
  - o Vinylacetat/Acrylsäureester (W)
  - o Vinylacetat/Vinylester (W)
  - o Vinylacetat/Acrylsäureester (W)
- Newton'sche bzw. thixotrope Styrol-, Vinyl- oder Vinyltoluol-Acrylat-Polymere (L)

## Metallsalze

Verwendet wird hier nahezu ausschließlich Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) und dient hauptsächlich der Farbgebung (Weiß).

## Füllstoffe

Diese nehmen zwar nicht als Reaktionspartner an der intumeszierenden Reaktion teil, können jedoch das Expansionsverhalten beeinflussen. Durch die Zugabe geeigneter Substanzen können dünnere, kompaktere Schaumschichten entstehen. Der Vorteil dabei ist, dass diese kompakteren Schäume zwar in ihrer Schutzwirkung geringer sind, aber dafür weniger leicht abfallen und somit länger am zu schützenden Objekt verbleiben.

## Hilfsstoffe

Als Hilfsstoffe gelten alle Komponenten, welche zur Formulierung zusätzlich notwendig sind. Dazu zählen unter anderem Dispergierhilfsmittel, Entschäumer, Biozide und viele mehr.

### **1.4.1.3 Verwendete Brandschutzmittel**

#### Ammoniumpolyphosphat (APP)

Eines der wichtigsten halogenfreien Brandschutzmittel ist Ammoniumpolyphosphat (APP), ein anorganisches Salz der Phosphorsäure mit Ammoniak. Abhängig von der Anzahl der Monomere  $[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$  im Polymer und dem Vorhandensein von Verzweigungen unterscheidet man die Kristallphasen I und II. APP der Kristallphase I (APP I) ist gekennzeichnet durch eine Kettenlänge  $n$  von  $< 100$  Wiederholungseinheiten und ist nicht verzweigt. Dies führt zu einer niedrigeren Zersetzungstemperatur ( $\sim 150^\circ\text{C}$ ) und einer höheren Wasserlöslichkeit als APP II. Bei letzterem beginnt die Zersetzung aufgrund des höheren Molekulargewichts ( $n > 1000$ ) und dem Vorhandensein von Verzweigungen erst bei etwa  $300^\circ\text{C}$ . Zusätzlich sinkt auch, wie bereits beschrieben, die Löslichkeit des Brandschutzmittels in Wasser. (Klatt, 2014)

#### Melaminpolyphosphat (MPP)

Melamin(mono)phosphat (MMP) ist das Salz der Phosphorsäure mit Melamin. Ab etwa  $200^\circ\text{C}$  bildet sich aus zwei Einheiten MMP als neue Substanz Melaminpyrophosphat. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur über  $260^\circ\text{C}$  entsteht Melaminpolyphosphat (MPP), welches aus mehr als zwei Einheiten Melamin(mono)phosphat besteht.

Die Kombination von Melamin und phosphorhaltiger Brandschutzmittel hat sich als äußerst günstig erwiesen, da sich Melamin stark endotherm zersetzt und dabei nichtbrennbare Gase bildet. (Klatt, 2014)

## 1.5 Hypothese und Forschungsfragen

Auf Basis der in 1.4 dargestellten Idee, eine brandschützende Klebstoffschicht zwischen einer statisch tragenden Brettsperrholzwand und einer Holz- bzw. Holzwerkstoffoberfläche einzubringen, wird folgende Hypothese aufgestellt. Es wird angenommen, dass ein Klebstoffsystem hergestellt werden kann, das unter dieser Schutzschicht liegende statisch tragende Holzbauteile mittels intumeszenter Eigenschaften durch Reduktion der Temperaturerhöhung im darunterliegenden Holzbauteil schützt und die Anforderungen an die Verklebungsgüte der Beanspruchungsgruppe D3 nach EN 204 (2016) erfüllt. Daraus lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Ist es möglich, durch den Einsatz von intumeszenten Brandschutzmitteln in der statisch nicht tragenden Klebefuge die Temperatursteigerung im Bauteil im Falle eines Brandes zu reduzieren?
- Werden die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes durch den Zusatz von Brandschutzmitteln verringert?

## 2 Material & Methoden

### 2.1 Holz

Zur Durchführung der Versuche wurden von der Fa. NORITEC Holzindustrie GmbH Pfosten aus Fichtenholz (*Picea abies*) mit einer Dimension von 43 x 220 mm und einer Länge von 4 m zu Verfügung gestellt. Das Holz wurde nach EN 14081 (2012) festigkeitssortiert und der Festigkeitsklasse C 24 nach EN 338 (2009) zugeordnet.

### 2.2 Klebstoffsystem

Als Basis für alle durchgeführten Versuche diente der Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff (MUF) Prefere 4546 mit dem Härter Prefere 5093 der Fa. Dynea (Lillestrøm, Norwegen) in einem Verhältnis von 100:100. Der Klebstoff wurde ausgewählt, da er schon jetzt in der Fa. NORITEC Holzindustrie GmbH zur Herstellung von Brettsperrholz-Elementen verwendet wird. Die dabei verwendete Auftragsmenge liegt bei bis zu 400 g/m<sup>2</sup>.

Grundsätzlich lässt sich zum verwendeten Klebstoffsystem festhalten, dass seine Vorteile einerseits darin liegen, dass der ausgehärtete Klebstoff schon nicht brennt. Allerdings schützt er das darunter liegende Holz nicht vor den steigenden Temperaturen und gibt es somit der Zerstörung preis. Andererseits dürfte es aber auch ein positiver Aspekt des Klebstoffsystems sein, dass es ebenso wie manche der in dieser Arbeit verwendeten Brandschutzmittel Melamin als Bestandteil enthält.

## 2.3 Brandschutzmittel

Zur Steigerung der Brandschutzeigenschaften des Klebstoffsystems wurden verschiedene Brandschutzmittel von mehreren Herstellern verwendet. Aufgrund der negativen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt sowie der bereits erfolgten bzw. drohenden Verbote wurde bei der Auswahl der Brandschutzmittel von vornherein auf halogenierte sowie borhaltige Brandschutzmittel verzichtet. Stattdessen wurde der Fokus auf Zusätze gelegt, welche auf Phosphor bzw. Stickstoff basieren. Zudem wurde darauf geachtet, Brandschutzmittel zu verwenden, welche ein intumeszentes (dämmschichtbildendes) Verhalten aufweisen.

Die zur Durchführung der Masterarbeit verwendeten Brandschutzmittel werden folgend vorgestellt, wobei alle gewählten Produkte intumeszente Eigenschaften aufweisen. Dazu wurden 15 Brandschutzmittel von fünf verschiedenen Produzenten ausgewählt, wobei besonderes Augenmerk auf Produkte basierend auf Ammoniumpolyphosphat bzw. Melaminpolyphosphat gelegt wurde. Bezogen wurden die Produkte von den folgenden Unternehmen:

- **Clariant AG** (Muttenz, Schweiz)
- **Chemische Fabrik Budenheim KG** (Budenheim, Deutschland)
- **Israel Chemicals Ltd. (ICL)** (Tel Aviv-Jaffa, Israel)
- **BASF SE** (Ludwigshafen am Rhein, Deutschland)
- **Metadynea Austria** (Krems, Österreich)

### Ammoniumpolyphosphat

In der folgenden Tabelle (Tab. 1) sind alle auf APP basierenden Brandschutzmittel angeführt, welche im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Die dabei angegebenen Kennwerte entstammen den von den Produzenten zur Verfügung gestellten Datenblättern.

**Tab. 1: Liste der APP-Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten (k.A. = keine Angabe)**

Produzent	Produkt	Kristallphase	Zustand	p.H.-Wert	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Löslichkeit in Wasser [% m/m]	Zersetzungstemperatur [°C]
Clariant	Exolit AP 423	II	Pulver	5-7,5	1,9	< 1	> 275
	Exolit AP 462	II	Pulver	6,5-8,5	1,9	< 0,04	> 275
	Exolit AP 750	k.A.	Pulver	6,5	1,8	< 1	> 250
Budenheim	FR CROS C30	II	Pulver	7,5	1,9	< 0,3	> 300
	FR CROS C60	II	Pulver	7,5	1,9	< 0,15	> 300
	FR CROS 584	II	Pulver	7	1,9	< 0,5	> 300
ICL	Phos-Chek 42	k.A.	Pulver	6,7	k.A.	< 0,2	> 240
	Phos-Chek 42-C	k.A.	Pulver	7,2	k.A.	< 0,1	> 240

## Melaminpolyphosphat

Die in Tab. 2 angeführten Kennzahlen für die auf Melaminpolyphosphat basierenden Brandschutzmittel entstammen ebenfalls den Datenblättern des Herstellers.

**Tab. 2: Liste der MPP-Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten**

Produzent	Produkt	Zustand	p.H.-Wert	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Löslichkeit in Wasser [% m/m]	Zersetzungstemperatur [°C]
BASF	Melapur 200	Pulver	5	1,79	< 0,01	> 500
	Melapur 200/70	Pulver	5	1,79	< 0,01	> 500

## Weitere Brandschutzmittel

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Produkten basierend auf APP und MPP wurden noch weitere Brandschutzmittel ausgewählt, welche zwar einen zum Teil anderen chemischen Aufbau aufweisen, jedoch von ihrer Wirkungsweise her den anderen Brandschutzmitteln gleichzustellen sind.

**Tab. 3: Liste weiterer verwendeter Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten (k.A. = keine Angabe)**

Produzent	Produkt	Substanz	Zustand	p.H.-Wert	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Löslichkeit in Wasser [% m/m]	Zersetzungstemperatur [°C]
Metadynea	MPT	Melaminphosphat	Pulver	3	k.A.	0,5	k.A.
	EP	Ethylendiaminphosphat	Pulver	6,9 - 7,1	k.A.	5	230
	PPP	Phosphorsäureester mit Pentaerythritol	flüssig	1,8	1,5	100	k.A.
Budenheim	FR CROS 634	Ammoniumpyrophosphat	flüssig	6	1,37	35	k.A.
	FR CROS 680	Phosphorsäureester	flüssig	1,0 - 2,0	1,46	100	k.A.

## 2.4 Methoden

Um die Eigenschaften der Kombinationen aus Klebstoff und Brandschutzmittel beurteilen zu können wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Ziel dieser war es herauszufinden, welche Brandschutzmittel mit dem Klebstoff überhaupt mischbar sind und welche maximalen Konzentrationen dabei erreichbar sind. Des Weiteren wurde versucht, die Brandschutzeigenschaften dieser Kombinationen zu quantifizieren, sowie ihre Zugscherfestigkeit zu beurteilen. Diese Versuche sollen in weiterer Folge beschrieben werden.

### 2.4.1 Bestimmung der Gelierzeit

Die Reaktivität eines Klebstoffes kann anhand der Zeit ermittelt werden, die er bis zur Aushärtung benötigt. Eine Methode dafür ist die Bestimmung der Gelierzeit (Dunky & Niemz, 2002). Diese ist zwar sehr einfach und kostengünstig durchzuführen, birgt aber einige Fehlerquellen, da sie stark subjektiv von der jeweils durchführenden Person und dem gewählten Versuchsaufbau abhängt. Da dieser Klebstofftest keiner Norm unterliegt, wird im Weiteren der gewählte Versuchsaufbau näher erläutert.

Zur Bestimmung der Gelierzeit wurden Mischungen aus dem verwendeten Klebstoffsystem und den verschiedenen Brandschutzmitteln hergestellt, wobei fünf verschiedene Brandschutzmittelkonzentrationen (10, 20, 30, 40 und 50 M-% der Endmischung) gewählt wurden. Da ein Pipettieren der Proben aufgrund ihrer hohen Viskosität nicht möglich war, wurde aus den jeweiligen Dichten der einzelnen Substanzen für jedes Mischverhältnis eine Mischdichte berechnet und anschließend 5 ml des Gemisches in eine Glaseprouvette (Wandstärke: 1,1 mm; Außendurchmesser: 27 mm) eingewogen. Unter ständigem Rühren wurde dieses dann im kochenden Wasserbad erhitzt und die Zeit bis zum Aushärten gemessen. Da der Zeitpunkt, ab dem der Klebstoff „ausgehärtet“ ist, sehr subjektiv ist, wurden alle diese Versuche von derselben Person an einem Tag durchgeführt. Dies soll subjektive Verfälschungen der Ergebnisse möglichst reduzieren.



Abb. 2: Versuchsaufbau Reaktivitätsmessung

## 2.4.2 Brandversuche

Da das Ziel dieser Arbeit ist, den Brandschutz im modernen Holzbau zu verbessern, war es natürlich sehr wichtig zu versuchen diese Eigenschaften in Versuchen zu quantifizieren. Aufgrund der technischen Gegebenheiten am Universitäts- und Forschungszentrum Tulln (UFT) und dem Fehlen geeigneter Normbrandstände wurde ein Brandstand zur Prüfung des Brandverhaltens von Bodenbelägen kurzerhand umfunktioniert. Dabei ist zwar festzuhalten, dass es sich nicht um eine andere Belastungsrichtung als in der Realität handelt. Da jedoch alle Prüfkörper mit demselben Versuchsaufbau geprüft wurden sind relative Vergleiche möglich.

### 2.4.2.1 Brandstand

Zur Feststellung der Brandschutzeigenschaften der hergestellten Brandschutzklebstoffe wurde ein Brandstand in Anlehnung an DIN EN ISO 9239-1 (2010) verwendet (Abb. 3). In diesem Brandstand wird ein horizontal liegender Prüfkörper zuerst durch vier mit Propangas betriebenen Heizstrahlern erwärmt. Anschließend wird der Prüfkörper einer direkt einwirkenden Gasflamme ausgesetzt, um einen Brand zu simulieren.



**Abb. 3: Brandprüfstand für horizontale Flächen in Anlehnung an DIN EN ISO 9239-1**

### 2.4.2.2 Durchführung der Brandversuche

Vor jeder Inbetriebnahme wurde der von den Strahlern ausgehende Wärmestrom gemäß DIN EN ISO 9239-1 kalibriert, um vergleichbare Bedingungen zu schaffen. Anschließend wurde ein Prüfkörper eingelegt und in der Prüfkammer befestigt. Zum Zeitpunkt des Einlegens wurde eine Zeitmessung gestartet um die Prüfdauer zu überwachen. Zwei Minuten nach dem Start der Stoppuhr wurde der Zündbrenner befeuert und wie in DIN EN ISO 9239-1 beschrieben am Beginn der Probe angebracht. Die Gesamtdauer eines Versuches betrug 60 Minuten, wobei die Temperatur während dieser Zeit mittels eines Temperatur-Messgerätes (PL-125-T4USB VS Temperatur-Messgerät der Fa. Conrad (Hirschau, Deutschland)) durch vier Temperaturelemente (K-Typ) aufgezeichnet wurde. Die Typenbezeichnung (K-Typ) steht dabei für das Material der verwendeten Drähte (Nickel - Chrom / Nickel). Der messbare Temperaturbereich liegt zwischen – 270 und 1300 °C. Diese wurden vor Beginn der Prüfung in verschiedenen Tiefen (jeweils 8, 12, 17 bzw. 22 mm unter der Oberfläche) von der Unterseite durch vorgebohrte Löcher eingebracht (Abb. 4). In Faserrichtung wurde ein Abstand von 50 mm, gemessen von der beflammt Seite aus, gewählt, da sich im Vorversuch gezeigt hat, dass dies der Bereich der höchsten thermischen Beanspruchung ist. Nach Abschluss der Prüfung wurde der Prüfkörper entnommen, die Temperaturelemente entfernt und im Freien zum Abkühlen gelagert.

