

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Firewood - Verbesserung des Brandschutzes für Konstruktionen mit Ingenieurholzbauprodukten und -systemen; Teilvorhaben 2: Erarbeitung von brandschutztechnischen Konstruktions- und Bemessungsregeln**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 2: Technische Universität München (TUM)**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 2: 22036718**

Laufzeit:

**01.04.2019 bis 01.10.2022**

Monat der Erstellung:

**10/2022**

Datum der Veröffentlichung:

**06/06/2023**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.



### **Projektbeteiligte des Verbundvorhabens**

#### **Teilvorhaben 2: Technische Universität München**

Patrick Dumler, M.Sc.

Norman Werther, Dr.-Ing.

Stefan Winter, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

### **Koordination des internationalen Verbundvorhabens**

#### **Research Institutes of Sweden**

Tian Li, Dr.-Phil.



## Inhaltsverzeichnis

Projektbeteiligte des Verbundvorhabens .....	1
Teilvorhaben 2: Technische Universität München .....	1
Koordination des internationalen Verbundvorhabens .....	1
Research Institutes of Sweden .....	1
<b>I. Kurzbericht .....</b>	<b>1</b>
1. Aufgabenstellung .....	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	1
a) Arbeitspakete und Meilensteine .....	1
b) Zusammenfassung .....	3
<b>II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>5</b>
1. Erzielte Ergebnisse .....	5
Arbeitspaket 1: Hemmnisse und neue Strategien für die Implementierung und Anwendung von Ingenieurholzbauprodukten und -systemen.....	5
Soziale Hemmnisse .....	5
Technische Hemmnisse.....	6
Ökonomische Hemmnisse .....	9
Politische Hemmnisse.....	11
Potentiale .....	13
Lösungsstrategien.....	14
Arbeitspaket 3: Experimentelle Nachweise.....	16
Versuchsreihe 1 .....	16
Versuchsreihe 1 - Materialien .....	16
Versuchsreihe 1 - Prüfkfigurationen .....	16
Versuchsreihe 1 - Versagensarten .....	18
Versuchsreihe 1 - Einfluss der Temperatur .....	19
Versuchsreihe 1 - Einfluss des Prüfszenarios .....	22
Versuchsreihe 1 - Einfluss des Lastniveaus .....	23
Versuchsreihe 1 - Einfluss der Klebstofffugendicke .....	26
Versuchsreihe 2 – Brandversuche ohne mechanische Belastung .....	26
Versuchsreihe 2 – Materialien .....	26
Versuchsreihe 2 – Prüfkfigurationen.....	27
Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkfiguration 2.1.....	30
Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkfiguration 2.2.....	31
Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkfiguration 2.3.....	33
Versuchsreihe 2 – Zusammenfassung .....	35
Versuchsreihe 3 – Kriechversuche and Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen bei erhöhter Temperatur.....	35
Versuchsreihe 3 – Materialien .....	35
Versuchsreihe 3 – Prüfkfiguration.....	35
Versuchsreihe 3 – Versagensarten.....	38
Versuchsreihe 3 –Referenzversuche unter Normaltemperatur .....	40

Versuchsreihe 3 – Temperaturkriechversuche .....	42
Versuchsreihe 4 – Brandversuche an Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen.....	46
Versuchsreihe 4 – Materialien.....	46
Versuchsreihe 4 – Prüfkfiguration .....	46
Versuchsreihe 4 - Ergebnisse .....	48
Arbeitspaket 2: Brandschutztechnische Bemessungsregeln für Ingenieurholzbauprodukte und -systeme .....	51
Numerische Simulation.....	51
Materialparameter .....	51
Sensitivitätsanalyse.....	53
Parameterstudie .....	55
Bemessungsmodell .....	60
Arbeitspaket 4: Dissemination & Kommunikation .....	65
2. Verwertung .....	65
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	65
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	65
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	65
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	66
3. Erkenntnisse von Dritten .....	66
4. Veröffentlichungen .....	66
Literaturverzeichnis .....	67
Anhänge .....	70

# I. Kurzbericht

## 1. Aufgabenstellung

Im Teilvorhaben 2 des Verbundprojekts „Firewood“ werden durch den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München mehrere Ziele verfolgt.

Es sollen technische Hemmnisse und Barrieren für eine verbreitete Anwendung von ingenieurbautechnischen Holzbaukonstruktionen aufgezeigt werden. Hierzu zählen unter anderem Probleme im Zusammenhang mit der Brandsicherheit von Holzbauprodukten sowie Unterschiede in den Regelwerken zwischen den einzelnen Ländern der Europäischen Union. Zugleich sollen potentielle Lösungsansätze und Strategien vorgestellt werden, mit dem Ziel, die Verwendung von Holzwerkstoffen im Bausektor zu erhöhen.

In diesem Zuge sollen optimierte Bemessungsregeln für den Einsatz von eingeklebten metallischen Verbindungsmitteln erarbeitet werden, um eine sichere brandschutztechnische Anwendung zu gewährleisten. Hierzu kommen neben experimentellen Untersuchungen auch numerische Simulationen zum Einsatz. Dabei sollen unter anderem transiente Materialkennwerte abgeleitet sowie die Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Klebstoffe untersucht werden. Zudem soll der Einfluss brandschutztechnischer Schutzmaßnahmen auf das Temperaturverhalten der untersuchten Verbindungen abgeschätzt werden.

## 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben ist in mehrere Arbeitspakete unterteilt, die Bezug auf die vordefinierten Ziele nehmen.

Zu Beginn wurde eine Übersicht über Schwierigkeiten und Chancen bei der Einführung und Verwendung von Holzwerkstoffen im Bauwesen erarbeitet. Diese sollte einen Input zu den nachfolgenden Arbeitsschritten und -paketen der einzelnen Projektpartner darstellen.

Zur Entwicklung eines optimierten Bemessungsmodells wurden über die gesamte Projektdauer vier Versuchsreihen geplant und durchgeführt, um Kenntnisse über das Materialverhalten sowie die Temperaturentwicklung innerhalb der Bauteile zu gewinnen. Die experimentellen Ergebnisse wurden versuchsbegleitend mit einer numerischen Simulation validiert. Die Simulationsergebnisse wurden wiederum als Planungshilfe für einzelne Versuche eingesetzt.

Auf Basis der dadurch erhaltenen Daten wurde ein Bemessungsvorschlag erarbeitet, der eine brandschutztechnisch sichere Anwendung von eingeklebten metallischen Verbindungsmitteln ermöglicht.

Zum Austausch der einzelnen Projektergebnisse sowie zu deren Diskussion und der Planung des weiteren Vorgehens zwischen den beiden Teilvorhaben und dem Gesamtprojekt wurden im regelmäßigen Abstand von ca. vier bis fünf Wochen Onlinemeetings zwischen den einzelnen Arbeitspaketeleitern und Industriepartnern abgehalten.

## 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Hemmnisse und neue Strategien für die Implementierung und Anwendung von Ingenieurholzbauprodukten und -systemen	04/2019 bis 03/2022	-
AP 1.1 Soziokulturelle Hemmnisse und Sichtweise	04/2019 bis 03/2020	- Durchführung einer Online-Umfrage zu Hemmnissen für den Holzbau - Analyse und Darstellung der Wahrnehmung der Öffentlichkeit und von Interessenvertretern gegenüber dem Holzbau - Handlungsempfehlungen gegen negative Vorurteile gegenüber dem Holzbau
AP 1.2 Technische Hemmnisse und Anforderungen	04/2019 bis 03/2020	- Sammlung und Zusammenfassung technischer und bauregulatorischer Hemmnisse und Problemstellungen für den Holzbau