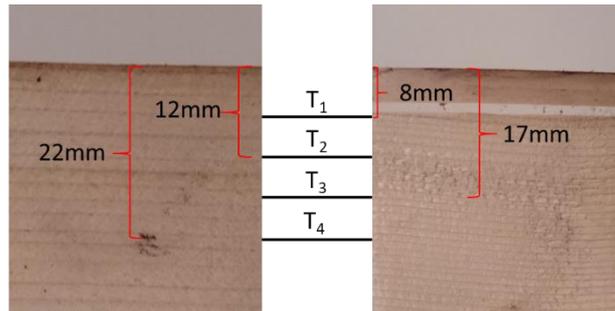


Abb. 4: Position der Temperaturelemente unter der Oberfläche

### 2.4.2.3 Prüfkörper Vorversuch

Dieser Versuch diente der Abschätzung, welche Klebstoffauftragsmengen und Brandschutzmittelanteile im Klebstoff sinnvoll sind und für die folgenden Versuche verwendet werden sollen. Auch sollte ermittelt werden, ob es Unterschiede zwischen den beiden Oberflächen gibt, welche von der NORITEC Holzindustrie GmbH zur Verfügung gestellt wurden.

Als Prüfkörper wurden Fichtenpfosten (*Picea abies*) mit einer Dimension von 43 x 220 mm und einer Länge von 50 cm verwendet. Aus den liegenden Prüfkörpern wurden die unteren Kanten ausgefräst, um sie im Brandstand ordnungsgemäß befestigen zu können und sicherzustellen, dass unabhängig von der gewählten Deckschicht die Oberfläche immer denselben Abstand zu den Heizstrahlern aufweist (Abb. 5). Vor der Verklebung wurde die Oberfläche des Pfostens mit einem Schleifpapier (P100) händisch angeschliffen und mit Druckluft von Schleifstaub befreit, um eine optimale Verklebung zu ermöglichen. Anschließend wurde das Brandschutzmittel Exolit AP423 der Fa. Clariant im Verhältnis 1:1:1 mit Härter und Klebstoff gemischt und jeweils ein Prüfkörper mit einer Auftragsmenge von 400, 700, 1000 und 1500 g/m<sup>2</sup> hergestellt. Auf diese Proben wurden 0,5 mm dicke Buchenfurniere gelegt und diese bei einer Presstemperatur von 80°C verpresst. Der Pressdruck wurde dabei händisch geregelt, da es nur so möglich war den Druck möglichst gering zu halten, um vor allem bei hohen Auftragsmengen ein Herausdrücken des Klebstoffes zu vermeiden. Die Presszeit betrug für jede Auftragsmenge 10 Minuten. Des Weiteren wurden noch jeweils ein Prüfkörper mit einer 7 mm starken Decklamelle aus Fichtenholz (Exzellent-Lamelle der Fa. NORITEC Holzindustrie GmbH) und einer MDF-Platte (Malerfertige Oberfläche der Fa. NORITEC Holzindustrie GmbH) als Deckschicht bei gleichem Mischverhältnis hergestellt.

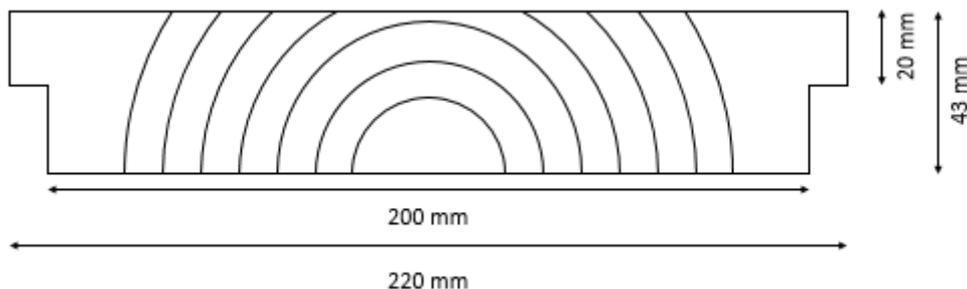


Abb. 5: Schematische Darstellung des Prüfkörpers

Um den Einfluss des Anteiles an Brandschutzmittel in der Klebefuge feststellen zu können, wurde ein weiterer Prüfkörper mit 50 % Brandschutzmittel im Klebstoffgemisch und einer Auftragsmenge von 1500 g/m<sup>2</sup> hergestellt. Die hohe Auftragsmenge wurde gewählt, da die Viskosität des Gemisches so hoch war, dass geringere Mengen auf der Oberfläche nicht mehr gleichmäßig zu verteilen waren.

Als Referenz dienten zwei Prüfkörper, die ohne Brandschutzmittel hergestellt wurden, mit einer aufgetragenen Klebstoffmenge von 400 bzw. 1000 g/m<sup>2</sup>. Alle getesteten Prüfkörper mit den jeweiligen Auftragsmengen und Oberflächen sind in Tab. 4 dargestellt.

Da hier zum Großteil Prüfkörper mit einem Buchenfurnier als Oberfläche verwendet wurden, musste die Position der Temperatursensoren angepasst werden. Diese wurden so eingebracht, dass sie in Bezug auf die Klebefuge dieselbe Position aufweisen wie die Prüfkörper mit den stärkeren Decklamellen. Somit befanden sich die Temperaturen in einer Tiefe von 1, 5, 10 und 15 mm bezogen auf die Prüfkörperoberfläche.

**Tab. 4: Hergestellte Prüfkörper für den Vorversuch des Brandtests (B:H:K – Brandschutzmittel:Härter:Klebstoff)**

Mischverhältnis B:H:K	Auftragsmenge [g/m <sup>2</sup> ]	Buchenfurnier	Fichtenlamelle	MDF-Platte
1:1:1	400	x	-	-
	700	x	x	x
	1000	x	-	-
	1500	x	-	-
2:1:1	1500	x	-	-
0:1:1	400	x	-	-
	1000	x	-	-

#### 2.4.2.4 Prüfkörper Hauptversuch

Auf Basis der Ergebnisse des Vorversuches der Brandprüfung und des in 2.4.3.1 beschriebenen Versuches der Zugscherfestigkeitsprüfung mit Fichtenlamellen wurden weitere Prüfkörper (jeweils zwei Stück) für den Brandversuch hergestellt. Die Auswahl der Brandschutzmittel beruhte dabei einerseits auf den Ergebnissen der Zugscherfestigkeitsprüfung, andererseits wurden die jeweiligen Klebefugen anhand ihrer Dicke und Qualität (homogene Verklebung, keine Luftblasen) optisch beurteilt. Weiters wurde darauf geachtet, sowohl Brandschutzmittel basierend auf APP als auch MPP zu wählen. Folgende Brandschutzmittel wurden dafür ausgewählt:

- Exolit AP423 von Clariant
- Phos-Chek 42 von ICL
- Melapur 200 von BASF
- FR CROS 584 von Budenheim

Die Herstellung der Prüfkörper mit Brandschutzmittel erfolgte, wie bereits in 2.4.2.3 beschrieben, wobei festzuhalten ist, dass als Mischverhältnis von Brandschutzmittel, Härter und Klebstoff ein Verhältnis von 1:1:1 gewählt wurde. Da zwischen den beiden Oberflächen Fichtenlamelle bzw. MDF-Platte im Vorversuch anhand der Ergebnisse kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden konnte, wurde für diesen Versuch die Fichtenlamelle als einzige Oberfläche gewählt. Die Auftragsmengen betragen für diesen Versuch 700 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup> (Ausnahme Exolit AP 423: 700, 1500 und 3000 g/m<sup>2</sup>).

Um die Ergebnisse mit Referenzwerten aktuell verwendeter Systeme vergleichen zu können, wurden mehrere Referenzproben getestet. Dazu wurden jeweils zwei Prüfkörper aus den Fichtenpfosten ohne Klebstoff und Deckschicht sowie mit Deckschicht und Klebstoff ohne Brandschutzmittel (Auftragsmenge: 400, 700, 1500 g/m<sup>2</sup>) hergestellt.

##### 2.4.2.4.1 Vermessung des Abbrands

Nach den Brandversuchen wurden die Prüfkörper mit einer Kreissäge in Faserrichtung mittig aufgetrennt. Somit konnte der Querschnitt des Prüfkörpers betrachtet und die beschädigte Fläche vermessen werden. Dazu wurden die Prüfkörper zuerst mittels einer Kamera fotografiert und diese Fotos anschließend in AutoCAD 2017 der Fa. Autodesk (San Rafael, USA) importiert. Dort wurden sowohl die maximale Länge der verbrannten Fläche, die maximale Tiefe sowie die Gesamtfläche des Abbrandes ermittelt (Abb. 6).

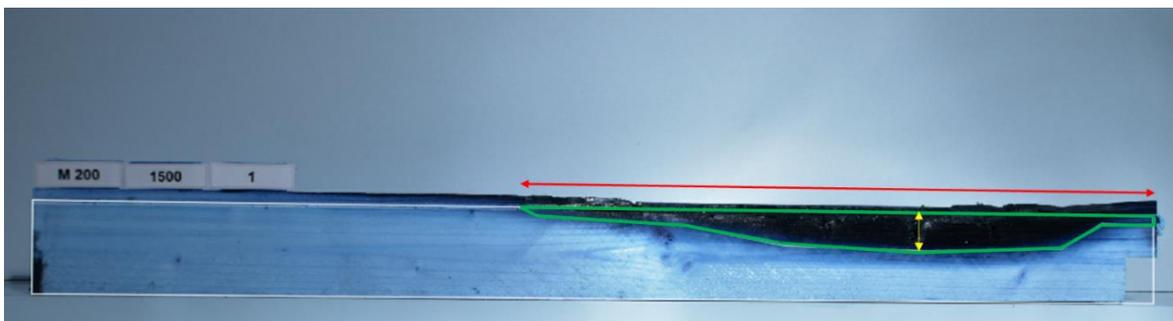


Abb. 6: Darstellung der Vermessung der maximalen Länge (rot), maximalen Tiefe (gelb) und der verbrannten Fläche (grün)

### 2.4.3 Ermittlung der Zugscherfestigkeiten

Um die Festigkeitseigenschaften der verschiedenen Kombinationen aus Klebstoff und Brandschutzmittel zu ermitteln, wurden Zugscherfestigkeitsprüfungen nach EN 205 (2016) durchgeführt. Um eine grobe Abschätzung treffen zu können wurden zuerst alle Brandschutzmittelkombinationen mit Lamellen aus Fichtenholz (*Picea abies*) in Anlehnung an ON EN 205 geprüft. Für die Wahl von Fichtenlamellen gab es mehrere Gründe, einerseits soll der Brandschutzklebstoff in weiteren Versuchen auch an dieser Holzart verwendet werden, andererseits waren diese zum Zeitpunkt der Prüfkörperherstellung verfügbar. Die Verwendung von Fichte zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit bedeutet jedoch, dass die in EN 204 (2016) festgelegten Grenzwerte von 10 N/mm<sup>2</sup> für Proben der Lagerungsfolge 1 aufgrund der geringeren Zugscherfestigkeiten von Fichte nicht zu erreichen sind. Jedoch können aufgrund dieser Versuchsanordnung Kombinationen identifiziert und für die weiteren Prüfungen ausgeschlossen werden, die bereits bei dem zu erwartenden niedrigen Zugscherfestigkeitsniveau von Fichte versagen, welches im Bereich von ca. 6 N/mm<sup>2</sup> liegt (Konnerth, J. et.al., 2016).

Anschließend wurden vier Brandschutzmittel ausgewählt, um Normversuche mit Buchenlamellen (*Fagus sylvatica*) durchzuführen. Alle Prüfungen wurden auf einer Universalprüfmaschine Z020 der Fa. Zwick Roell (Ulm, Deutschland) durchgeführt.

#### 2.4.3.1 Ermittlung der Zugscherfestigkeiten an Fichtenproben

Zur Abschätzung, welche Brandschutzmittel grundsätzlich die gewünschten Festigkeitseigenschaften aufweisen können, wurden alle Varianten einer Zugscherfestigkeitsprüfung mit Prüfkörpern nach ON EN 205 (aus Fichtenlamellen) unterzogen. Dabei wurden drei verschiedene Auftragsmengen (700/1500/3000 g/m<sup>2</sup>) gewählt, um Aussagen über die Klebeeigenschaften von verschiedenen Klebefugendicken treffen zu können. Als Referenz wurden Prüfkörper aus Fichtenlamellen mit Klebstoff und Härter, aber ohne Brandschutzmittel hergestellt. Dabei wurde zusätzlich zu den bereits genannten Auftragsmengen auch eine Serie mit 400 g/m<sup>2</sup> hergestellt, da dies der aktuell angewandten Menge entspricht. Alle Prüfkörper wurden vor ihrer Prüfung mehr als 7 Tage im Normklima gelagert, was der Lagerungsfolge 1 der Beanspruchungsgruppe D3 nach EN 204 (2016) entspricht.

#### 2.4.3.2 Ermittlung der Zugscherfestigkeiten an Buchenproben

Auf Basis der Ergebnisse des Versuches mit Fichtenproben wurden die in 2.4.2.4 bereits erwähnten Brandschutzmittel gewählt. Mit diesen wurden erneut Zugscherprüfkörper nach ON EN 205 hergestellt, jedoch diesmal wie in der Norm beschrieben aus Buchenlamellen. Als Verhältnis von Brandschutzmittel zu Klebstoff und Härter wurde wieder 1:1:1 gewählt, als Auftragsmengen jedoch nur 700 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup> (Ausnahme Exolit AP 423: 700, 1500 und 3000 g/m<sup>2</sup>). Als Referenz dienten wieder Prüfkörper mit Klebstoff und Härter, jedoch ohne Brandschutzmittel mit den Auftragsmengen 400, 700 und 1500 g/m<sup>2</sup>.

Die Prüfkörper wurden zu gleichen Teilen in drei Gruppen eingeteilt und den verschiedenen Lagerungsfolgen der Beanspruchungsgruppe D3 nach EN 204 (2016) unterzogen.

- Lagerungsfolge 1:
  - 7 Tage im Normklima
- Lagerungsfolge 3:
  - 7 Tage Normklima
  - 4 Tage in Wasser ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- Lagerungsfolge 4:
  - 7 Tage Normklima
  - 4 Tage in Wasser ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ )
  - 7 Tage Normklima

### 2.4.3.3 Bestimmung der Klebefugendicke

Da während des Pressvorganges der Prüfkörper immer wieder Klebstoff in unterschiedlichen Mengen ausgetreten ist, konnten keine gesicherten Aussagen über die in der Klebefuge verbliebene Menge getroffen werden. Deshalb wurden von jeder nach ON EN 205 hergestellten Platte Proben entnommen, anhand derer die endgültige Klebefugendicke mittels eines Axioplan 2 Mikroskop der Fa. Zeiss (Oberkochen, Deutschland) bei einer 10-fachen Vergrößerung ermittelt wurde. Dazu wurden aus den Platten, aus denen die Prüfkörper zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit geschnitten wurden, Proben mit einer Länge von 11 cm (Fichte) bzw. 2 cm (Buche) aus dem mittleren Drittel der jeweiligen Platte entnommen. Die längeren Fichtenproben wurden jeweils dreimal in regelmäßigen Abständen vermessen, die Buchenproben nur einmal in der Mitte.

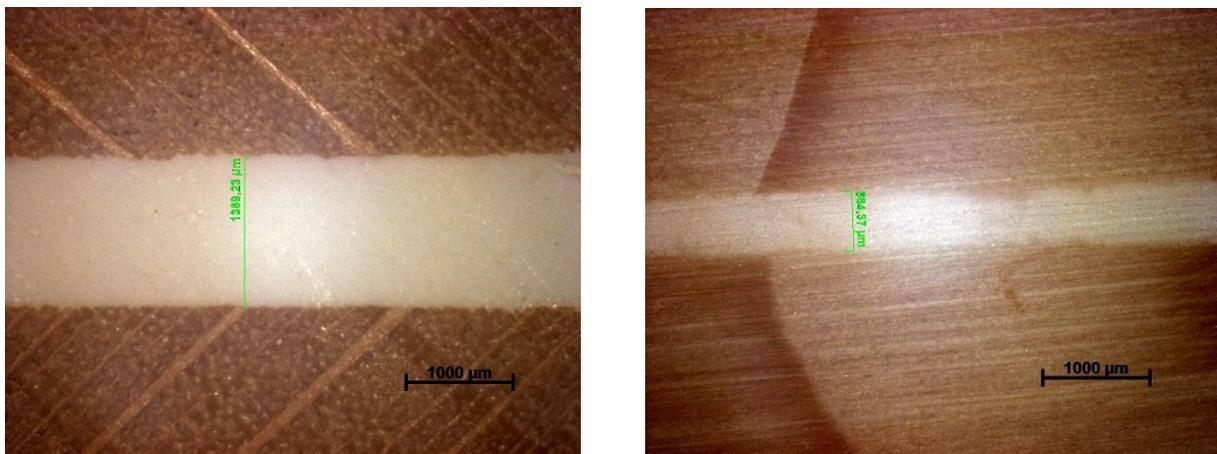


Abb. 7: Bestimmung der Klebefugendicke der Prüfkörper aus Buche (links) und Fichte (rechts)

### 3 Ergebnisse & Diskussion

#### 3.1 Bestimmung der Gelierzeit

Die Ergebnisse der Gelierzeitbestimmung zeigen, dass alle verwendeten Brandschutzmittel in geringen Mengen (~ 10%) zugesetzt werden können, ohne dass es zu einer Verhinderung des Gelierens kommt. Bei höheren Konzentrationen kann es zu Problemen in der Mischbarkeit der verwendeten Substanzen kommen, die eine Verwendung in dieser Form als Klebstoff ausschließen. Diese werden in Tab. 5 gemeinsam mit den Ergebnissen des Versuches beschrieben.

Tab. 5: Ergebnisse der Gelierzeitbestimmung (BSM...Brandschutzmittel).

	Gelierzeit [s]					
	0 % BSM	10 % BSM	20 % BSM	30 % BSM	40 % BSM	50 % BSM
PPP	35	42	48	52	83	-1
MPT	35	42	44	42	49	37
EP	35	55	-2	-2	-2	-2
Exolit AP 423	35	48	45	55	61	-3
Exolit AP 750	35	46	40	-4	-4	-4
Exolit AP 462	35	43	40	33	35	47
Phos-Chek 42	35	45	39	47	45	51
Phos-Chek 42-C	35	36	41	33	39	45
Melapur 200	35	38	34	30	26	-3
Melapur 200/70	35	45	36	32	40	-3
FR CROS C30	35	46	40	33	30	41
FR CROS C60	35	50	44	41	40	56
FR CROS 584	35	40	45	43	43	66
FR CROS 634	35	45	-5	-5	-5	-5
FR CROS 680	35	45	38	58	-1	-1

Erläuterung: <sup>1</sup>...kein Aushärten nach 250 Sekunden, gummiartiger Zustand; <sup>2</sup>...beim Erhitzen bildet sich eine feste, gummiartige Masse und eine flüssige Phase; <sup>3</sup>...nicht mehr mischbar, zu hoher Feststoffanteil; <sup>4</sup>...mischen von Klebstoff und Brandschutzmittel nicht möglich; <sup>5</sup>...sofortige teilweise Aushärtung bei Mischen, Bildung einer festen und flüssigen Phase

Gelierzeitveränderung bezogen auf Ausgangswert (0% BSM): **Blau**...Verringerung um 1 – 10 Sekunden, **Weiß**...Steigerung um 0 – 10 Sekunden, **Grün**...Steigerung um 11 – 20 Sekunden, **Gelb**...Steigerung um 21 – 30 Sekunden, **Orange**...Steigerung um mehr als 30 Sekunden, **Rot**...kein Ergebnis

Grundsätzlich lässt sich als Ergebnis dieses Versuches festhalten, dass sich die Brandschutzmittel recht unterschiedlich verhalten. Während die Gelierzeit bei den Brandschutzmitteln mit Melamin (MPT, Melapur 200, Melapur 200/70) größtenteils unverändert bleibt bzw. sogar abnimmt, zeigen andere Brandschutzmittel schon bei geringen Mengen eine merkliche Steigerung der Gelierzeit (PPP, Exolit AP 423). Interessant ist jedenfalls, dass es bei den meisten Brandschutzmitteln (z.B. Phos-Check 42, Melapur 200/70, FR CROS C60,...) bei einem Brandschutzmittelanteil von 10% zu einer Steigerung der Gelierzeit gegenüber dem Referenzklebstoff kommt, die bei weiterer Zugabe von Brandschutzmittel (20%) allerdings wieder rückläufig ist.

Bei höheren Konzentrationen kam es teilweise zu Problemen bei der Mischbarkeit der einzelnen Substanzen, wie in der Tabelle anhand der rot markierten Felder ersichtlich ist. In jenen Fällen, in denen feste Brandschutzmittel verwendet wurden, kam es zu einer deutlich wahrnehmbaren Erhöhung der Viskosität des Gemisches.

Die Zunahme der Viskosität aufgrund der Erhöhung des Feststoffanteiles bei größeren Brandschutzmittelanteilen führte zu Problemen bei der Verarbeitung des Klebstoffes. Deshalb wurde aufgrund dieses Versuches ein Brandschutzmittelanteil von 1/3 des Endgemisches für die folgenden Versuche festgelegt, da dieser einen Kompromiss aus einem möglichst hohen Brandschutzmittelanteil und der noch möglichen Verarbeitbarkeit darstellt. Damit wurden alle Brandschutzmittel ausgeschlossen, welche bei einem Anteil von 30% im Versuch kein Ergebnis erzielten (EP, Exolit AP 750, FR CROS 634). Die Gelierzeit per se wurde nicht als Ausschlusskriterium herangezogen, da angenommen wurde, dass diese im Falle einer Produktentwicklung mittels Zusatzstoffen eventuell noch optimiert werden kann.

## **3.2 Brandversuche**

### **3.2.1 Vorversuch**

Die im Vorversuch der Brandprüfung erzielten Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt. Ziel dieses Versuches war es, die Eignung des Prüfstandes für diesen Versuchsaufbau zu ermitteln sowie den Bereich der möglichen Auftragsmengen weiter eingrenzen zu können. Des Weiteren sollten die beiden zur Verfügung stehenden Oberflächen getestet werden um herauszufinden, ob der Einsatz der unterschiedlichen Deckschichten zu verschiedenen Ergebnissen führt oder ob aufgrund des gleichen Verhaltens eine Oberfläche ausgeschlossen werden kann. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass diese Oberflächen aufgrund ihrer Stärke zu einer verzögerten Erwärmung führten, da zuerst die Deckschicht abbrennt und erst danach der Klebstoff angegriffen wird. Bei einer Abbrandrate von Nadelholz von 0,65 mm/min nach Eurocode 5 (EN 1995-1-2, 2010) wird daher eine Verzögerung von etwa 10 Minuten erwartet.

Ein weiteres Problem beim Durchführen dieser Versuche war, dass die dünnen Furniere beim Abbrand im Bereich der größten Belastung zuerst verbrannten und sich danach von diesem Punkt aus nach oben wölbten (Abb. 8). Dabei blieb ein beträchtlicher Teil des inzwischen aufgeschäumten Brandschutzmittels an den Furnierresten hängen und wurde so vom zu schützenden Prüfkörper abgezogen und konnte so seine Schutzfunktion nicht mehr erfüllen. Somit kann schlussgefolgert werden, dass diese Furniere für diesen Versuchsaufbau nicht geeignet sind.



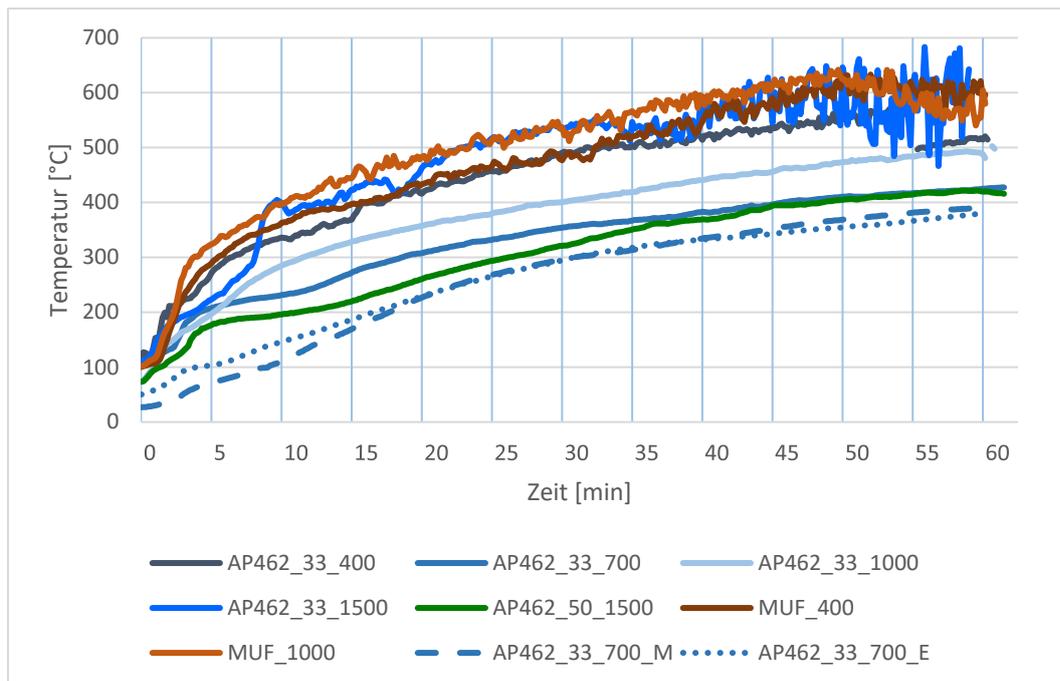
**Abb. 8: Nach oben gewölbtes, dünnes Buchenfurnier**

Des Weiteren kam es immer wieder zu Ausfällen der Temperaturmessung aufgrund unterschiedlicher Umstände, was dazu führte, dass es immer wieder zu Unterbrechungen der Temperaturkurven aufgrund fehlender Werte kam.

### Messpunkt T1

In Abb. 9 sind die Temperaturkurven für die im Vorversuch getesteten Prüfkörper für den am nächsten zur Oberfläche liegenden Messpunkt T1 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Kurven der Prüfkörper ohne Brandschutzmittel zu den höchsten, also den Kurven mit der größten Temperatur, zählen. Eine Ausnahme bildet hier der Prüfkörper AP462\_33\_1500, da dieser zum Teil noch höhere Temperaturen aufweist. Dies dürfte aber dem bereits beschriebenen Umstand des Abziehens des Brandschutzmittels durch das Furnier (vermutlich zwischen Minute 7 und 9 passiert) zuzuschreiben sein. Des Weiteren liegt die Temperaturkurve für den Prüfkörper mit Brandschutzmittel und einer Auftragsmenge von 400 g/m<sup>2</sup> nur knapp unterhalb jener der Referenzprüfkörper. Die lässt darauf schließen, dass die hier gewählte Auftragsmenge zu niedrig ist.

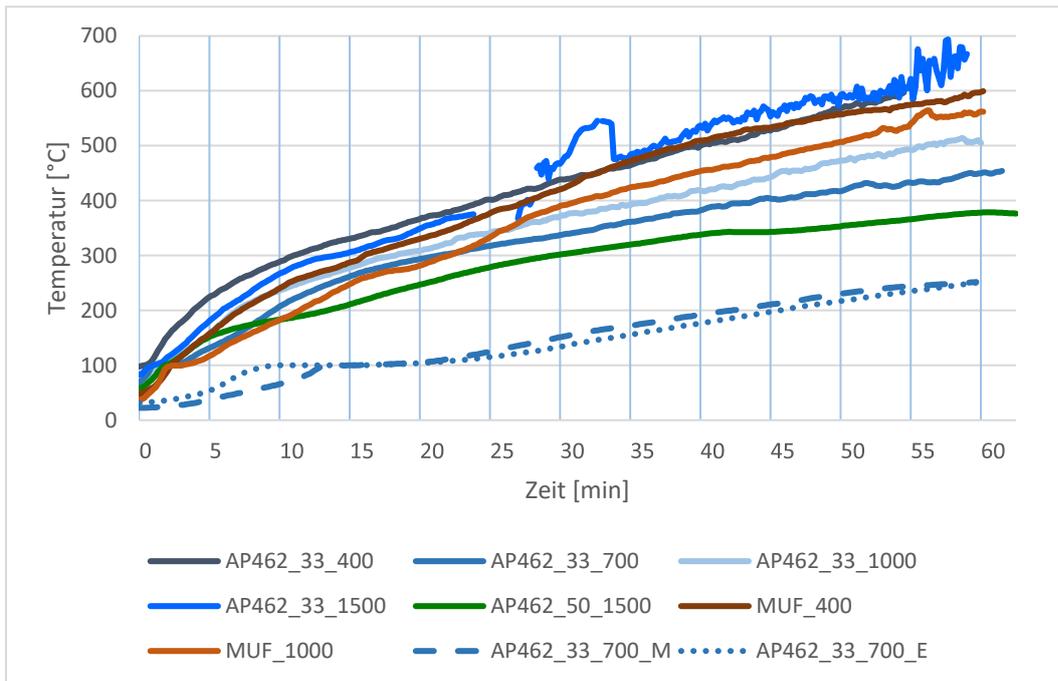
Ansonsten zeigt sich der allgemeine Trend, dass ein höherer Brandschutzmittelanteil zu niedrigeren Temperaturen in einer Tiefe von 1 mm unter der Klebefuge führt und dass vermutlich auch die Auftragsmenge einen Einfluss auf die Temperatur haben kann. Bei den beiden Prüfkörpern mit den stärkeren Oberflächen lässt sich sagen, dass zwischen ihnen zwar kaum ein Unterschied zu sehen ist, jedoch im Vergleich zu den Prüfkörpern mit Buchenfurnieroberfläche deutlich geringere Temperaturen aufweisen. Dies mag zweierlei Gründe haben, einerseits ist die Problematik des Abziehens von Brandschutzmittel deutlich geringer, da sich diese Oberflächen im Brandfall nicht aufstellen. Andererseits benötigt die stärkere Oberfläche natürlich auch viel länger bis sie verbrannt ist. Wenn man jedoch die zuvor beschriebene zeitliche Verzögerung von ca. 10 Minuten aufgrund der Substratdicke berücksichtigt, zeigt sich dass diese Prüfkörper trotzdem zumindest gleich gut bzw. zum Teil sogar besser abschneiden als jene mit dünneren Oberflächen.