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umfrage zu Anwendungsgrenzen für den Holzbau aus bauregulatorischer Sicht</li> <li>- Aufzeigen von Lösungsansätzen und Stärken</li> </ul>
AP 1.3 Workshops mit Interessenvertretern	04/2019 bis 03/2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einführungsworkshop in München mit Projektpartnern und Interessenvertretern</li> <li>- Vorstellung des Projekts</li> <li>- Durchführung einer Online-Umfrage zu Hemmnissen für den Holzbau</li> <li>- Abschlussworkshop in Madrid mit Projektpartnern und Interessenvertretern zur Vorstellung der Endergebnisse</li> </ul>
AP 2 Brandschutztechnische Bemessungsregeln für Ingenieurholzbauprodukte und -systeme	04/2019 bis 03/2022	-
AP 2.1 Klassifikation für Klebstoffe	04/2019 bis 09/2021	- Vorschlag für Klebstoffklassifikation in Teilvorhaben 1
AP 2.2 Materialkennwerte für numerische Simulation	04/2019 bis 09/2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Basierend auf AP 3.5 werden thermische und mechanische Materialkennwerte der untersuchten repräsentativen Klebstoffe der Klebstoffugen ermittelt, die dann als generische Kennwerte für thermische und mechanische Simulationen genutzt werden können</li> <li>- Thermische Simulationen zur Wärmeentwicklung in den Prüfkörpern zur Untersuchung der Schutzwirkung der Holzüberdeckung bis zum Erreichen der Glasübergangstemperatur des Klebstoffs</li> <li>- Mechanische Simulationen zur Darstellung auftretender Kräfte quer zur Belastungsrichtung aufgrund der Prüfkörpergeometrie</li> <li>- Planungshilfe und Verifikation durch die abschließenden Brandversuche in AP 3.7</li> </ul>
AP 2.5 Bemessungsmodell für Bauteilanschlüsse mit eingeklebten Verbindungsmiteln	10/2019 bis 03/2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchung und Vergleich der Einflüsse verschiedener Kenngrößen bei vorhandenen Bemessungsmodellen unter Normaltemperatur „Kaltbemessung“</li> <li>- Erstellung eines Bemessungstools auf Grundlage vorhandenen „Kaltbemessungsmodelle“</li> <li>- Auf Grundlage von AP 3.5 und AP 2.2 wird ein Bemessungsvorschlag unter Berücksichtigung der Temperaturbeanspruchung von eingeklebten Gewindestangen erarbeitet, dieser Vorschlag soll als Grundlage für die Erweiterung der EN 1995-1-2 dienen</li> <li>- Abgeleitet aus den Ergebnissen wird ein Bemessungsmodell vorgeschlagen, dass eine Mindestholzüberdeckung der Gewindestange vorsieht, um eine Erwärmung des Klebstoffs über ein bestimmtes Temperaturniveau zu vermeiden</li> </ul>
AP 3 Experimentelle Nachweise	10/2019 bis 12/2021	-
AP 3.5 Auszugversuche für eingeklebte Verbindungsmitel	10/2019 bis 09/2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erarbeitung einer Versuchsmatrix für kleinformative Warmkriech- und Warmzugversuche, um die Festigkeit der Klebstoffugen und deren Materialkennwerte unter Temperaturbeanspruchung zu bestimmen</li> <li>- Planung und Bau einer Thermobox, zur Durchführung von kleinmaßstäblichen Warmkriech- und Warmzugversuchen</li> <li>- Erstellung einer Versuchsmatrix für Brandversuche zur Beschreibung des Klebstoffverhaltens unter Brandbelastung und Durchführung der Versuche</li> <li>- Durchführung von Warmkriechversuchen mit eingeklebten Gewindestangen zur Verknüpfung des mechanischen und thermischen Materialverhaltens</li> </ul>



<b>Arbeitspakete (AP)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Bearbeitungszeitraum</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
		- Auswertung und Analyse der Versuchsergebnisse
AP 3.7 Großbrandversuche	10/2020 bis 12/2021	- Planung der Versuchsmatrix für mechanisch belastete Brandversuche unter ETK Brandeinwirkung zur Verifizierung der aus den bisherigen Ergebnissen der AP 2.2 und AP 3.5 abgeleiteten Bemessungsvorschläge und Durchführung der Versuche - Analyse und Abgleich der Ergebnisse mit AP 2.2 und AP 2.5
AP 4 Dissemination & Kommunikation	04/2019 bis 03/2022	-
AP 4.3 Transnationale Zusammenarbeit	04/2019 bis 03/2022	- regelmäßige Onlinemeetings im Abstand von vier bis fünf Wochen zur Vorstellung von Ergebnissen - Vorträge mit anschließender Diskussion zu den durchgeführten Untersuchungen - Bereitstellung der Ergebnisse zur Fortschreibung europäischer Standards wie EN 1995-1-2

<b>Meilensteine (M)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Fälligkeit</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
M 1	06/2019	- Bericht und Analyse der durchgeführten Online-Umfrage
M 2	09/2019	- Endbericht über die in AP 1.1 und AP 1.2 festgestellten Hemmnisse und Handlungsempfehlungen
M 3	03/2020	- Einführungsworkshop in München
M 4	03/2020	- Durchführung verschiedener Versuchsreihen zur Untersuchung des Materialverhaltens unter verschiedenen Variationen als Grundlagenuntersuchung
M 5	03/2020	- Vorschlag eines Klassifikationsmodells für Klebstoffe
M 6	09/2020	- Festlegung von Materialkennwerten für die Durchführung von numerischen Simulationen mit Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen
M 7	03/2021	- Vorschlag zur Vorgehensweise beim Bemessungsmodell
M 8	03/2022	- Vorschlag Bemessungsmodell validiert durch abschließen-de Brandversuche
M 9	03/2022	- Abschlussworkshop in Madrid
M 10	03/2022	- Abschlusskonferenz von ForestValue in Madrid

## b) Zusammenfassung

In Arbeitspaket 1 wurden mithilfe von Umfragen, Literaturrecherche und Workshops potentielle Quellen für technische und soziokulturelle Hemmnisse bei der verbreiteten Anwendung des Holzbaus vorgestellt. Basierend auf diesen wurden Lösungsansätze erarbeitet. Die Ziele und der Aufbau der Versuche wurden während eines Anfangsworkshops mit Interessenvertretern vorgestellt und diskutiert. Die Endergebnisse des Gesamtprojekts wurden im Rahmen eines Endworkshops präsentiert und diskutiert.

In Arbeitspaket 2 konnten basierend auf den durchgeführten experimentellen Untersuchungen Eingangsparameter für numerische Simulationen im Bereich von eingeklebten metallischen Verbindungsmitteln abgeleitet werden. Zusätzlich wurde ein Vorschlag zur brandschutztechnischen Bemessung von eingeklebten Gewindestangen erarbeitet. Dieses sieht eine Mindestüberdeckung der Klebstoffuge vor, sodass diese für die geplante Brandeinwirkungszeit eine gewisse Grenztemperatur nicht überschreitet.

Es wurden vier verschiedene Versuchsreihen in Arbeitspaket 3 durchgeführt. Diese dienten zur Untersuchung des spezifischen Klebstoffverhaltens unter Wärmeeinwirkung, der Temperaturentwicklung unter Einfluss

verschiedener brandschutztechnischer Schutzsysteme und Ausführungsvarianten, der Verknüpfung von thermischen und mechanischen Klebstoffeigenschaften sowie zur Validierung der in Arbeitspaket 2 vorgeschlagenen Materialparameter für numerische Untersuchungen und des Bemessungsmodells.

Das Projektteam des Gesamtprojekts deckt verschiedene nationale Ansichten und Perspektiven ab. Durch den regelmäßigen Austausch in Arbeitspaket 4 wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse für alle teilnehmenden Länder und innerhalb Europas repräsentativ sind. Zusätzlich können die Projektergebnisse und die neu gewonnenen Erkenntnisse für die Industrie, die Wissenschaft, die Behörden und die Öffentlichkeit weitreichender genutzt werden, da sie auch in die Fortschreibung europäischer Normungen einfließen.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### **Arbeitspaket 1: Hemmnisse und neue Strategien für die Implementierung und Anwendung von Ingenieurholzbauprodukten und -systemen**

Im Rahmen von Literaturrecherchen und Umfragen wurden mögliche Hemmnisse und Barrieren für eine verbreitete Anwendung des Holzbaus zusammengefasst. Eine vollständige Liste von Parametern ist potenziell unendlich und hängt von den beteiligten Interessensgruppen, Regionen und Ansichten ab. Die festgestellten Hemmnisse wurden in vier Bereiche unterteilt.

#### **Soziale Hemmnisse**

Eine Schlüsselkomponente für den Fortschritt der Holzbauindustrie ist das Verständnis der Märkte und der negativen Wahrnehmungen im Zusammenhang mit der Verwendung von Holz. Dazu gehören Brandgefahr, Schallschutz und Robustheit, da in der Öffentlichkeit immer noch erhebliche Bedenken hinsichtlich der Brennbarkeit und Dauerhaftigkeit (Fäulnis) von Holz als natürlichem Baumaterial bestehen. Diese Eigenschaften werden im Vergleich zu Stahl- und Betonkonstruktionen als nachteilig empfunden [1].