**Abb. 9: Temperaturentwicklung am Messpunkt T1 (1 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup>). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.**

## Messpunkt T2

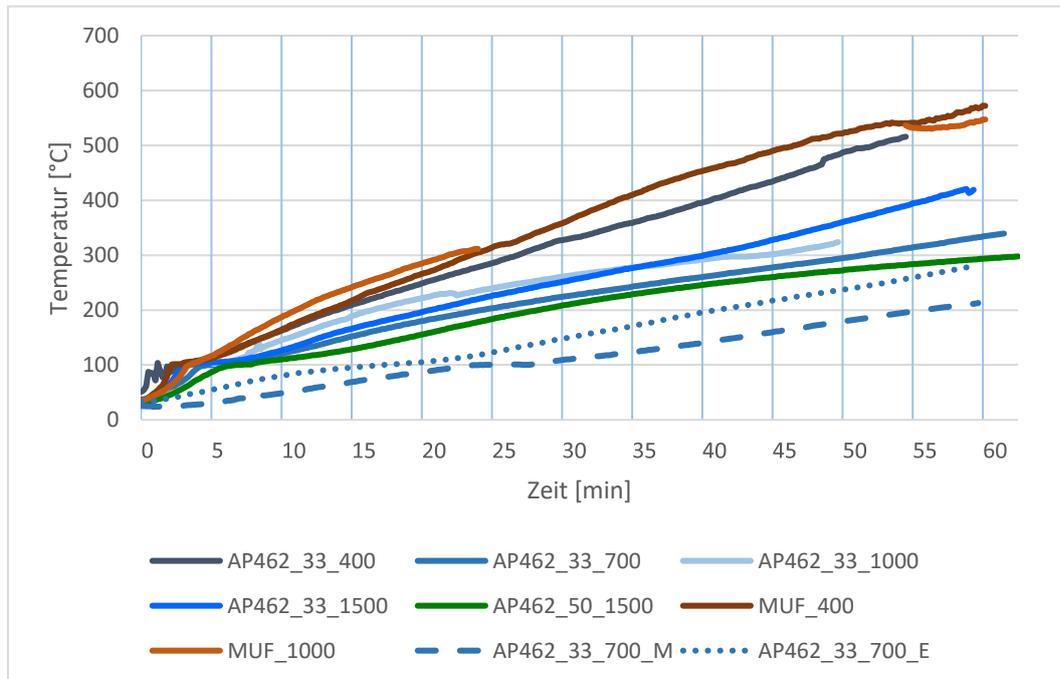
Vergleicht man die in Abb. 10 dargestellten Temperaturkurven der Referenzprobe MUF\_400 und der Probe AP462\_33\_700, erkennt man eine Temperaturdifferenz von 150 °C nach 60 Minuten Prüfzeit durch den Einsatz des Brandschutzmittels. Aber vor allem die Varianten mit den stärkeren Oberflächen weisen signifikant niedrigere Temperaturen mit einem Unterschied gegenüber der Referenz von etwa 350 °C nach 60 Minuten durchgehender Beflammung auf. Dies zeigt, dass es durch den Einsatz von Brandschutzmittel schon in etwa 5 mm unter der Klebefuge zu wesentlichen Unterschieden in der Temperaturbeanspruch kommen kann.



**Abb. 10: Temperaturentwicklung am Messpunkt T2 (5 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup>). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.**

### Messpunkt T3

Wie in Abb. 11 zu sehen ist, nimmt mit zunehmender Tiefe im Prüfkörper auch der Temperaturunterschied zwischen den Proben mit Brandschutzmittel und den Referenzproben zu. Einzig der Prüfkörper mit 400 g/m<sup>2</sup> Brandschutzklebstoff liegt im Bereich der Referenzen, höhere Auftragsmengen zwischen 700 und 1500 g/m<sup>2</sup> unterscheiden sich bis zu 200 °C (33,3% Brandschutzmittel) bzw. 250 °C (50% Brandschutzmittel) bei gleicher Oberfläche.

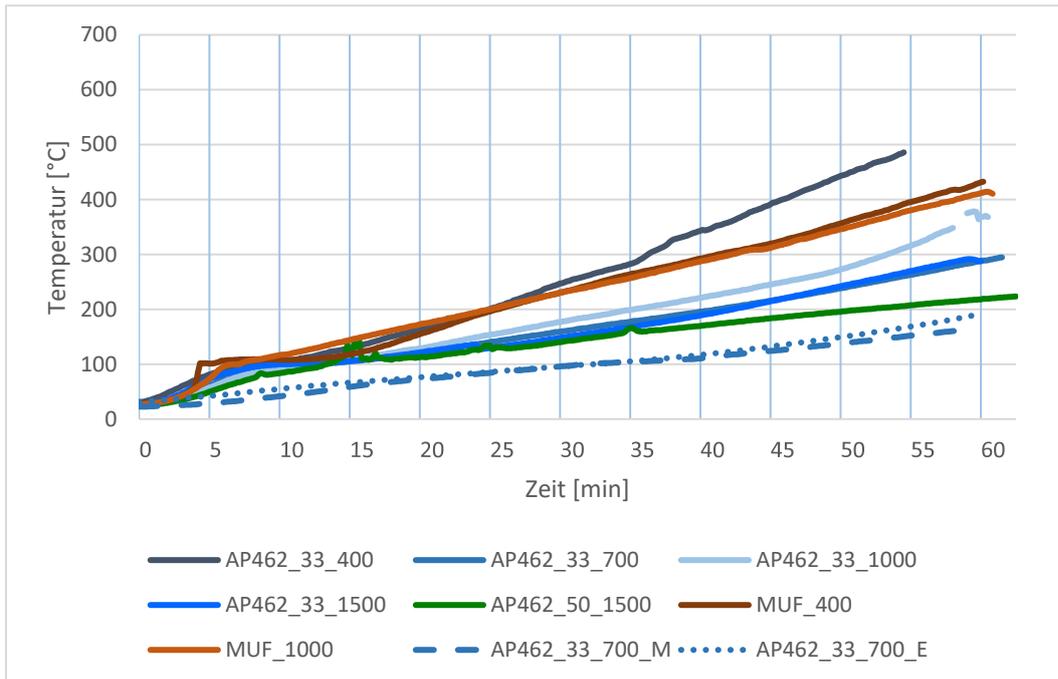


**Abb. 11: Temperaturentwicklung am Messpunkt T3 (10 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup>). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.**

## Messpunkt T4

Die Ergebnisse des Messpunktes T4 zeigen, dass es in einer Tiefe von 15 mm unter der Klebefuge durch den Einsatz von Brandschutzmittel zu Temperaturen kommt, die teils weit unter dem Zündpunkt von Holz liegen. Bei den Referenzproben (MUF\_400 bzw. MUF\_1000) ist dies nicht der Fall, hier übersteigt die Temperatur bereits nach etwa 40 Minuten Prüfdauer diesen Wert (Abb. 12).

Jedoch erkennt man auch hier die Probleme der Temperaturmessung. So liegt nämlich die Kurve der Probe AP423\_33\_400 zum Teil deutlich über den Kurven der Referenz, was bedeuten würde, dass der Einsatz von Brandschutzmitteln zu einer Verschlechterung der Brandschutzeigenschaften führen würde.



**Abb. 12: Temperaturentwicklung am Messpunkt T4 (15 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m<sup>2</sup>). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.**

### Zusammenfassung Vorversuch

Das wichtigste Fazit des Vorversuches der Brandprüfung ist definitiv, dass der vorhandene Brandstand für Prüfungen dieser Art geeignet ist. Es konnten klare Aussagen über Unterschiede in der Temperaturentwicklung zwischen Referenzproben und jenen mit Brandschutzmittel getroffen werden.

Zusammenfassend lässt sich über die Ergebnisse des Vorversuches der Brandprüfung sagen, dass der Einsatz von Brandschutzmittel zu einer signifikanten Reduktion der Temperatur im Prüfkörper führt. Jedoch kann festgestellt werden, dass eine Auftragsmenge von 400 g/m<sup>2</sup> zu wenig ist und keinen signifikanten Brandschutz gewährleisten kann.

Eine höhere Konzentration von Brandschutzmittel im Klebstoff führt zwar zu einer weiteren Verbesserung dieses Effektes, jedoch ist ein so hoher Feststoffanteil bei diesem Versuchsdesign nicht verarbeitbar. Aus diesem Grund wurde entschieden, zukünftige Versuche mit einem Verhältnis von Brandschutzmittel zu Klebstoff und Härter von 1:1:1 durchzuführen.

Da es zwischen den beiden Oberflächen MDF-Platte und Fichtenlamelle so gut wie keine Unterschiede gab, wurde für die weiteren Versuche auf die MDF-Platte verzichtet. Bezüglich der Auftragsmengen konnte aufgrund dieses Versuches keine Einschränkung gemacht werden, da wegen des bereits beschriebenen Problems des Abziehens der Brandschutzschicht darüber keine Aussage getroffen werden konnte.

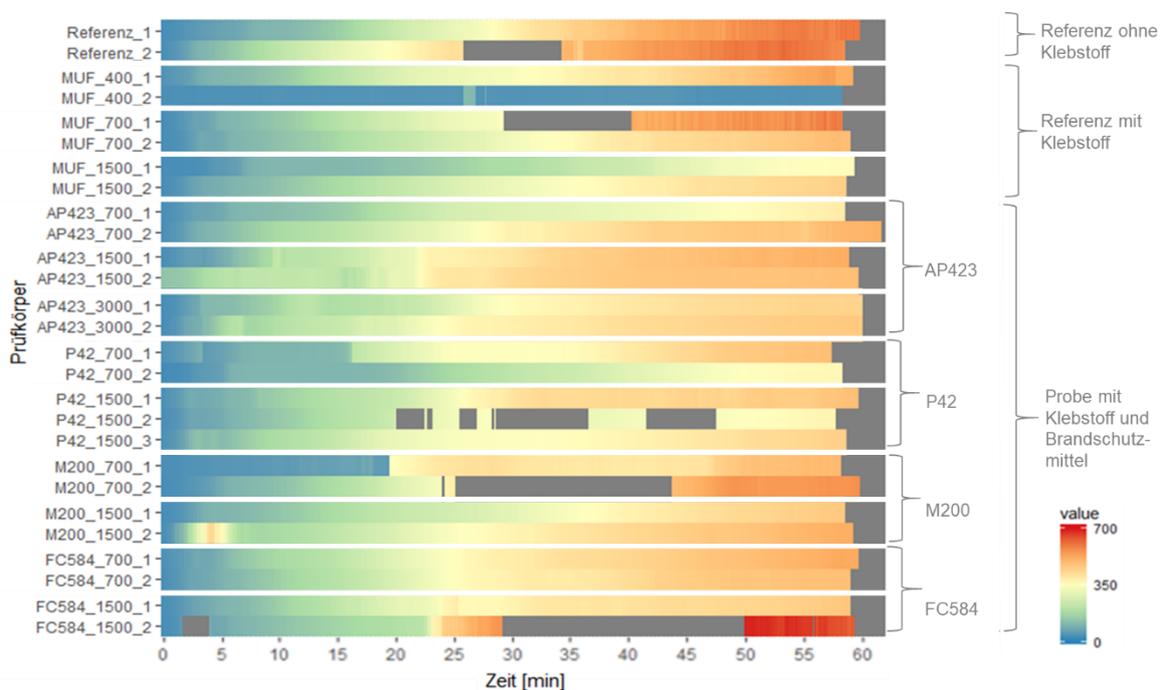
### **3.2.2 Hauptversuch**

Ziel dieses Versuches war es, einen Vergleich der Temperaturentwicklungen in verschiedenen Tiefen zwischen Vollholzproben, Proben mit Referenzklebstoff und ausgewählten Brandschutzklebstoffen herzustellen.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde aufgrund der Menge an Daten ein Carpet-Diagramm (Schneider, 2000) gewählt. Dabei werden Temperaturveränderungen über die Zeit durch eine Veränderung der Farbe dargestellt. Fehlende Datensätze wurden mit grauer Farbe hinterlegt.

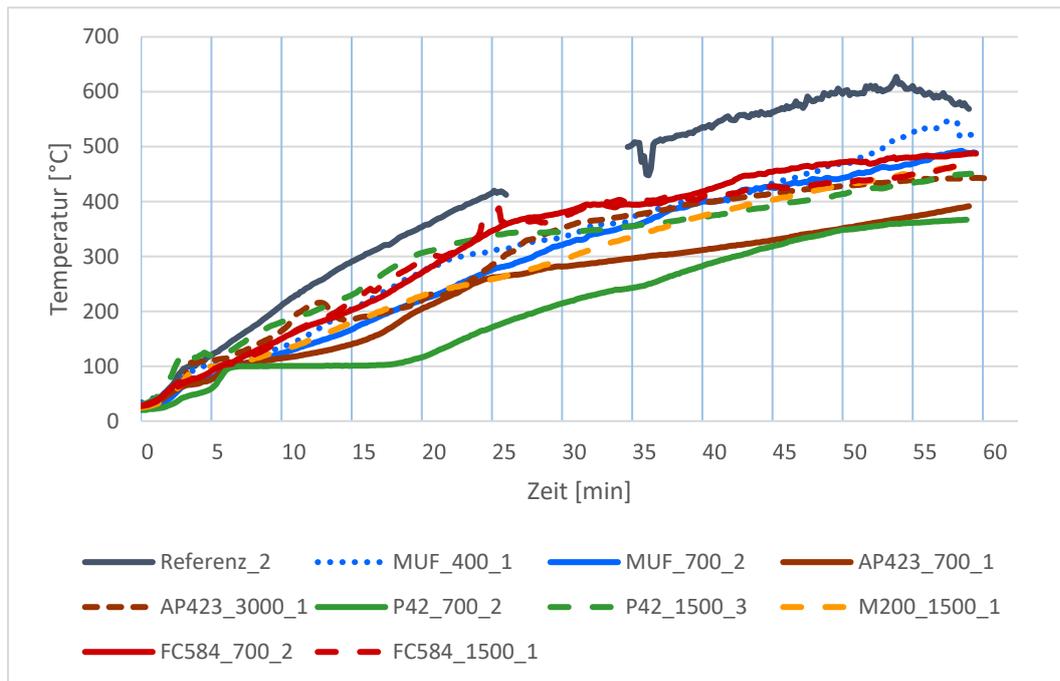
## Messpunkt T1

Der Messpunkt 1 zeichnet sich aufgrund seiner unmittelbaren Nähe zur Flamme und der damit verbundenen hohen Temperatureinwirkung als fehleranfälligster Messpunkt aus. Dies ist in Abb. 13 sehr gut an der Referenzprobe ohne Brandschutzmittel MUF\_400\_2 zu erkennen, da hier im Brandversuch über 60 Minuten fast durchgehend eine Temperatur von 30 - 40 °C gemessen wurde. Dies kann sowohl durch die weiteren Referenzproben als auch durch die Ergebnisse der in dieser Probe darunterliegenden Messpunkte T2-T4 als Messfehler identifiziert werden. Auch abrupte Temperatursprünge von 300 °C (M200\_700\_1), fehlende Temperaturwerte (Referenz\_2, MUF\_700\_1, etc.) oder abfallende Temperaturen trotz kontinuierlicher Beflammung (FC584\_1500\_2) können so erklärt werden.