Aufgrund des gestiegenen Umweltbewusstseins ist die gesellschaftliche Wahrnehmung von Bauprodukten und der produzierenden Industrie ein wichtiger Faktor für die Verbreitung des Holzbaus. Die Verbraucher interessieren sich für das Sozialverhalten von Organisationen, das das Kaufverhalten oder die Entscheidungsfindung beeinflussen kann. Für die Verbraucher ist ein wichtiges Bindeglied im Kaufentscheidungsprozess der Grad des Vertrauens zwischen der Marke und dem Ruf der Organisation und den Verbrauchern, die ihre Produkte kaufen [2]. Organisationen mit einer sozial ausgerichteten Philosophie sind in der Lage, ihren positiven Ruf zu nutzen, um Produkte mit einem höheren symbolischen Wert zu vermarkten - wie z. B. im Fall des Holzbaus, der nachhaltiger ist als traditionelle Bauweisen. Prägnante Marketingbotschaften über die nachhaltige Waldnutzung, einschließlich der Forstwirtschaft, der Produktherstellung, der Gebäudenutzung und der Entsorgung, sind daher entscheidend für die Akzeptanz von Holzbauprodukten auf dem Markt.

Aber selbst, wenn die Verbraucher bereit wären, für Umwelt- oder Gesundheitsvorteile einen Aufpreis zu zahlen, würde die Einführung von Bauverfahren hauptsächlich von der Einstellung der Bauherren, Planer und Bauunternehmer abhängen. Im Allgemeinen ist die Wahl des Materials für den Verbraucher im Vergleich zu Preis, Lage und Grundriss der Wohnung immer noch trivial [3]. Nachhaltigkeitsaspekte allein sind daher keine ausreichende Motivation für den Holzbau, wenn man sie mit den Nachteilen aufgrund der fehlenden wirtschaftlichen Möglichkeiten abwägt. Dennoch ist es wichtig, potenzielle Verbraucher für den Holzbau zu sensibilisieren, da die Entscheidung für ein klimafreundlicheres Material mit nur geringen Mehrkosten verbunden sein kann. Gleichzeitig wird dadurch auch das Wissen innerhalb der Verbrauchergruppe über die verfügbaren Optionen erhöht. Um eine breite Argumentationsbasis für die Förderung und Akzeptanz des mehrgeschossigen Holzbaus zu erreichen, sind weitere Forschungen zu den Potenzialen des Holzbaus im Bereich der Nachhaltigkeit und Gesundheit notwendig.

Ein weiteres Problem könnte das mangelnde Wissen in der Bevölkerung über Zertifizierungssysteme für Gebäude sein. Diese Systeme wurden entwickelt, um ökologische, ökonomische und soziale Qualitäten von Gebäuden bewerten zu können und Vergleiche zu ermöglichen. International haben sich verschiedene Zertifizierungssysteme etabliert. Sie bewerten Gebäude auf der Grundlage eines bestimmten Kriterienkatalogs, gewichten diese aber unterschiedlich und nutzen die jeweiligen nationalen Normen und Vorschriften. Für Bauherren ist es auch eine Chance, durch ein positives Image, das auf dem Zertifizierungssystem beruht, ihre Wettbewerbsfähigkeit und ihre Vermarktungschancen zu erhöhen. Darüber hinaus ist die Gebäudezertifizierung eine Informationsmöglichkeit, die den Einfluss und die Möglichkeiten der Bauwirtschaft im Hinblick auf globale Entwicklungen wie Klimawandel und Ressourcenknappheit sichtbar machen kann.

Ein geringer Bekanntheitsgrad der Systeme in der Bevölkerung mindert die gewünschten Effekte für Bauherren. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, verpflichtende Zertifizierungssysteme für öffentliche Gebäude einzuführen, um nachhaltige Bauweisen wie den Holzbau zu fördern und gleichzeitig den Bekanntheitsgrad dieser Systeme zu erhöhen. Auf diese Weise wird die Signalwirkung breitere Bevölkerungsschichten erreichen, die über nachhaltige Bauweisen informiert werden. Die Verbraucher sollen die Qualitäten der Immobilie verstehen und darüber informiert werden, wie diese zu den Umweltbemühungen beiträgt.

Der Prozess der Materialauswahl in der Entwurfsphase kann als komplex bezeichnet werden, da viele Akteure an der Entscheidungsphase beteiligt sind (z. B. Architekten, Bauingenieure, Bauunternehmer, Endnutzer) [4]. Wichtige Akteure für den Holzbau sind neben dem Bauherrn vor allem die Architekten, da diese bereits zu Beginn der Planungen einen stärkeren Einfluss auf die Materialwahl nehmen können [5]. Ihre Meinung ist jedoch schwer zu kategorisieren, da sie von ihrer jeweiligen Rolle innerhalb eines Bauprojekts abhängt und

die Vergabeverfahren in den einzelnen Ländern unterschiedlich sind. Infolgedessen kann der Einfluss der einzelnen Akteure von Land zu Land variieren [6].

[7] untersuchten die Mechanismen, die den Materialauswahlprozess beeinflussen, wobei der Schwerpunkt auf der Verwendung von Holz im Städtebau lag. In Fällen, in denen Holz verwendet wird, sind engagierte Architekten und/oder Berater ein gemeinsamer Nenner. In Fällen, in denen kein Holz verwendet wird und in denen der Architekt den Materialauswahlprozess weitgehend kontrollieren kann, sind ästhetische Überlegungen ein entscheidender Faktor. Bauunternehmer betonen Tradition, Kompetenz und Zugang zu kompetenten Handwerkern als wichtige Faktoren bei der Materialauswahl. Holz wird für Gebäude mit mehr als drei Stockwerken nicht als geeignet angesehen. Die Verwendung von Holz wird als schwierig und teuer empfunden, und auch die brennbaren Eigenschaften haben einen negativen Einfluss auf die Verwendung von Holz.

Die Bauwirtschaft wird allgemein als risikoavers und stärker fragmentiert beschrieben als viele andere Wirtschaftszweige [8]. Die konservative und kostenorientierte Natur der Bauindustrie hat gezeigt, dass die Beteiligten zögern, neue nachhaltige Materialien oder Technologien einzusetzen, wenn sie die Folgen eines Scheiterns in Kauf nehmen müssen. Infolgedessen stoßen neue Materialien, Technologien oder Verfahren häufig auf erhebliche Hindernisse für den Markteintritt und die Expansion [9], und bekannte Verfahren werden aufgrund bestehender Normen und Erfahrungen gegenüber Alternativen bevorzugt. Infolgedessen wird ein unkonventioneller Ansatz für den Endkunden tendenziell teurer, selbst wenn der tatsächliche Kaufpreis vergleichbar ist. Einem Unternehmen, das versucht, die Kosten und das finanzielle Risiko zu minimieren, würde daher die Motivation für einen solchen Ansatz fehlen. Außerdem ist der Lebenszyklus von Gebäuden im Vergleich zu Konsumgütern länger (30 bis 100 Jahre). Die Kommerzialisierung neuer Produkte, Verfahren oder Geschäftsmodelle auf den Märkten dauert in der Regel mehrere Jahrzehnte [3]. Projekte, die auf Kostenwettbewerb basieren, fördern Innovationen nur schrittweise und führen leicht dazu, dass Entscheidungsträger neue Praktiken nicht akzeptieren, die kurzfristig zusätzlichen Aufwand und damit verbundene Kosten verursachen könnten.

Traditionell waren Preis, Zeitplan und Qualität die Kriterien für den Erfolg von Projekten. Bei Bauprojekten sollten jedoch zusätzliche Kriterien wie Umweltauswirkungen, Innovation und Arbeitsumgebung als zusätzliche Kriterien herangezogen werden, um den Marktzugang zu erleichtern und den Holzbau zu stärken. Darüber hinaus müssen Informationslücken von Entscheidungsträgern in Bezug auf den mehrgeschossigen Holzbau geschlossen werden. Da in der Regel keine oder nur geringe Erfahrungen im Bereich des Holzbaus vorliegen, wird häufig auf die Umsetzung von Holzkonstruktionen verzichtet. Aus diesem Grund ist der Zugang zu Fachinformationen für fachfremde Akteure entscheidend. Die kontinuierliche Entwicklung und Veröffentlichung von Bauteilkatalogen, die auch Anschluss- und Verbindungsdetails umfassen, kann hilfreich sein. Darüber hinaus sind Entwurfshilfen denkbar, die ein einfacheres Verständnis der Materie ermöglichen.