**Abb. 13: Temperaturentwicklung am Messpunkt T1 (8 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

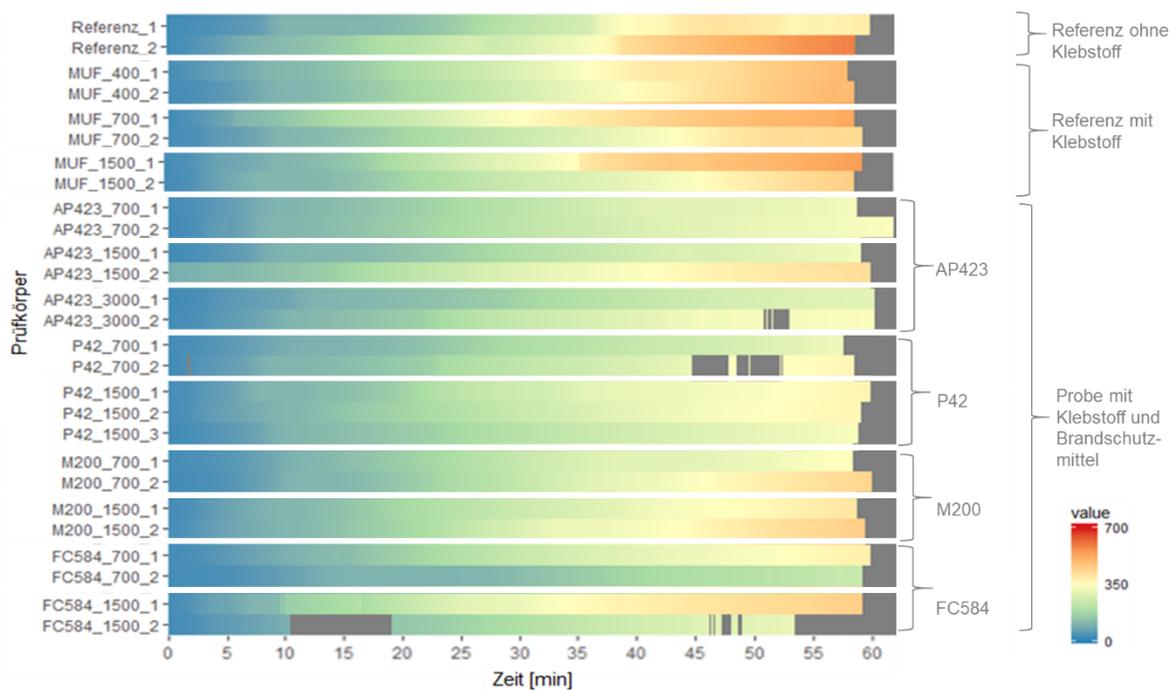
Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Einzelergebnisse, vor allem im Messpunkt 1, fehleranfällig sind, jedoch die Gesamtbetrachtung Aussagen über die Wirksamkeit des Brandschutzmittels zulässt. Um dies zu verdeutlichen, wurden in Abb. 14 mehrere Temperaturkurven ausgewählt, die den Effekt von Brandschutzmittel in der Klebefuge verdeutlichen sollen. Hierbei ist zu erkennen, dass es durch den Einsatz von Brandschutzmittel möglich ist, nach 60 Minuten Belastung durch die Gasflamme eine um etwa 100 - 150 °C niedrigere Temperatur zu messen (Vergleich Referenz bzw. MUF400\_1 vs. AP423\_700\_1). Dabei kann jedoch nicht erkannt werden, dass die Auftragsmenge einen Einfluss auf diesen Effekt zeigt.



**Abb. 14: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T1 (8 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

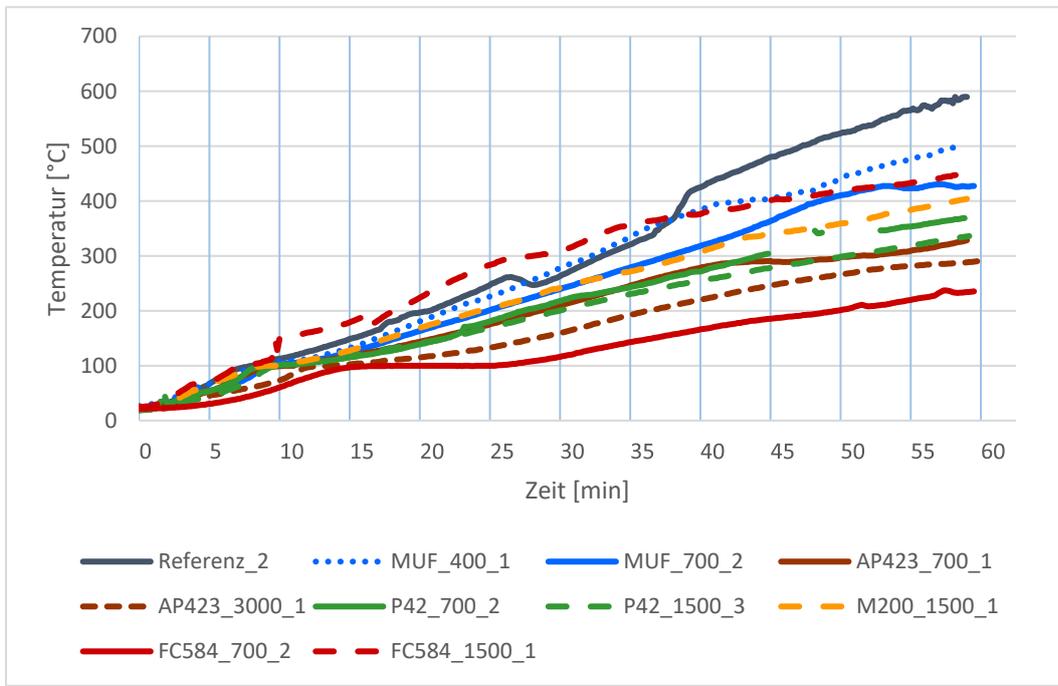
## Messpunkt T2

Im Messpunkt T2 sind die Auswirkungen des Brandschutzmittels am deutlichsten zu erkennen. In Abb. 15 ist zu sehen, dass die die Referenzproben sowie jene ohne Brandschutzmittel zu den Proben mit den höchsten Temperaturwerten nach 60 Minuten Prüfzeit zählen. Dies wiederum bedeutet, dass der Einsatz von Brandschutzmittel zu einer um bis zu 350 °C niedrigeren Temperatur nach 60 Minuten Brandbelastung führen kann.



**Abb. 15: Temperaturentwicklung am Messpunkt T2 (12 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

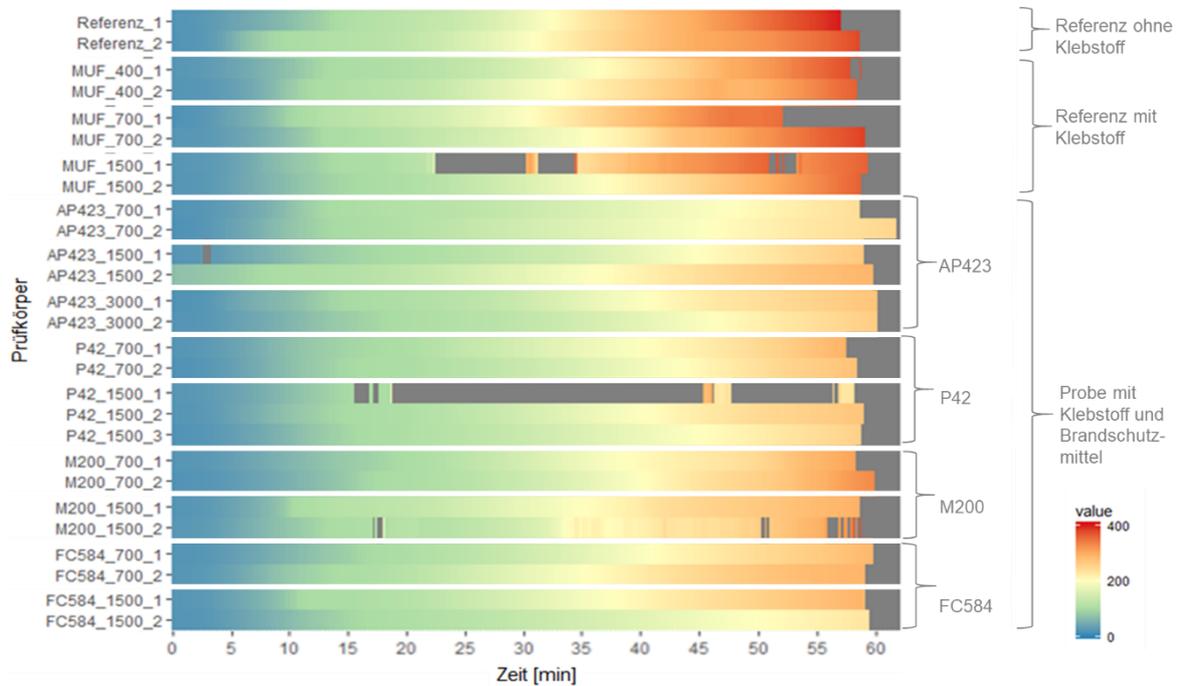
Dieses Potential wird vor allem in Abb. 16 deutlich. Hier ist zu sehen, dass die Referenzprobe am Ende der Prüfzeit am Messpunkt T2 bereits eine Temperatur von 600 °C aufweist, während Proben mit Brandschutzmittel zum Teil Temperaturen unter 300 °C erreichen. Auf jeden Fall aber liegen diese mit einer Ausnahme (FC584\_1500\_2) unter 400 °C.



**Abb. 16: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T2 (12 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

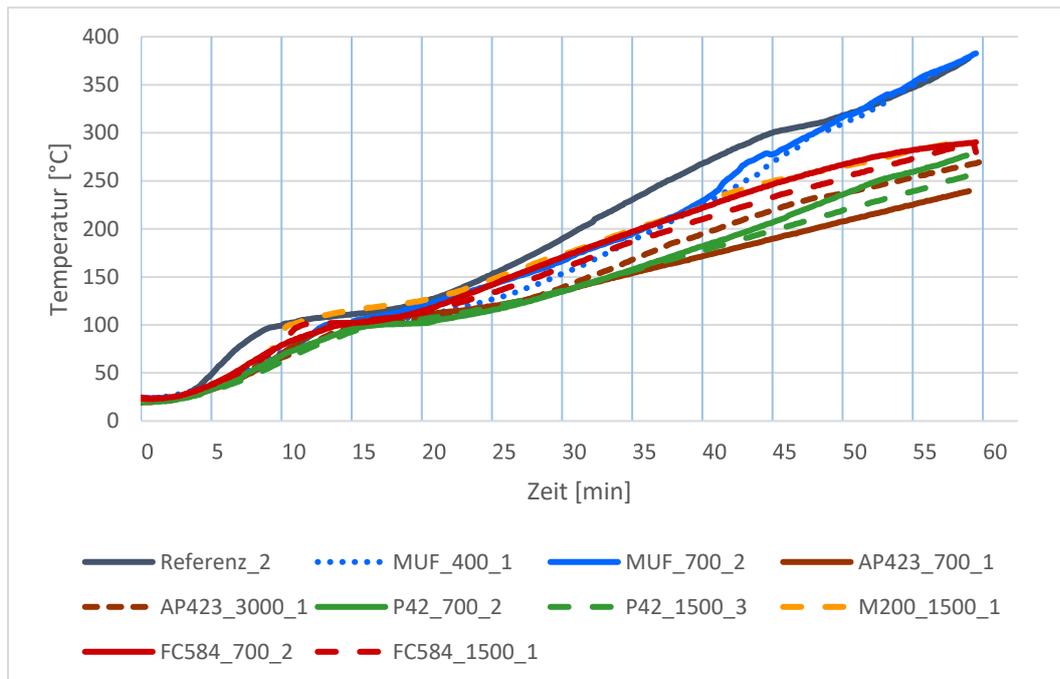
## Messpunkt T3

In Abb. 17 setzt sich der Trend der beiden bereits beschriebenen Messpunkte fort. Auch hier ist zu erkennen, dass die Referenzproben bzw. die Proben ohne Brandschutzmittel höhere Temperaturen aufweisen, als die übrigen Prüfkörper.



**Abb. 17: Temperaturentwicklung am Messpunkt T3 (17 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer..**

Bei den ausgewählten Temperaturkurven des Messpunktes T3 ist vor allem gegen Ende der Temperaturaufzeichnungen einen deutlichen Unterschied durch die Verwendung von Brandschutzmittel zu sehen (Abb. 18). Diese weisen allesamt Temperaturen unter 300 °C auf und liegen somit mehr als 100 °C unter den unbehandelten Referenzproben. Daraus lässt sich schließen, dass es zu einer Verbesserung des Brandschutzes durch den Einsatz von Brandschutzmitteln kommt.



**Abb. 18: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T3 (17 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

## Messpunkt T4

Die am Messpunkt T4 ermittelten Temperaturen der Proben mit Brandschutzmittel liegen zum Ende der Prüfzeit alle unter 250 °C, der Großteil der Prüfkörper erreicht nie mehr als 200 °C. Einzig einige Referenzproben erreichen Temperaturen jenseits der 250 °C, wobei der Prüfkörper MUF\_1500\_1 hier ausgenommen sei, da davon auszugehen ist, dass es bei der Aufzeichnung der Temperatur zu Fehlern gekommen ist (Abb. 19).

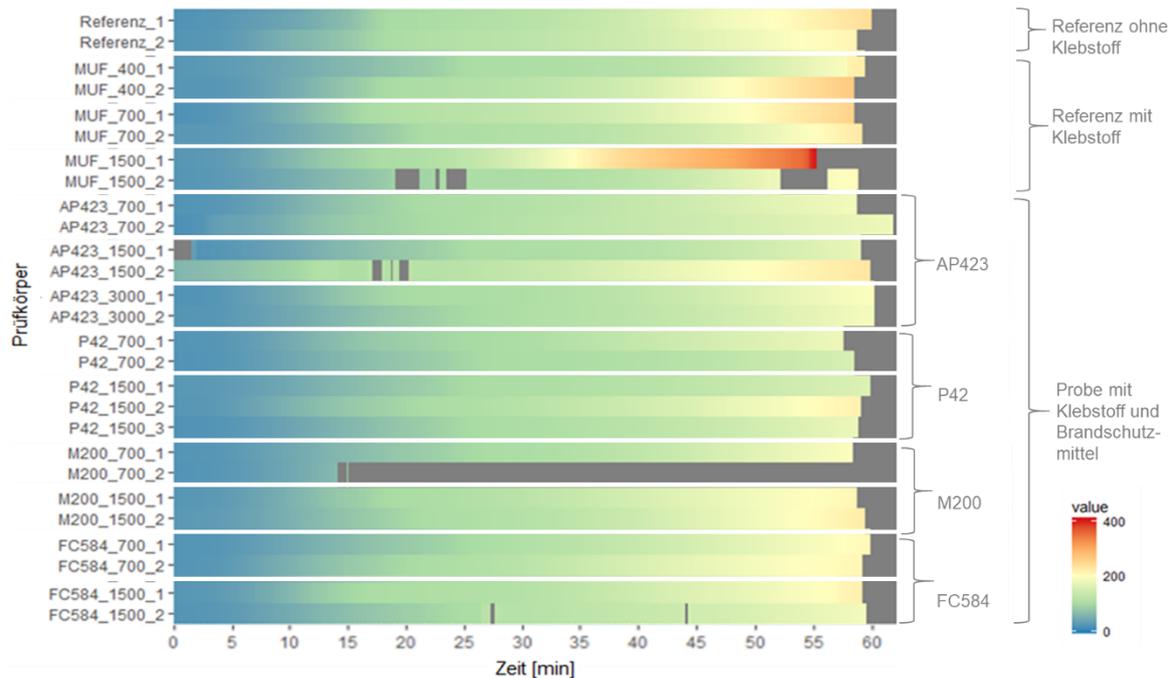
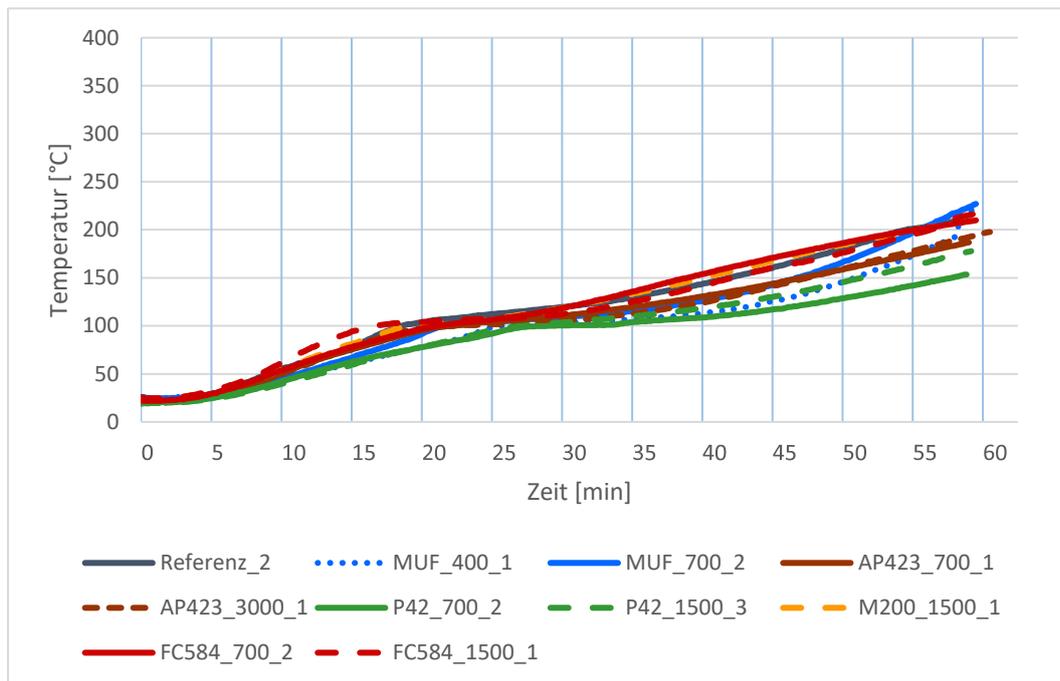


Abb. 19: Temperaturentwicklung am Messpunkt T4 (22 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer..

Auch Abb. 20 zeigt, dass es durch den Einsatz von Brandschutzmittel zu einer Reduktion der Temperatur nach 60 Minuten von über 100 °C kommen kann.



**Abb. 20: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T4 (22 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>) sowie Probennummer.**

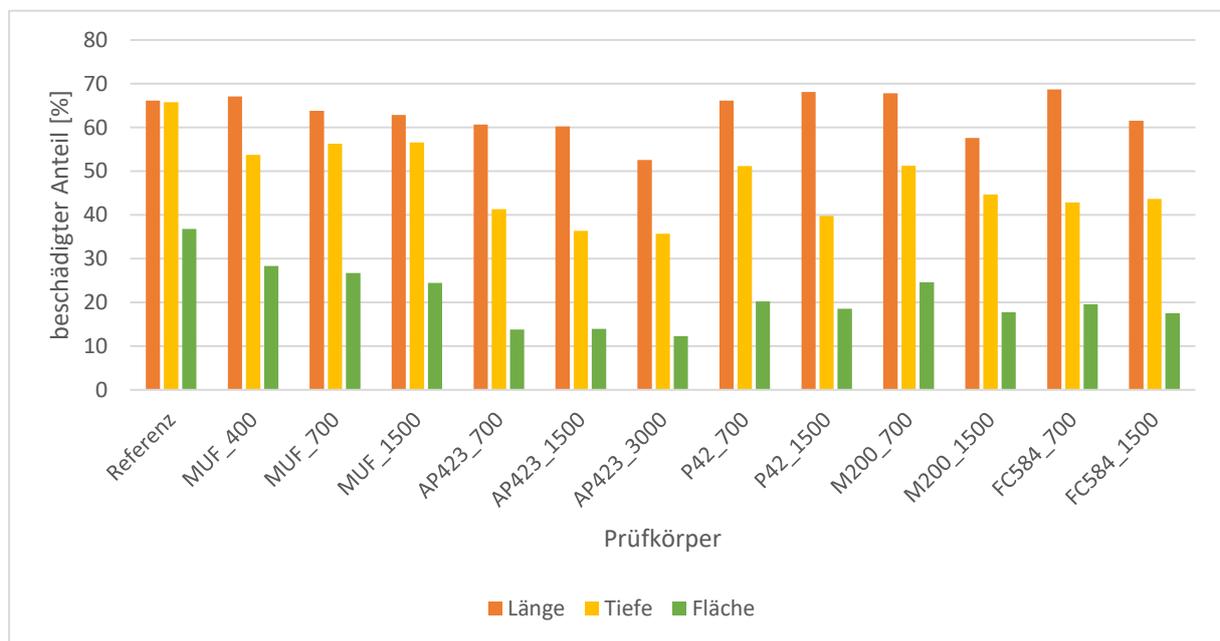
### 3.2.2.1 Vermessung des Abbrandes

In Abb. 21 sind die Ergebnisse der Vermessung des Abbrandes dargestellt. Zur besseren Darstellung wurden die Werte der einzelnen Prüfkörper der jeweiligen Kombinationen gemittelt und als prozentueller Anteil der Gesamtlänge, -tiefe bzw. -fläche angeführt. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass sowohl bei der verbrannten Fläche als auch bei der maximal beschädigten Tiefe mit einer Ausnahme (verbrannte Fläche der Proben M200\_1500 ist größer als bei MUF\_1500) die Referenzproben bzw. jene ohne Brandschutzmittel die höchsten Anteile aufweisen.

Interessant dabei ist, dass bei manchen Prüfkörpern mit Brandschutzmittel wie zum Beispiel P42\_1500, M200\_700 oder FC584\_700 die maximale Länge der beschädigten Fläche größer war als bei den Referenzproben. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei diesen Proben dem Feuer auf Grund der reduzierten Möglichkeiten zum Brand in die Tiefe eine größere oberflächliche Ausbreitung möglich war.

Sowohl bei der verbrannten Fläche als auch bei der Tiefe schneidet die Referenzprobe ohne Klebstoff am schlechtesten ab. Das bedeutet, dass einerseits schon der Einsatz von handelsüblichem MUF-Klebstoff der Abbrand reduziert werden kann. Mischt man jedoch auch noch Brandschutzmittel unter diesen Klebstoff, kann die verbrannte Tiefe wie bei der Probe AP423\_3000 auf knapp die Hälfte bzw. die beschädigte Fläche auf unter ein Drittel der Werte der Vollholzprobe reduziert werden.

Wichtig für den Brandschutz ist es aber, dass die Tiefe des abgebrannten Bereichs minimiert wird, um die statische Tragfähigkeit so lange wie möglich aufrecht zu erhalten. Somit kann gesagt werden, dass der Einsatz von Brandschutzmittel zu einer Verringerung der Zerstörung des geprüften Holzvolumens führte und damit die Tragfähigkeit der geschützten Teile länger erhalten werden kann.



**Abb. 21: Vergleich der gemittelten Vermessungsergebnisse der verbrannten Querschnittsfläche der im Hauptversuch der Brandprüfung verwendeten Prüfkörper mit einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, je einer Probe mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>).**

### 3.3 Ermittlung der Zugscherfestigkeit

#### 3.3.1 Ermittlung der Zugscherfestigkeit an Fichtenproben

Die im Vorversuch verwendeten Prüfkörper wurden allesamt mit Fichtenlamellen hergestellt. Aufgrund der geringeren Festigkeitseigenschaften von Fichte gegenüber der laut EN 205 vorgeschriebenen Buche sind die in der Norm gesetzten Festigkeitsgrenzwerte von 10 N/mm<sup>2</sup> schon aufgrund der Holzart nicht zu erreichen. Diese Prüfanordnung wurde jedoch so gewählt, um Kombinationen ausschließen zu können, die sogar in diesem Versuchsdesign nicht bestehen können.

Bei Betrachtung der Ergebnisse (Abb. 22) erkennt man, dass sich die Zugscherfestigkeit durch den Zusatz von Brandschutzmitteln tendenziell verschlechtert.

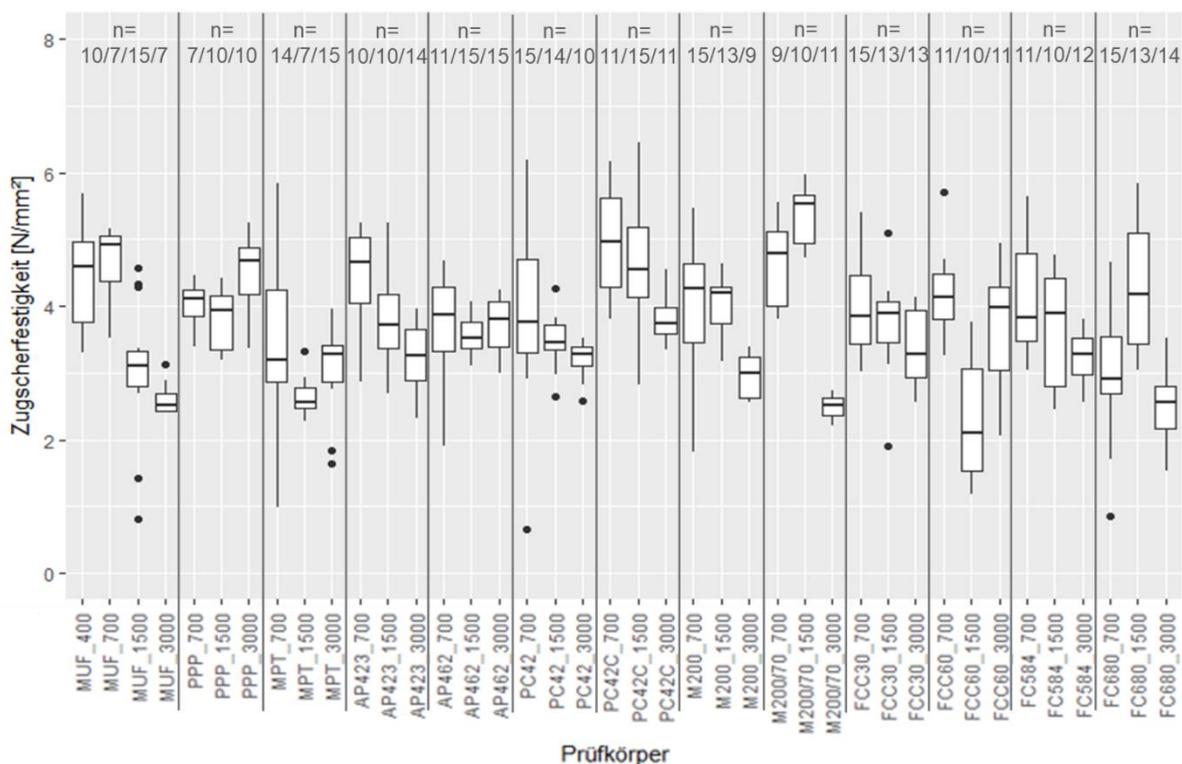


Abb. 22: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Fichtenproben mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (PPP, MPT, AP423, AP462, PC42, PC42C, M200, M200/70, FCC30, FCC60, FC584, FC680). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer.