Eine weitere Möglichkeit ist ein vereinfachter Zugang zu Forschungsergebnissen. Eine Sammlung von Erfahrungsberichten und Projektergebnissen aus bereits abgeschlossenen Bauvorhaben der öffentlichen Hand stellen ebenfalls grundlegende Methoden zur Informationsbereitstellung dar.

Die Förderprogramme müssen durch Informationsinstrumente ergänzt werden, um Wissensdefizite und Vorbehalte bei Bauplanern, Verbrauchern, Bauaufsichtsbehörden und Finanzierern zu überwinden. Eine deutliche Förderung des Holzbaus, einschließlich der Forschungsförderung, wäre auch ein Signal an die Universitäten und Ingenieurschulen, den modernen Holzbau stärker in der Lehre zu verankern, damit das entsprechende Hintergrundwissen bei den zukünftigen Architekten und Bauplanern vorhanden ist.

## **Technische Hemmnisse**

In den ausgewerteten wissenschaftlichen Artikeln wird häufig das mangelnde Wissen der am Bau Beteiligten (Architekten, Ingenieure, Aufsichtsbehörden etc.) als Grund genannt, wenn die Entscheidung gegen den Einsatz von Holzbau in Bauprojekten getroffen wird [10]. Allerdings gibt es nationale Unterschiede, die mit den Erfahrungen der einzelnen Länder im Bereich des Holzbaus zusammenhängen.

Die meisten Planer sind mit Beton- und Mauerwerksbauten besser vertraut als mit Holzbauten. Vor allem in Ländern, in denen der Holzbau keine Tradition hat, fehlt es den Planern an Erfahrung und Fachwissen über die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz (Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Abnutzung, Schall, Windaussteifung, Wärmedämmung, Benutzerfreundlichkeit, Wartung usw.). Wenn Bauherren also mit Holz bauen wollen, wird es teurer als mit traditionellen Materialien, weil sie erfahrene Planer brauchen, die oft dem lokalen Arbeitsmarkt nicht in ausreichender Zahl zur Verfügung stehen, und weil komplexe Anschlüsse und geschultes Personal für die Produktion, den Bau und die Wartung erforderlich sind, was die Kosten für jeden Planungs- und Bauschritt erhöht. Für den Entwurfsprozess wäre es ideal, wenn das Projektteam sowohl Erfahrung mit dem spezifischen Bausystem als auch mit der Arbeit im Team hat. Derzeit gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Planern mit Erfahrung im mehrgeschossigen Holzbau und eine begrenzte Anzahl von Projekten, die realisiert wurden [11].

Auch fehlt es an fundierten Kenntnissen über die für die Verwendung von Holz im Bauwesen relevanten Bauvorschriften [12], da die Anforderungen an Gebäude von Land zu Land unterschiedlich sind. Aus diesem Grund ist ein erhöhter Planungsaufwand zu erwarten, insbesondere wenn die Planer mit den unterschiedlichen nationalen Vorschriften nicht vertraut sind, was zu Unsicherheiten und Verzögerungen führen kann.

Ein weiteres genanntes Problem ist der unzureichende Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie. Im mehrgeschossigen Holzbau ist es von größter Bedeutung, dass sich alle Beteiligten aktiv an der Entwicklung von Holzbautechnologien und -systemen beteiligen. Der mehrgeschossige Holzbau befindet sich in vielen europäischen Ländern in den letzten Jahren im Aufschwung [13, 14]. In dieser Phase entwickeln sich Techniken und Systeme rasant weiter, und viele der Marktteilnehmer haben deswegen nur begrenzte Kenntnisse und Erfahrungen mit den bestehenden Produkten. Es gibt dabei immer noch nur eine kleine Anzahl von Anbietern individueller Holzbauprodukte, die aber stetig wächst. Der Holzbau unterscheidet sich von den traditionellen Bauweisen, weil viele Bauprojekte mit neuer Technologie und neuen Systemen durchgeführt werden, was sie zu Lernprojekten macht. Dies bedeutet, dass alle Akteure im Bereich der Projektentwicklung und -durchführung zusammenarbeiten müssen. Erfolgreiche Projekte müssen so organisiert werden, dass die Akteure (Grundstückseigentümer/Gemeinde, Bauherr, Architekt, Systemanbieter, Installateure, Planer) bereits in der Programm- und Planungsphase zusammenarbeiten. Es besteht ein großer Bedarf an der Dokumentation und dem Austausch von Erfahrungen in den Bereichen Bausysteme, Installationsmethoden und Management, um Technologien und Systeme zu verbessern und Datenbanken aufzubauen. Die technischen Unsicherheiten erfordern von den Planern und Architekten eine größere Bereitschaft und Flexibilität während des gesamten Projekts.

Aus den vorliegenden Studien geht hervor, dass Bautraditionen und etablierte Praktiken erhebliche institutionelle Hindernisse darstellen. Die Einführung systematischer Innovationen wird im Allgemeinen durch den dezentralen Charakter der Branche erschwert und ist sowohl regional als auch zwischen Unternehmen unterschiedlicher Größe verschieden. Infolgedessen legen einzelne Firmen oder Teilspektoren oft spezifische Arbeitsabläufe und Materialpaletten fest, die bei allen Projekten verwendet werden. Dies kann dazu führen, dass Fachleute in der Bauindustrie davon abhalten werden, neue Materialien oder Techniken zu entwickeln. Ein Wandel in den etablierten Prozessen kann nur durch einen effektiven Wissensaustausch erreicht werden. Die Verbreitung von Informationen über alternative Materialien, Technologien und Praktiken ist entscheidend, um die Kluft zwischen Vorurteilen und Wissen zu überbrücken. Diese Informationen sind oft über viele Veröffentlichungen und Online-Quellen verstreut und werden nur selten kohärent zusammengeführt und den Anwendern und politischen Entscheidungsträgern präsentiert. Der wirksame Transfer von Forschungsergebnissen aus der Wissenschaft in die Industrie sowie die Bildung effektiver Industrieverbände und Wissenszentren sind entscheidend für die Förderung neuer Entwicklungen. Auch eine verstärkte Ausbildung an Hochschulen oder öffentlichen Bildungseinrichtungen im Bereich des Holzbaus und des damit verbundenen Brandschutzes kann die Verbreitung von Fachwissen fördern. Zu diesem Zweck sollte der Holzbau als konstruktives Pflichtfach in der Ausbildung von Architekten und Ingenieuren etabliert werden.

Neben dem fehlenden Fachwissen im Holzbau werden auch ein Mangel an verfügbaren Daten und Informationsquellen für Ausbildungszwecke sowie ein Mangel an Demonstrationsprojekten als Hindernisse gesehen [15].

Die Holzbaubranche setzt sich in der Regel aus kleinen bis mittelgroßen Bauunternehmen zusammen [16]. Problematisch erscheint die Leistungsfähigkeit der Unternehmen bei einer steigenden Nachfrage im Holzbau. Es müssen alle an der Holzproduktion beteiligten Unternehmen und deren Auslastung berücksichtigt werden. Dies gilt nicht nur für die Produktionsstätten, sondern auch für die Sägewerke, die Forstwirtschaft und die Zulieferer. Darüber hinaus ist die Erfahrung der Unternehmen eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung komplexerer mehrgeschossiger Gebäude.

Ist die Auslastung der einzelnen Werke bereits hoch, kann ein Anstieg der Nachfrage zu Kapazitätsengpässen und letztlich zu höheren Preisen führen, die den Holzbau gegenüber traditionellen Bauweisen nicht mehr konkurrenzfähig machen. Zudem kann es zu Verzögerungen im Zeitplan und im Bauablauf kommen, da die Unternehmen nicht mehr in der Lage sind, die gestiegene Nachfrage adäquat zu bedienen.

Die Gründung neuer Unternehmen zur Deckung der gestiegenen Nachfrage ist daher schwierig, da neben den hohen Investitionskosten auch das entsprechende Know-how für die Produktionsstätte vorhanden sein muss. Dies umfasst nicht nur die Anlagentechnik über die Produktionslinie und die notwendigen Maschinen im Hinblick auf die Vorfertigung, sondern auch Kenntnisse über die verwendeten Materialien, deren Bearbeitbarkeit und verschiedene Qualitätskontrollen.

Ein weiteres Hindernis wird in der Struktur der beschriebenen Wertschöpfungskette von Holzprodukten gesehen. Zwischen dem Rohprodukt im Sägewerk und dem Endprodukt in der Fabrik ist eine Vielzahl von Akteuren beteiligt. Diese Zersplitterung der Wertschöpfungskette hat zu einem Mangel an langfristiger Marktorientierung beigetragen. Dies hat die Position von Holz als Baumaterial im Vergleich zu traditionellen Baumaterialien wie Stahl und Beton geschwächt [16].