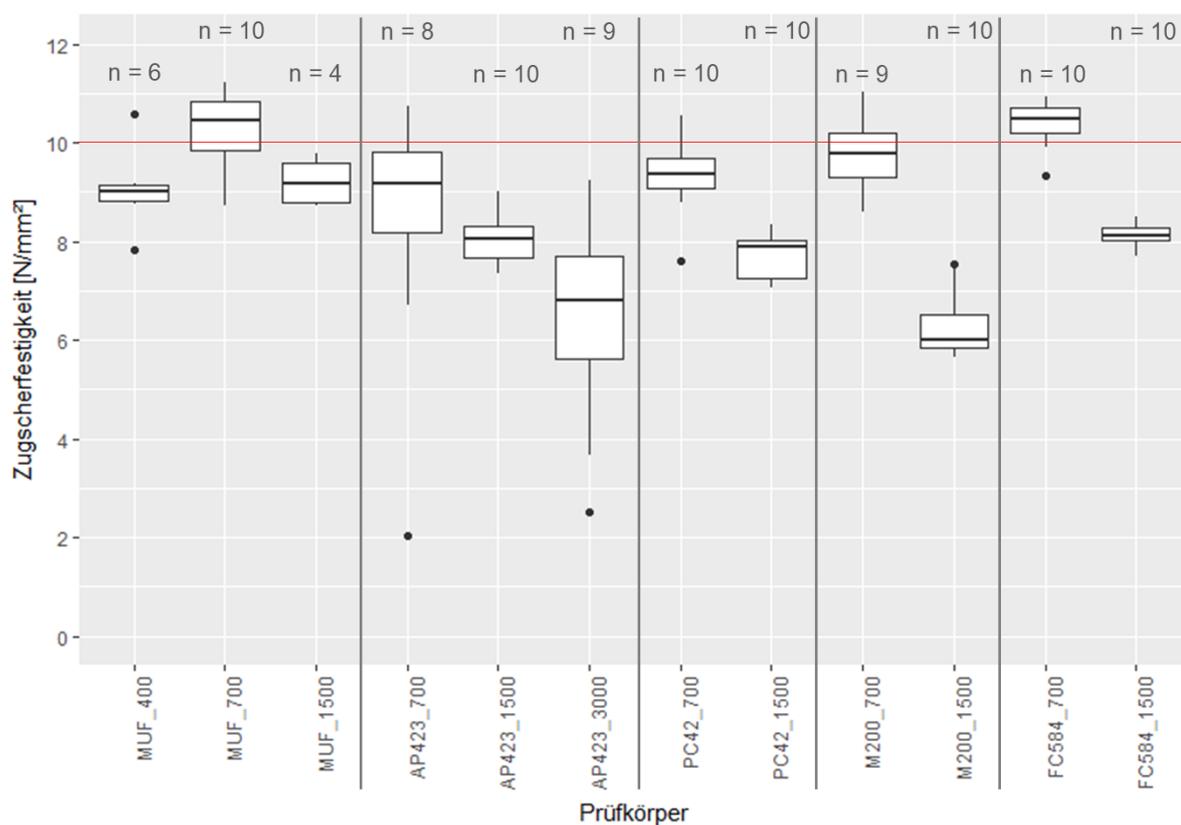
Der Vergleich der verschiedenen Kombinationen ist schwierig, da es wie bereits beschrieben während dem Pressvorgang zu einem Austritt von Klebstoff kam. Aus diesem Grund wurden die Dicken der Klebefugen nach dem Aushärten vermessen. Diese Ergebnisse sowie jene der Beurteilung des Holzbruchanteiles der Proben der Zugscherprüfung finden sich im Anhang in Tab. 6. Auf Basis der Zugscherfestigkeiten, der Ergebnisse der Bewertung des jeweiligen Holzbruchanteils, der Klebefugendicke sowie der optischen Bewertung der Klebefugen wurden die in 2.4.2.4 beschriebenen Brandschutzmittel für die weiteren Versuche ausgewählt.

### **3.3.2 Ermittlung der Zugscherfestigkeit an Buchenproben**

Die Ergebnisse der Zugscherprüfung an Buchenproben als Maß für die Verklebungsfestigkeit sollen hier dargestellt werden. Da die Prüfkörper, um den Einfluss von Feuchtigkeit auf die Verklebungsfestigkeit zu ermitteln, die verschiedenen Lagerungsfolgen der Beanspruchungsgruppe D3 nach EN 204 (2016) durchlaufen haben, werden sie in den jeweiligen Auswertungen den Mindestklebefestigkeiten der Norm gegenübergestellt. Diese werden in den Grafiken durch die rote Linie dargestellt und liegt bei der Lagerungsfolge 1 bei 10 N/mm<sup>2</sup>, bei Lagerungsfolge 3 bei 2 N/mm<sup>2</sup> und bei Lagerungsfolge 4 bei 8 N/mm<sup>2</sup>. Dabei ist zu erwähnen, dass der Mittelwert der geprüften Proben über diesem Grenzwert liegen muss.

## Lagerungsfolge 1

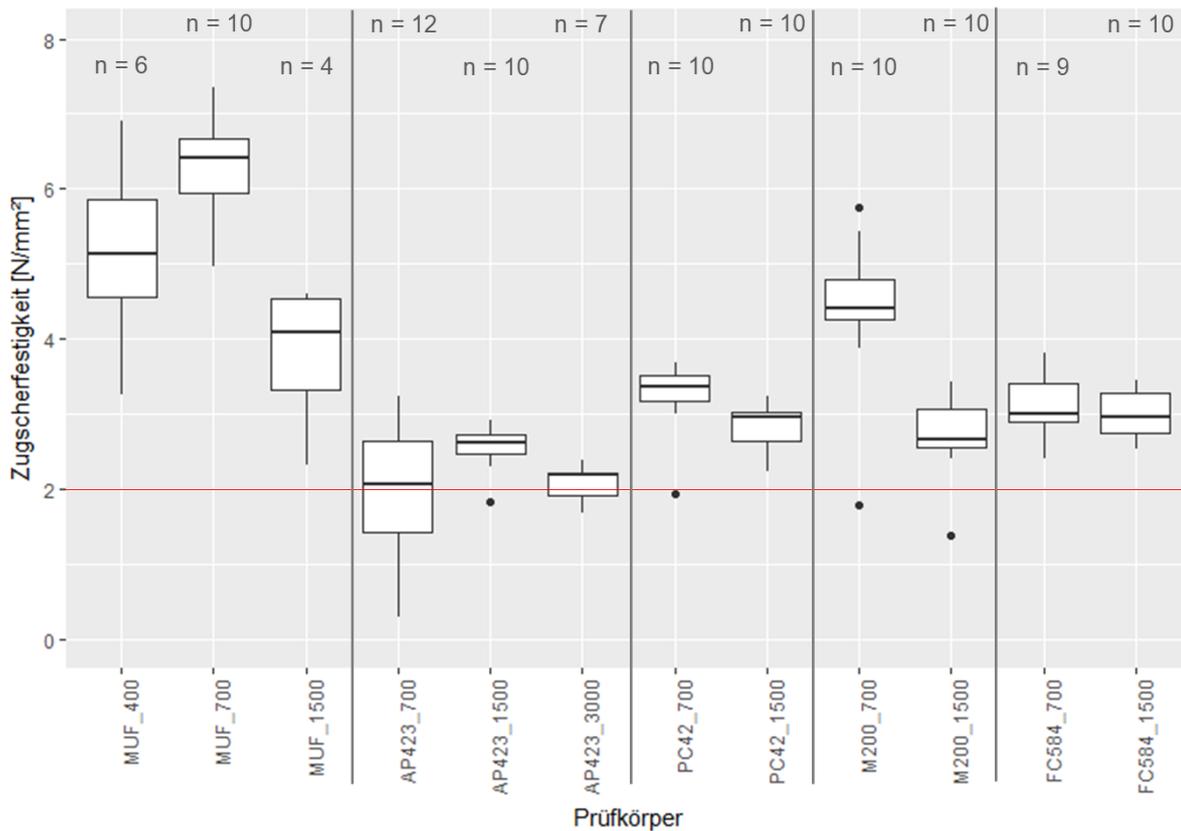
In Abb. 23 ist zu erkennen, dass im vorliegenden Versuch nur zwei Kombinationen (MUF\_400, FC584\_700) die Anforderungen der Norm erreichen. Vor allem bei den Kombinationen mit Brandschutzmittel lässt sich sagen, dass höhere Auftragsmengen zu geringeren Zugscherfestigkeiten führen. Zwar muss festgestellt werden, dass mit Ausnahme einer Kombination mit Brandschutzmittel keine dieser die geforderten Mindestwerte der Lagerungsfolge 1 erreicht, jedoch liegen vor allem die Ergebnisse der Varianten mit 700 g/m<sup>2</sup> Auftragsmenge nicht weit vom Grenzwert entfernt. Dies zeigt, dass jedenfalls Potential vorhanden ist, dass diese Grenzwerte durch eine Optimierung der Zusammensetzung des Brandschutzmittelklebstoffs erreicht werden können. Ob dies auch für höhere Auftragsmengen gilt ist fragwürdig und müsste mit weiteren Versuchen ermittelt werden.



**Abb. 23: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 1 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584. Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer.**

### Lagerungsfolge 3

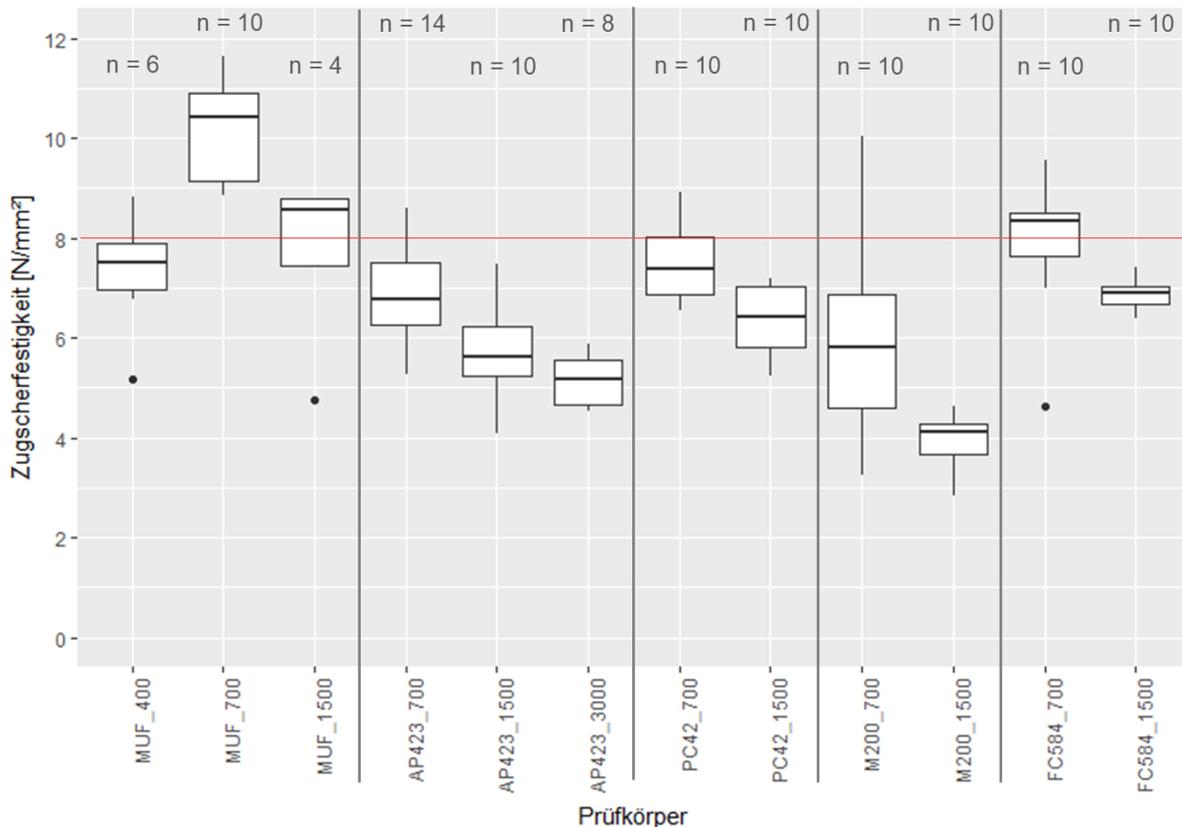
Die in Abb. 24 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass alle geprüften Kombinationen die Anforderungen der Norm erfüllen, wenn auch nur sehr knapp (AP423\_700). Vor allem die Variante M200\_700 weist mit einer mittleren Zugscherfestigkeit von 4,4 N/mm<sup>2</sup> sehr gute Ergebnisse in diesem Versuch auf. Auch hier zeigt sich wieder, dass in den meisten Fällen höhere Auftragsmengen zu niedrigeren Zugscherfestigkeiten führen. Als Ausnahmen sind hier nur die Referenzprobe MUF\_400 sowie die Variante mit Brandschutzmittel AP423\_700 zu nennen, deren Zugscherfestigkeit unter jener der jeweiligen Prüfkörper mit gleichem Aufbau aber nächsthöherer Auftragsmenge liegt.



**Abb. 24: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 3 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584. Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer.**

## Lagerungsfolge 4

Die laut EN 204 geforderten Zugscherfestigkeiten nach der Lagerungsfolge 4 konnten nur zwei Kombinationen erfüllen. Sowohl die Referenzprobe ohne Brandschutzmittel MUF\_700, als auch die Variante FC584\_700 konnten diesen Wert sehr knapp erreichen. Wie bereits bei den vorherigen Versuchen erwähnt, gilt auch hier, dass eine Erhöhung der Auftragsmenge die Zugscherfestigkeit verringert.



**Abb. 25:** Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 4 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584. Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m<sup>2</sup>). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer.

## Zusammenfassung Hauptversuch

Zusammenfassend lässt sich über den Hauptversuch sagen, dass abgesehen von den Referenzproben nur die Kombination aus dem Klebstoffsystem und dem Brandschutzmittel FR CROS 584 mit einer Auftragsmenge 700 g/m<sup>2</sup> die Prüfung nach EN 204 bestehen konnte. Da jedoch die anderen Kombinationen, vor allem bei geringeren Auftragsmengen, zum Teil nur knapp die Anforderungen der Norm nicht erfüllten, scheint es Potential zu geben, dass sich dies durch eine Optimierung der Klebstoffzusammensetzung lösen lässt. Hierbei gilt es vor allem, das Augenmerk auf die Lagerungsfolgen 1 und 4 zu legen, da hier die Schwachstellen der Brandschutzklebstoffe liegen. Da es auch hier aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Brandschutzmittelklebstoffe zu verschiedenen Klebefugendicken gekommen ist, findet sich im Anhang in Tab. 7 eine detaillierte Darstellung dieser. Dort sind auch die Mittelwerte der Ergebnisse der Zugscherprüfung sowie die jeweiligen Holzbruchanteile dargestellt.

## 4 Schlussfolgerung

Als Ergebnis dieser Arbeit lässt sich zusammenfassen, dass es möglich ist, die Brandeigenschaften von Brettsperrholz durch den Einsatz von Brandschutzmitteln in der Klebefuge zu verbessern. Es hat sich gezeigt, dass sich das Klebstoffsystem mit den meisten geprüften Brandschutzmitteln kombinieren lässt und trotzdem noch reaktiv bleibt, wobei es hier allerdings zu einer Verringerung dieser Reaktivität kommt. Weiters konnte festgestellt werden, dass sich die Temperatur im Brandversuch durch den Einsatz intumeszierender Systeme schon wenige Millimeter unter der Klebefuge um bis zu 350 °C reduzieren lässt. Daraus lässt sich schließen, dass die durch das Brandschutzmittel geschützten Holzschichten weit langsamer verbrennen als ungeschützte. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es nach 60 Minuten Brandlast zu einem größeren tragfähigen Restquerschnitt kommt, was dazu führt, dass das Holzbauteil entweder dem Brand länger standhält oder dass der Querschnitt des Holzbauteiles bei gleicher Widerstandszeit reduziert werden kann. Jedoch konnte kein eindeutiger Einfluss der Klebstoffauftragsmenge auf das Ergebnis der Brandversuche festgestellt werden. Einzig im Vorversuch zeigte sich, dass es erst bei 700 g/m<sup>2</sup> zu einer relevanten Temperaturdifferenz nach 60 Minuten Prüfzeit kommt, verglichen mit den Referenzproben. Bei 400 g/m<sup>2</sup> Auftragsmenge konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden.