Auch der Standort einer Produktionsstätte ist problematisch. Sie muss gut angebunden sein, um die Rohstoffe und die hergestellten Bauprodukte transportieren zu können. Außerdem sollte sie eine gewisse Nähe zu

Sägewerken haben, um die Transportwege zu verkürzen und die Wertschöpfungskette zu vertiefen. Gleichzeitig ist eine zentrale Lage zur Versorgung großer Märkte wünschenswert. In Europa sind dies Deutschland, Österreich, die Schweiz, Großbritannien und Skandinavien [3]. Aus diesem Grund ist es unwahrscheinlich, dass in Ländern ohne eigenes Marktpotenzial oder große Waldflächen Hersteller oder Akteure eine eigene Holzbauproduktion aufbauen können, was den Ausbau der Holzbaubauindustrie in diesen Regionen erschwert.

Die Bauteile müssen verschiedene Leistungskriterien erfüllen. Dazu gehören neben den Anforderungen an den Brandschutz auch Schallschutz und Wärmedämmung. Eine Funktionsschicht im Bauteil kann dabei mehrere Funktionen übernehmen.

Die Verbindungen sind die größte Schwachstelle der Konstruktion. Die einzelnen Funktionsschichten der Bauteile müssen miteinander verbunden werden, ohne ihre Leistungseigenschaften zu verlieren. Aus diesem Grund ist das Risiko von Fehlkonstruktionen in der Planung und das Risiko von Montagefehlern in der Ausführung höher.

Im Holzbau gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Ausbildung dieser Verbindungen. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Bauweisen im Holzbau (Holzrahmenbau, Massivholzbau, Pfosten-Riegel-Konstruktionen usw.) und den damit verbundenen Anschlussdetails. Zum anderen gibt es auch baukulturell bedingte regionale Unterschiede in Bezug auf die Verbreitung der einzelnen Bauweisen [3].

Fehlen den Entscheidungsträgern die notwendigen Kenntnisse und Erfahrungen für die Planung der Anschlussdetails, kann es aufgrund der hohen Komplexität zu Fehlern kommen, die die Dauerhaftigkeit des Gebäudes reduzieren und zu erhöhten Kosten durch Nachbesserungen führen können.

Die Kosten für den Abriss von Gebäuden scheinen zurzeit eher irrelevant zu sein, da dies erst zu einem viel späteren Zeitpunkt geschieht. Die normale Lebensdauer eines neu errichteten Gebäudes wird in Schweden normalerweise mit 50-70 Jahren angesetzt, in Deutschland beispielsweise mit 50 Jahren. In anderen Märkten hingegen werden Gebäude als Verbrauchsgüter mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 26 Jahren (Japan) bewertet [14]. Hier spielen die Kosten für den Abriss und die Entsorgung der Materialien daher eine größere Rolle.

Im Vergleich zu traditionellen Bauweisen hat der Holzbau den Nachteil, dass die Konstruktionen und Anschlussdetails sehr komplex sind [17]. Aus diesem Grund kann die Sortierung und Trennung bei Abbrucharbeiten schwierig und kostspielig sein. Das Entfernen von verschraubten Plattenmaterialien kann aufgrund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwandes erhebliche Mehrkosten verursachen.

Brandschutzbedenken sind in den untersuchten Arbeiten einer der am häufigsten genannten Gründe und damit eines der größten Hindernisse für die Verbreitung des Holzbaus. In [18] wird die Verwendung von Holzbaubauweisen durch Architekten und Ingenieure für Nicht-Wohngebäude untersucht. In diesem Zusammenhang wird die Bauordnung als eines der größten Hindernisse für die Verwendung von Holz im Bausektor im Hinblick auf die Brandschutzeigenschaften angesehen.

Aufgrund des brennbaren Charakters von Holz als Baumaterial ist seine aktive Verwendung in Gebäuden in den meisten Ländern durch die Bauvorschriften eingeschränkt. Dies gilt insbesondere für flächenmäßig große sowie hohe Gebäude. Bauvorschriften und Brandschutzvorschriften spiegeln die Mindestsicherheitsanforderungen für den Bau von Gebäuden in einem Land wider [19].

Obwohl die Hauptziele der einzelnen Bauvorschriften in ihren Anforderungen ähnlich sind, gibt es Unterschiede in der Gestaltung und Formulierung [20]. Dies kann auf die Entstehung von Bauvorschriften zurückzuführen sein, die von der Regierungspolitik bestimmt werden. Die Entwicklung wurde durch nationale Ereignisse wie Energiekrisen, Stadtbrände oder Gebäudeeinstürze, aber auch durch Lobbyarbeit der Industrie und Forschung beeinflusst.

Die Hauptunterschiede bei den Beschränkungen für den Holzbau liegen in der zulässigen Anzahl der Geschosse und in den sichtbaren Holzoberflächen von Innen- und Außenbauteilen [21]. Es gibt jedoch auch Länder, die keine spezifischen Vorschriften haben oder in denen die zulässige Geschosshöhe begrenzt ist. Außerdem gibt es Unterschiede bei der Bewertung von Brandschutzsystemen. Einige Länder bewerten den Einsatz von Sprinkleranlagen zur frühzeitigen Brandbekämpfung positiv und lassen die Verwendung von Holz als Beispiel für eine sichtbare Oberfläche zu. Andere Länder hingegen lassen trotz Sprinkleranlagen keine Erleichterungen für den Holzbau zu oder berücksichtigen diese technischen Möglichkeiten nicht.

Aufgrund des Subsidiaritätsprinzips können die einzelnen Mitgliedsstaaten in ihren jeweiligen Bauordnungen unterschiedliche Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Bauteilen und Bauprodukten stellen, so dass es keine einheitlichen europäischen Vorgaben gibt. Grundlage für die nationalen Anforderungen sind europäische, harmonisierte Produktnormen, die einzelne durchzuführende Prüfungen definieren. Existieren derzeit keine harmonisierten Normen, gelten weiterhin die nationalen Vorgaben. Dies kann jedoch zu Einschränkungen führen, da sich die Sicherheitsniveaus für den Brandschutz von Land zu Land unterscheiden. Daher ist die Verbindung zwischen nationalen Anforderungen und der Leistung von Bauprodukten oft unklar [21].

Im Allgemeinen kann man sagen, dass ein Land, das traditionell mehr Erfahrung im Holzbau hat, weniger Einschränkungen durch Bauvorschriften hat als andere Länder. Im Hinblick auf eine verstärkte Verwendung von Holz in Gebäuden ist ein angemessener Brandschutz eine zentrale Anforderung.

Die unterschiedlichen Anforderungen können für Bauvorhaben von Unternehmen in einem anderen Land einen erhöhten Planungsaufwand bedeuten, da zunächst die notwendigen Voraussetzungen und Vorschriften zum Brandschutz für das Gebäude ermittelt werden müssen.

## **Ökonomische Hemmnisse**

Länder ohne große Waldflächen haben naturgemäß keine oder nur eine geringe Holzbautradition bzw. -kultur und das damit verbundene Know-how, weshalb die Verwendung von Holz in ihrem Bauwesen auch heute noch keine große Rolle spielt. Die entsprechenden Bauvorschriften berücksichtigen daher Holzbauweisen nicht explizit oder enthalten große Einschränkungen [22].

Bei der im Rahmen des Projekts durchgeführten Umfrage wurde festgestellt, dass Länder ohne Holzbautradition oft keine forstwirtschaftliche Wertschöpfungskette haben. Aufgrund mangelnder Ressourcen fehlen auch die notwendigen Produktionsanlagen für die Herstellung von Holzbauprodukten.

Der Klimawandel stellt ein Problem für die forstwirtschaftliche Wertschöpfungskette dar. Er führt zu Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Versorgungssicherheit [23]. Beispiele sind die zunehmende Ausbreitung von Holzschädlingen (Borkenkäfer, nicht einheimische Pilze etc.) und die Veränderung der Zusammensetzung der Holzvorräte (weniger Niederschläge, Temperaturstress der Bäume usw.). Auch die Gefahr von Waldbränden steigt durch zu trockene Sommer, was zum Verlust großer Waldflächen führen kann. Ein weiterer Faktor ist die abnehmende Holzqualität aufgrund des schnelleren Wachstums der Bäume [24]. Aufgrund der hohen Anforderungen an Bauholz und Holzprodukte für den Hoch- und Tiefbau kann nur ein bestimmter Anteil der gesamten Rohholzmenge für Bauzwecke verwendet werden. Aufgrund der Vielfalt des Rohholzes sind unterschiedliche Verwertungspfade bis hin zur Papier- und Zellstoffindustrie sowie dem Chemie- und Energiesektor notwendig, um das größtmögliche Potenzial auszuschöpfen.

Verschiedene Holzverarbeitungsketten mit steigender Nachfrage konkurrieren um das Rohstoffangebot. Trotz dieser Konkurrenz muss es gelingen, einen selektiven und steigenden Anteil an geeignetem Rundholz für die Verarbeitung zu Bauelementen bereitzustellen. Deshalb muss eine nachhaltige und sichere Rohstoffversorgung für die verstärkte Nutzung von Holz im Bauwesen und auch für die energetische Verwertung als Ersatz für fossile Energieträger gewährleistet sein. Um die Akzeptanz von Holz als nachhaltigem Baustoff zu fördern, sollten daher hohe Anforderungen an die Vereinbarkeit von Waldbewirtschaftung, Naturschutz und Klimaschutz bei der Holzproduktion und -verarbeitung gestellt werden.

Die großen regionalen Unterschiede in den verfügbaren Waldressourcen führen auch zu Unterschieden in den Märkten für den mehrgeschossigen Holzbau. Insbesondere in Ländern, in denen der Marktanteil von Holz im Einfamilienhaussektor bereits hoch ist, ist eine Marktdurchdringung mit mehrgeschossigem Holzbau erfolgreicher [25].

Insgesamt lässt sich sagen, dass in Regionen, in denen der Holzbau im mehrgeschossigen Bereich bereits einen größeren Anteil hat, ein Bedarf an nachhaltiger Forstwirtschaft besteht, um den zusätzlichen Bedarf decken zu können und eine sichere Rohstoffversorgung für die Zukunft zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang ist auch die Kaskadennutzung (Wiederverwendung, Recycling, etc.) zu nennen, um zusätzliche Nutzungsquellen zu erschließen.

Größere Marktanteile im mehrgeschossigen Holzbau sind auch in Ländern mit großen Wirtschaftswaldflächen und einem größeren Anteil des Holzbaus im Einfamilienhaussektor zu erwarten, was den nordischen Ländern Norwegen, Schweden und Finnland, Mitteleuropa und dem Vereinigten Königreich entspricht, da diese Länder über das notwendige Wissen und die Erfahrung sowie über ausreichende Ressourcen und Produktionsanlagen verfügen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass in Regionen, in denen Holz im Bausektor traditionell eine untergeordnete Rolle spielt, größere Veränderungen herbeigeführt werden, wird als gering eingeschätzt. Um andere Regionen zu erreichen, in denen der Holzbau baukulturell nicht präsent ist, muss zunächst für den Aufbau von Lieferketten, die Sammlung von Montage- und Ingenieurwissen sowie Marketing- und Vertriebsmodelle gesorgt werden. Auch das öffentliche Interesse muss geweckt werden, um einen potenziellen Markt zu schaffen. Dies erfordert jedoch einflussreiche Akteure, die die Verbreitung des Holzbaus fördern.

Der starke Wettbewerb, der Rückgang der erwerbstätigen Altersklassen in der Bevölkerung in den europäischen Ländern und vor allem der Bedarf an bezahlbarem Wohnraum treiben die Verbesserung der Produktivität im Bausektor voran. Eine Möglichkeit dazu ist die industrielle Vorfertigung von Bauteilen und Modulen [26].

Ein großes Potenzial des Holzbaus liegt in seinem hohen Vorfertigungsgrad im Vergleich zu traditionellen Bauweisen. Daraus ergeben sich viele Vorteile [27, 28]:

- Effiziente Feuchte-, Qualitäts- und Kostenkontrolle
- Geringere Lärmbelastung bei der Produktion
- Erhöhte Sicherheit für die Arbeiter
- Einbau in Innenräumen, in einer trockenen und sauberen Umgebung
- Kosteneinsparungen durch Materialeinsparung und verkürzte Bauzeit
- Weniger Bauabfall

Für einen reibungslosen und geregelten Ablauf ist jedoch eine gute Planung und Koordination der Gewerke notwendig. Ist diese nicht vorhanden, kann davon ausgegangen werden, dass das Potenzial der kurzen Bauzeit nicht voll ausgeschöpft werden kann.

Grundsätzlich können drei Probleme unterschieden werden, die erhöhte Kosten für den Holzbau verursachen:

- Montageprobleme auf der Baustelle
- Planungsfehler
- Schwierigkeiten mit dem Zeitmanagement

Fehler in der Planung des Bauablaufs, falsche Liefertermine oder schlechte Kalkulation der Fertigstellung von Gewerken können zu erheblichen Verzögerungen und kostspieligen Umplanungen führen. Häufig genannte Probleme sind laut [10] eine länger andauernde Planungsphase sowie Fertigungs- und Lieferprobleme. Diese führen dazu, dass der Zeitplan umstrukturiert werden muss, was zu neuen Verzögerungen führen kann.

Da auch während der Bauphase Änderungen im Holzbau im Vergleich zum Stahl- oder Betonbau schwieriger zu realisieren sind, muss der Planungsphase erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden [10].

Auch eine schlechte Kommunikation zwischen den Gewerken kann zu Verzögerungen führen, da im Holzbau viele Akteure beteiligt sind, aber ein Großteil der Planung bereits im Entwurf konzipiert werden muss, da nachträgliche Änderungen während der Bauphase schwierig sind und nur mit erhöhtem Mehraufwand umgesetzt werden können. Dies gilt insbesondere für die brandschutz- und gebäudetechnische Planung, da das Tragwerk und die Bauteile direkt betroffen sind.

Das Problem der komplexen Planung betrifft vor allem Länder mit wenig Erfahrung im Holzbau. Hier ist vermutlich weder die notwendige Infrastruktur zur Herstellung der Bauteile noch das Planungswissen oder die praktische Erfahrung vorhanden, um einen reibungslosen Bauablauf zu gewährleisten. Auch der Umfang der Planungsarbeiten ist bei Holzbauten erhöht. Insbesondere die Anschlüsse erfordern einen höheren Detaillierungsgrad in der Planung. Der Arbeitsaufwand wird daher zusätzlich dadurch erhöht, dass die Anzahl der Detailzeichnungen im Holzbau zunimmt.

Die Verwendung großer Mengen brennbarer Materialien, wie es bei mehrstöckigen Gebäuden in Holzbauweise der Fall ist, kann die Schwere eines Brandes aufgrund der zusätzlichen immobilen Brandlasten erhöhen. Darüber hinaus können die Unsicherheiten hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und der Schäden von Holz im Vergleich zu z. B. Überschwemmungen oder Schäden nach Brandbekämpfungsmaßnahmen und den damit verbundenen Kosten zu erhöhten Policen führen.

Aus Sicht der Versicherer wird die Höhe der Versicherungspolice unter Berücksichtigung der verwendeten Baumaterialien festgelegt. Aufgrund der Brennbarkeit erscheint es daher logisch, wenn das Risiko eines Schadensfalls höher eingeschätzt wird als bei traditionellen Bauweisen und die Versicherungspolice entsprechend steigt. Hinzu kommt, dass die Versicherungswirtschaft bei der Bewertung und Festlegung der Versicherungspolice in der Regel auf historische Daten zurückgreift. Dadurch erscheint die Wahrscheinlichkeit höherer Schäden für den Versicherer größer als bei traditionellen Bauweisen [1]. Da viele Holzbausysteme relativ "neue" Entwicklungen sind (z.B. Brettsperrholz), ist es wahrscheinlich, dass aufgrund der Holzklassifizierung höhere Versicherungsprämien erhoben werden. Dies ist in allen Ländern mit wenig Erfahrung auf diesem Gebiet der Fall, da es mangels gebauter Beispiele an neuen Bewertungsgrundsätzen mangelt.

Um dieses Kostenproblem zu vermeiden, ist es notwendig, die Wahrnehmung der Versicherungsgesellschaften für Projekte im mehrgeschossigen Holzbau zu ändern. Dies kann durch Informationskampagnen geschehen, die von Interessenverbänden organisiert werden. In diesen Kampagnen können die Versicherer für das Thema Risiko sensibilisiert werden. Es ist wichtig, dass Experten die neuesten Entwicklungen im Holzbau diskutieren und aufzeigen, dass geeignete Brandschutzmaßnahmen das Brandrisiko im Vergleich zu traditionellen Bauweisen nicht erhöhen und die Dauerhaftigkeit gewährleistet werden kann.