Wie sich in den Versuchen weiters gezeigt hat, wird die Zugscherfestigkeit des Klebstoffes durch die Zugabe von Brandschutzmitteln zum Teil erheblich reduziert. Auch hat sich gezeigt, dass die Auftragsmenge einen negativen Einfluss auf das Ergebnis der Zugscherprüfung hatte. Jedoch kann festgehalten werden, dass eine Brandschutzmittel-Klebstoff Kombination die Anforderungen der betreffenden Norm (EN 204, 2016) für die Beanspruchungsgruppe D3 trotz dieser Festigkeitsreduktion erfüllte und mehrere nur knapp scheiterten. Dabei erwiesen sich vor allem die Lagerungsfolgen 1 und 4 als problematisch. Dieses Problem sollte aber durch Anpassungen des Klebstoffs auf diese neue Anwendung lösbar sein und könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Abschließend lässt sich also sagen, dass es möglich ist die Brandschutzeigenschaften des Klebstoffes durch den Einsatz von Brandschutzmitteln zu steigern. Dies erfordert jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit, vor allem zur Steigerung der Festigkeit der Klebstoffe mit Brandschutzmitteln. Aber auch wirtschaftliche Aspekte sowie Verarbeitbarkeit im industriellen Maßstab waren nicht Teil dieser Arbeit und müssen gesondert beleuchtet werden.

## 5 Ausblick

Aufgrund der durchwegs positiven Ergebnisse dieser Arbeit wurde bereits ein weiterer Brandversuch in weit größerem Maßstab am Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung in Linz durchgeführt (Abb. 26). Auch hier wurde das Bauteil horizontal eingebaut, jedoch erfolgte die Beflammung von unten. Da auch die daraus resultierenden Ergebnisse vielversprechend waren, wird der Fokus in zukünftigen Projekten auf der Umsetzung im industriellen Maßstab liegen. Dabei wird es wichtig sein, alternative Applikationsverfahren zu finden, um den hochviskosen Brandschutzklebstoff verarbeiten und aufbringen zu können. Zudem wird es wichtig sein, die Festigkeit des Klebstoffes zu erhöhen, um die von den Normen geforderten Grenzwerte zu erreichen sowie eine umfassende wirtschaftliche Beurteilung durchzuführen.



Abb. 26: Brandprüfung in Linz

## 6 Literaturverzeichnis

- Aseeva, R., Serkov, B., & Sivenko, A. (2014). *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. Dordrecht: Springer Verlag.
- Bobacz, D. (2006). *Behavior of Wood in Case of Fire - Proposal for a Stochastic Dimensioning of Structural Elements*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Bobacz, D. et.al. (01. 04 2005). *Neue Erkenntnisse zum Brandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen*. Abgerufen am 16. 01 2018 von [www.luggin.at](http://www.luggin.at): [http://www.luggin.at/files\\_addon/projekte/Tagungsband\\_Brand\\_BO+LU.pdf](http://www.luggin.at/files_addon/projekte/Tagungsband_Brand_BO+LU.pdf)
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). *Structural Design for Fire Safety*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (2009). *Holz Brandschutz Handbuch*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG.
- DIN EN ISO 9239-1. (2010). *Prüfungen zum Brandverhalten von Bodenbelägen - Teil 1: Bestimmung des Brandverhaltens bei Beanspruchung mit einem Wärmestrahler*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dunky, M., & Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Duquesne, S., & Futterer, T. (2014). Intumescent Systems. In A. B. Morgan, & C. A. Wilkie, *Non-Halogenated Flame Retardant Handbook* (S. 293-346). Beverly, MA: Scrivenger Publishing.
- EN 13501-1. (2010). *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- EN 13501-2. (2016). *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- EN 14081. (2012). *Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- EN 1995-1-2. (2010). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- EN 204. (2016). *Klassifizierung von thermoplastischen Holzklebstoffen für nichttragende Anwendungen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- EN 205. (2016). *Klebstoffe – Holzklebstoffe für nichttragende Anwendungen – Bestimmung der Klebfestigkeit von Längskleblagen im Zugversuch*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- EN 338. (2009). *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

- Kittel, H. (2008). *Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen - Band 6*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.
- Klatt, M. (2014). Nitrogen-based Flame Retardants. In A. B. Morgan, & C. A. Wilkie, *Non-Halogenated Flame Retardant Handbook* (S. 143-168). Beverly, MA: Scrivenger Publishing.
- Konnerth, J. et.al. (23. Juli 2016). Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species. *European Journal of Wood and Wood Products*, S. 809-819.
- Niemz, P., & Sonderegger, W. (2017). *Holzphysik - Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag.
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (2015a). *OIB-Richtlinie - Begriffsbestimmungen*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik.
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (2015b). *OIB-Richtlinie 2 - Brandschutz*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik.
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (28. 11 2017). *Österreichisches Institut für Bautechnik*. Von Österreichisches Institut für Bautechnik: <https://www.oib.or.at> abgerufen
- Pech, A. et.al. (2016). *Holz im Hochbau - Theorie und Praxis*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Schneider, M. (2000). *How to generate Carpet Plots: A Guide to Creating Visual Trade Studies*. San Luis Obispo: Aeronautical Engineering, California Polytechnic State University.



## 7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Liste der APP-Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten (k.A. = keine Angabe) .....	17
Tab. 2: Liste der MPP-Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten .....	18
Tab. 3: Liste weiterer verwendeter Brandschutzmittel mit ausgewählten Kennwerten (k.A. = keine Angabe) .....	18
Tab. 4: Hergestellte Prüfkörper für den Vorversuch des Brandtests (B:H:K – Brandschutzmittel:Härter:Klebstoff) .....	22
Tab. 5: Ergebnisse der Gelierzeitbestimmung (BSM...Brandschutzmittel).....	26
Tab. 6: Darstellung der Mittelwerte der Zugscherfestigkeit und des Holzbruchanteils sowie der Ergebnisse der Klebefugendickenbestimmung des Vorversuches ....	59
Tab. 7: Darstellung der Mittelwerte der Zugscherfestigkeit und des Holzbruchanteils sowie der Ergebnisse der Klebefugendickenbestimmung des Hauptversuches	60



## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung des Brandverhaltens von Holz (Bobacz, D. et.al., 2005).....	10
Abb. 2: Versuchsaufbau Reaktivitätsmessung .....	19
Abb. 3: Brandprüfstand für horizontale Flächen in Anlehnung an DIN EN ISO 9239-1 .....	20
Abb. 4: Position der Temperaturelemente unter der Oberfläche .....	21
Abb. 5: Schematische Darstellung des Prüfkörpers .....	21
Abb. 6: Darstellung der Vermessung der maximalen Länge (rot), maximalen Tiefe (gelb) und der verbrannten Fläche (grün) .....	23
Abb. 7: Bestimmung der Klebefugendicke der Prüfkörper aus Buche (links) und Fichte (rechts) .....	25
Abb. 8: Nach oben gewölbtes, dünnes Buchenfurnier .....	28
Abb. 9: Temperaturentwicklung am Messpunkt T1 (1 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m <sup>2</sup> ). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.....	29
Abb. 10: Temperaturentwicklung am Messpunkt T2 (5 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m <sup>2</sup> ). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.....	30
Abb. 11: Temperaturentwicklung am Messpunkt T3 (10 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m <sup>2</sup> ). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.....	31
Abb. 12: Temperaturentwicklung am Messpunkt T4 (15 mm unter der Klebefuge) an Proben verklebt mit Referenzklebstoff (MUF) und mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP462). Zahlenkombination beschreibt Brandschutzmittelanteil (33 % bzw. 50 %) im Bindemittel, bzw. Auftragsmenge (400, 700, 1000 bzw. 1500 g/m <sup>2</sup> ). Buchstaben beschreiben Oberflächenmaterial: 7 mm starke Fichtenlamellen (E), MDF-Platten (M), Standard 0,5 mm Buchenfurnier.....	32

Abb. 13: Temperaturentwicklung am Messpunkt T1 (8 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer.....	34
Abb. 14: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T1 (8 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer. ....	35
Abb. 15: Temperaturentwicklung am Messpunkt T2 (12 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer.....	36
Abb. 16: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T2 (12 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer. ....	37
Abb. 17: Temperaturentwicklung am Messpunkt T3 (17 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer.....	38
Abb. 18: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T3 (17 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer. ....	39
Abb. 19: Temperaturentwicklung am Messpunkt T4 (22 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an je zwei Referenzproben ohne Klebstoff und Deckschicht, je zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie je zwei Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer.....	40

Abb. 20: Vergleich ausgewählter Temperaturkurven des Messpunktes T4 (22 mm unter der Oberfläche) im Hauptversuch der Brandprüfung an einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, an zwei Proben mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ) sowie Probennummer. ....	41
Abb. 21: Vergleich der gemittelten Vermessungsergebnisse der verbrannten Querschnittsfläche der im Hauptversuch der Brandprüfung verwendeten Prüfkörper mit einer Referenzprobe ohne Klebstoff und Deckschicht, je einer Probe mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Proben mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ). ....	42
Abb. 22: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Fichtenproben mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (PPP, MPT, AP423, AP462, PC42, PC42C, M200, M200/70, FCC30, FCC60, FC584, FC680). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer. ....	43
Abb. 23: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 1 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer. ....	45
Abb. 24: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 3 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer. ....	46
Abb. 25: Ergebnisse der Zugscherprüfung von Buchenproben nach der Lagerungsfolge 4 mit Prüfkörpern mit Referenzklebstoff (MUF) sowie Prüfkörpern mit einem mit Brandschutzmittel modifizierten Klebstoff (AP423, PC42, M200, FC584). Zahlenkombination beschreibt Auftragsmenge (400, 700, 1500 bzw. 3000 g/m <sup>2</sup> ). Box- und Whiskers Plots beschreiben den Median, das 25 % und 75 % Perzentil, Maximal- und Minimalwerte, die keine Ausreißer sind, sowie Ausreißer. ....	47
Abb. 26: Brandprüfung in Linz .....	49



## 9 Anhang (Abbildungs- und Tabellenanhang, Dokumentation)

### 9.1 Zugscherfestigkeitsprüfung an Fichtenproben

Tab. 6: Darstellung der Mittelwerte der Zugscherfestigkeit und des Holzbruchanteils sowie der Ergebnisse der Klebefugendickenbestimmung des Vorversuches

	Auftrags- menge	Festigkeit	Holzbruch	Klebefugendicke				
		MW	MW	MW	Stabw.	Min	Max	COV
	[g/m <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[%]
MUF	400	4,43	100	118,70	26,24	79,23	158,45	22,11
	700	4,64	100	123,78	16,24	107,90	149,35	13,12
	1500	3,06	75	905,90	183,85	667,71	1219,32	20,30
	3000	2,62	0	995,20	163,11	838,51	1289,73	16,39
PPP	700	4,02	100	202,04	64,33	137,41	323,57	31,84
	1500	3,80	25	346,39	29,90	315,20	381,54	8,63
	3000	4,49	75	194,33	16,78	165,88	208,01	8,63
MPT	700	3,38	50	340,86	61,93	257,14	427,46	18,17
	1500	2,67	0	752,86	116,62	634,50	916,51	15,49
	3000	3,08	50	815,11	73,90	680,10	879,15	9,07
Exolit AP 423	700	4,42	100	378,07	40,64	340,08	435,43	10,75
	1500	3,78	100	865,56	65,51	780,02	941,39	7,57
	3000	3,26	75	1471,94	86,60	1378,01	1584,33	5,88
Exolit AP 462	700	3,61	75	316,67	73,11	199,23	394,31	23,09
	1500	3,55	100	343,61	32,55	306,87	389,81	9,47
	3000	3,73	100	397,94	83,34	286,62	526,66	20,94
Phos- Chek 42	700	3,88	75	311,95	48,81	262,27	393,96	15,65
	1500	3,46	100	585,37	64,17	501,01	671,82	10,96
	3000	3,19	100	1186,09	65,16	1140,53	1260,73	5,49
Phos- Chek 42C	700	5,00	100	239,17	60,10	182,47	323,46	25,13
	1500	4,61	100	299,09	36,16	253,00	333,41	12,09
	3000	3,80	75	1270,62	37,41	1199,50	1306,32	2,94
Melapur 200	700	3,96	100	299,99	52,36	199,10	344,20	17,45
	1500	4,05	75	463,86	63,16	398,11	568,37	13,62
	3000	2,97	0	937,76	54,44	858,58	999,45	5,81

Melapur 200/70	700	4,67	100	304,20	33,95	261,55	357,82	11,16
	1500	5,36	100	366,44	58,31	298,58	442,87	15,91
	3000	2,49	0	1152,16	68,17	1071,27	1268,99	5,92
FR CROS C30	700	3,99	100	169,87	38,64	95,74	208,01	22,75
	1500	3,74	100	558,02	64,96	468,90	630,68	11,64
	3000	3,32	100	176,45	32,07	124,41	207,39	18,18
FR CROS C60	700	4,20	100	343,61	55,06	265,70	398,13	16,02
	1500	2,29	50	924,20	105,12	804,68	1049,21	11,37
	3000	3,69	100	460,39	67,00	385,76	543,27	14,55
FR CROS 584	700	4,16	100	321,87	27,91	286,26	369,66	8,67
	1500	3,67	100	587,44	55,64	514,22	678,54	9,47
	3000	3,21	100	595,07	52,42	547,40	680,72	8,81
FR CROS 680	700	3,03	50	284,25	73,46	186,66	394,31	25,84
	1500	4,35	100	304,18	97,44	174,37	435,51	32,03
	3000	2,53	25	962,14	106,77	825,91	1108,55	11,10

## 9.2 Zugscherfestigkeitsprüfung an Buchenproben

Tab. 7: Darstellung der Mittelwerte der Zugscherfestigkeit und des Holzbruchanteils sowie der Ergebnisse der Klebefugendickenbestimmung des Hauptversuches

		Festigkeit – MW je Lagerungsfolge (LF)			Klebefugendicke				
		LF 1	LF 3	LF 4	MW	Stabw.	Min.	Max.	COV
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[%]
MUF	400	9,1	5,1	7,3	108,87	24,58	83,04	153,44	22,58
	700	10,3	6,3	10,1	73,89	13,38	49,76	95,47	18,11
	1500	9,2	3,8	7,7	82,54	15,95	58,21	104,42	19,32
AP423	700	8,6	2,0	6,9	326,71	87,35	174,22	402,45	26,74
	1500	8,1	2,5	5,7	863,11	45,96	800,46	950,09	5,32
	3000	6,4	2,1	5,2	1152,14	376,95	593,07	1501,40	32,72
PC 42	700	9,3	3,2	7,5	302,10	37,67	253,00	364,93	12,47
	1500	7,7	2,8	6,3	531,72	43,17	443,80	588,93	8,12
M 200	700	9,8	4,4	6,0	321,55	63,51	220,41	402,79	19,75
	1500	6,3	2,7	4,0	768,33	40,16	692,65	821,14	5,23
FC 584	700	10,4	3,1	8,0	232,82	28,85	178,51	257,65	12,39
	1500	8,1	3,0	6,9	532,30	48,22	460,33	609,62	9,06

Legende Holzbruchanteil: **Rot**...0%, **Orange**...25%, **Gelb**...50%, **Hellgrün**...75%, **Dunkelgrün**...100