Außerdem müssen die finanziellen Prognosemodelle der Versicherungsgesellschaften überarbeitet werden, damit der Holzbau nicht mehr zu erhöhten Versicherungspolicen führt. Dies erfordert die Bereitstellung und Sammlung von verfügbaren Daten über bereits errichtete Gebäude.



## Politische Hemmnisse

Viele Bauprodukte werden durch harmonisierte Normen der Europäischen Union im Rahmen der BauPVO beschrieben, die 2011 in Kraft trat und die BPR (Bauproduktenrichtlinie) ersetzte. Diese Normen werden von allen EU-/EWR-/EFTA-Ländern übernommen und sind in ganz Europa gültig. Durch die bestehenden Normen gibt es eine einheitliche Grundlage für den Entwurf und die Anforderungen an die Planer. Da jedoch ständig neue Bauprodukte entwickelt werden, ist es möglich, dass die bestehenden Auslegungs- und Produktnormen nicht den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln und nicht alle für den Markt vorgesehenen Produkte abdecken. Neben Unsicherheiten in der Planung kann dies zu einem Mehraufwand für die Planer führen, da zusätzliche Nachweisverfahren bereitgestellt werden müssen. Dies gilt insbesondere für den Holzbau, da in den letzten Jahren eine Vielzahl von neuen Bauprodukten und Entwicklungen entstanden sind. In Ermangelung einer Normung stellen die Firmen meist eigene Bemessungsdaten zur Verfügung, um ihre Produkte verkaufen zu können. Dies führt jedoch zu einem breiten Angebot auf dem Markt, was dem Planer den Überblick erschwert, da die Messungen produktbezogen durchgeführt werden müssen [29]. Zudem sind Prüfungen und Nachweise zur Bestätigung des geforderten Sicherheitsniveaus notwendig, was zu zusätzlichem Aufwand und Kosten für den Hersteller führt.

Beispiele für nicht vorhandene Bemessungsregeln für Holzprodukte in der aktuellen Fassung von [30] (Eurocode 5 -EC5) sind Aussteifungen, Brettsperrholz und Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, die jedoch in der neuen Generation des EC 5 enthalten sind. Da es in vielen Teilbereichen keine harmonisierten europäischen Bemessungsregeln gibt, werden nationale Bemessungsansätze verwendet, die eine länderübergreifende Planung erschweren, da keine einheitliche Methode verwendet wird.

Ein weiteres Beispiel sind Klebstoffe für den Einsatz in tragenden Holzbauteilen. Die Klebstoffsysteme werden nach [31] in die Temperaturstufen 50 °C, 70 °C und 90 °C eingeteilt. Dies ermöglicht die Auslegung der verwendeten Bauprodukte. Unberücksichtigt bleibt dabei jedoch die Entfestigung der Klebeverbindung bei höheren Temperaturen, wie sie im Brandfall auftreten können. Die derzeitigen Methoden decken ein solches Verhalten nicht ab, und selbst wenn Klebstoffe für Holzkonstruktionen zugelassen sind, haben sie dennoch unterschiedliche Eigenschaften und einen zum Teil sehr unterschiedlichen thermischen Widerstand.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Normen auf dem neuesten Stand zu halten, um mehr Klarheit zu schaffen und gleichzeitig die Risiken für die Planer zu reduzieren. Fehlende Informationen erschweren die Detailplanung und die Entwicklung von genormten Lösungen. Die zuständigen europäischen Normungsgremien sind mit Vertretern aus verschiedenen Ländern besetzt, die unterschiedliche baukulturelle Interessen vertreten. Aus diesem Grund ist die Entwicklung von europäischen Normen äußerst zeitaufwändig. Gleichzeitig sind Kompromisse notwendig, um eine Einigung über bestimmte Auslegungsverfahren, Grenzwerte, Prüfmethode usw. zu erzielen. Durch die lange Planung und Entwicklung der Normen ist eine Berücksichtigung aller relevanten Bauprodukte und Techniken nicht möglich. Aufgrund des langen Prozesses, der zur endgültigen Fassung einer Norm führt, werden neu entwickelte Produkte oft nicht berücksichtigt.

Die EU-Mitgliedsstaaten haben die Möglichkeit, wichtige „Nationally Determined Parameters“ (NDP) unabhängig von den vorgeschlagenen Werten zu bestimmen. Das bedeutet, dass die Verantwortung für die Einhaltung des zu erreichenden Sicherheitsniveaus bei den einzelnen Ländern verbleibt. Innerhalb der Europäischen Union gelten daher keine einheitlichen Regelungen. Ziel der europäischen harmonisierten Produktnormen ist es, nationale Produktnormen zu ersetzen. Aus diesem Grund ist eine hohe Akzeptanz für die Bemessung nach den Eurocodes sowie die Reduzierung von NDPs ein Ziel der laufenden Harmonisierung. Im EC5 werden 59% der empfohlenen Werte der NDPs akzeptiert. Allerdings sind die Werte je nach Land unterschiedlich. Mitteleuropäische Länder haben eine niedrigere Akzeptanzrate als osteuropäische Länder oder Länder mit kleinen Flächen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass diese Länder ihre traditionellen nationalen Werte beibehalten wollen, da die empfohlenen Kennwerte diese nicht ausreichend widerspiegeln. Bei der Brandbemessung [32] wird für die NDPs mit empfohlenen Werten eine deutlich höhere Akzeptanzrate von 80% erreicht als bei der „Kaltbemessung“ [30]. Allerdings gibt es auch große nationale Unterschiede in der Akzeptanz der NDPs, was bedeutet, dass nationale Regelungen einen großen Einfluss auf die Brandbemessung haben [33]. Basierend auf diesen Werten kann gesagt werden, dass der EC5 ein hohes Maß an Harmonisierung aufweist, insbesondere für die Brandbemessung, da viele Länder die vorgeschlagenen NDPs akzeptiert haben.

Wie bei einer harmonisierten Norm bietet die ETA die Möglichkeit, an nationale Bauvorschriften angepasst zu werden, um die Verwendung des Bauprodukts in diesem Land zu ermöglichen. Dies entspricht jedoch nicht dem eigentlichen Gedanken der Harmonisierung der Verwendung von Bauprodukten in der gesamten Europäischen Union.

Insgesamt bietet eine ETA die Möglichkeit, ein Bauprodukt in Europa zu verwenden, das nicht oder nur teilweise durch harmonisierte Normen abgedeckt ist, oder es gezielt auf länderspezifische Leistungsanforderungen zu beschreiben. Da jedoch national unterschiedliche Bauvorschriften gelten, die unterschiedliche Leistungskriterien enthalten können, ist es schwierig, alle Faktoren in der Leistungserklärung abzudecken.

Das Problem, das sich aus den unterschiedlichen nationalen Anforderungen ergibt, ist kaum lösbar. Aufgrund der im Vertrag über die Europäische Union (EUV) und im Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) geregelten vertraglichen Kompetenzverteilung zwischen der EU und den Mitgliedstaaten (Subsidiaritätsprinzip) dürfen Harmonisierungsmaßnahmen nicht über das Ziel eines funktionierenden Binnenmarktes hinausgehen. Dementsprechend regelt die Bauproduktenverordnung vor allem die Vermarktung von Bauprodukten im EU-Binnenmarkt. Die EU ist jedoch nicht berechtigt, Bauvorschriften zu harmonisieren. Die Schutzziele und das Schutzniveau werden von den jeweiligen Mitgliedsstaaten festgelegt und sind daher unterschiedlich. Aber auch klimatische, geografische, baukulturelle und traditionelle Unterschiede spielen hier eine Rolle und erschweren eine Harmonisierung [34].

Ein weiteres Problem bei fehlenden harmonisierten technischen Spezifikationen (Normen) für neue Bauprodukte ist der Zeitaufwand für die Erstellung einer ETA, da zunächst ein neues EAD entwickelt werden muss, um die bauprodukt-spezifischen Eigenschaften zu bewerten. Dies verursacht zusätzliche Kosten für den Hersteller und erfordert eine längere Zeitspanne, bis das Produkt vermarktet werden kann.

Dieses Problem ist eher unvermeidlich, da Prüfverfahren für innovative Produkte nicht oder nur teilweise existieren. Unter dem Sicherheitsaspekt ist es daher ratsam, geeignete Testbedingungen zu definieren, auch wenn dies zu Verzögerungen und erhöhten Mehrkosten für den Hersteller führen kann.

Bauordnungen definieren den Mindeststandard für Gebäude, um eine sichere Nutzung zu gewährleisten. Dazu werden für bestimmte Themenbereiche Anforderungen festgelegt, die von den verwendeten Bauteilen erfüllt werden müssen. Allerdings gibt es in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU Unterschiede in Bezug auf Formulierung, Struktur, Zuständigkeit usw. [35].

Generell lassen sich die Bauvorschriften in drei verschiedene Formulierungen unterteilen:

- Funktional
- Leistungsorientiert
- präskriptiv

Bei funktionalen Anforderungen werden nur die Hauptziele vorgeschrieben und es werden keine Informationen über das zu erreichende Leistungsniveau, die Nachweismethoden, die zu verwendenden Materialien oder mögliche Lösungen gegeben. Leistungsbezogene Bauvorschriften definieren das zu erreichende Leistungsniveau. Gleichzeitig werden Untersuchungsverfahren festgelegt [36]. Ein präskriptiver Ansatz hingegen verlangt anstelle der Leistungsanforderung eine bestimmte bauliche Lösung. Die einzelnen Staaten der Europäischen Union haben keine einheitliche Formulierung ihrer Bauvorschriften.

Aufgrund der Formulierung können sich für den Holzbau Nachteile bei der Anwendung ergeben. Beispielsweise können bei einem präskriptiven Ansatz die Anforderungen leicht erfüllt und überprüft werden und eine einfache Prüfung durch Dritte ist möglich. Bei festen und akzeptierten Lösungen des präskriptiven Ansatzes, wie z. B. Abmessungen oder bestimmte Materialien, ist es jedoch nicht möglich, neu entwickelte Produkte oder bestimmte Materialien wie Holz als tragende Konstruktion zu verwenden, da die bereitgestellten Informationen die Verwendung dieser Produkte einschränken, obwohl sie den Entwurfsanforderungen entsprechen würden. Die Bauordnung müsste also ständig angepasst werden, wenn eine neue Lösung auf den Markt käme, die nachweislich den Anforderungen entspricht und von der Öffentlichkeit akzeptiert wird.

Ein weiteres Problem bei präskriptiven Formulierungen ist, dass kein zu erfüllendes Leistungsniveau angegeben wird. Aus diesem Grund ist es schwierig nachzuweisen, dass eine andere Konstruktion das gleiche Leistungsniveau wie die vorgeschriebenen Lösungen bietet. Dies kann in zweierlei Hinsicht zu hohen Kosten führen. Erstens durch den Nachweis, dass das nicht in den Bauvorschriften festgelegte Leistungsniveau durch den neuen Vorschlag erreicht werden kann. Zweitens bei der Verwendung der vorgeschriebenen Lösungen, da es möglicherweise nicht möglich ist, billigere Lösungen oder Verfahren zu berücksichtigen, obwohl diese das Sicherheitsniveau nicht verringern würden.

Für die einzelnen Staaten mit präskriptiv formulierten Bauvorschriften gibt es in der Regel unterschiedliche Lösungsansätze für z.B. Bauteilkonstruktionen aus Holz mit brandschutztechnischen Anforderungen. Hier ist es oft schwierig, eine Gleichwertigkeit dieser festzustellen. Dazu müsste wiederum nachgewiesen werden, dass das Leistungsniveau des einen Landes den Leistungsanforderungen in einem anderen Land entspricht. Dies kann den Handel mit Bauprodukten und die Marktdurchdringung innerhalb der EU einschränken [37].

Es gibt viele verschiedene Anforderungen, Vorschriften und Einschränkungen, die beim Bau von Gebäuden zu berücksichtigen sind. Die Verwendung von Holz wird in der Regel durch Brandschutzvorschriften eingeschränkt. Diese sind jedoch auf europäischer Ebene nicht einheitlich. So ist es möglich, dass in anderen Ländern weitere oder zusätzliche Anforderungen an ein Gebäude, ein Bauteil, einen Baustoff, Produktionskontrollen usw. gestellt werden. Die verschiedenen Regelungen sind schwer zu harmonisieren, da sie sich unter unterschiedlichen Voraussetzungen und Randbedingungen in den einzelnen Ländern entwickelt haben. Strengere Brandschutzmaßnahmen, die den Holzbau stark einschränken, basieren in der Regel auf prägenden Ereignissen wie großen Stadtbränden, aus denen Konsequenzen gegen die Verwendung von brennbaren Baustoffen gezogen und große Holzkonstruktionen verboten wurden [36].

Die unterschiedlichen Anforderungen können für Planungsprozesse im Ausland zu Nachteilen führen, da ein erhöhter Aufwand erforderlich ist, um die entsprechenden Normen zu erfüllen. Dies kann zu zusätzlichen Unsicherheiten im Planungsprozess führen, wenn die bestehenden Vorschriften nicht verstanden werden. Auch eine Standardisierung wird dadurch erschwert [35].

Die zusätzlichen Anforderungen und Einschränkungen an den Holzbau und die verschiedenen Bauteile können zu erhöhten Kosten führen, die die Wettbewerbsfähigkeit einschränken und den Vorteil der schnelleren Bauweise durch den hohen Vorfertigungsgrad schmälern.

Außerdem gibt es in der Hälfte der europäischen Länder keine spezifischen Bauvorschriften für bestehende Gebäude [35]. Dies ist problematisch, da der Holzbau vor allem innerhalb von Städten im Zuge von Nachverdichtungen bei Erweiterungen und Sanierungen ein großes Potenzial besitzt. Daher bedarf es einheitlicher Regelungen, wie mit einem Eingriff in bestehende Gebäude umzugehen ist und welche zusätzlichen Leistungen erbracht werden müssen.

Die Bauvorschriften bestimmen, welche Produkte verwendet werden dürfen. Diese Vorschriften sind jedoch unterschiedlich und die Unternehmen müssen sich an verschiedene Regeln halten. Für ein Unternehmen, das Produkte entwickeln und vermarkten will, ist es wichtig, die Vorschriften zu kennen. Ein Unternehmen, das auf dem europäischen Markt Fuß fassen will, muss Zugang zu den Bauvorschriften der einzelnen Länder haben und diese verstehen.

Im Rahmen der persönlichen Recherchen während der Projektarbeit wurde festgestellt, dass einige Länder ihre Bauvorschriften nicht frei zugänglich zur Verfügung stellen oder sie sehr schwer zu finden sind. Die Veröffentlichung dieser erfolgt auch selten durch dieselben Ministerien, weshalb eine einheitliche Abfrage nicht möglich ist.

Außerdem ist zu verzeichnen, dass nicht alle europäischen Länder ihre Bauvorschriften in englischer Sprache anbieten. Dies macht es ausländischen Planern nur schwer möglich, die gesetzlichen Rahmenbedingungen einzuhalten, da selbst bei einer inoffiziellen Übersetzung Fehler und Unklarheiten in Bezug auf Formulierungen und Regelungen auftreten können. Dies kann ein Handelshemmnis für alle Personen sein, die mit den Sprachen der einzelnen Länder nicht vertraut sind, aber Handelsziele außerhalb ihres eigenen Landes verfolgen.

## **Potentiale**

Die Gesamtkosten von Gebäuden unterscheiden sich zwischen den Ländern im Hinblick auf die Anwendungen von Holz- und konventionellen Konstruktionen. Generell lässt sich sagen, dass der Holzbau aufgrund der höheren Materialpreise und der zusätzlichen Kosten für den Brandschutz Mehrkosten von bis zu zehn Prozent verursachen kann, die durch die Kosteneinsparungen, die durch den Holzbau erzielt werden können, nicht vollständig ausgeglichen werden können [38]. In Ländern mit längerer Erfahrung, wie z. B. Schweden, wird jedoch bereits Kostenwettbewerbsfähigkeit erreicht [3, 39]. Das Einsparpotenzial liegt in den geringeren Kosten für Gründungsarbeiten, da Holz aufgrund seiner Leichtigkeit weniger Last auf den Untergrund übertragen muss. Aus demselben Grund sind auch geringere Transportkosten möglich. Weitere Kosteneinsparungen können durch verbesserte Qualitätskontrolle, industrielle Vorfertigung von Bauteilen (schnellere Errichtung des Gebäudes) und einfachere Montagearbeiten erzielt werden. Ein weiteres Potenzial liegt in der zunehmenden Erfahrung beim mehrgeschossigen Holzbau. Mit zunehmender Bautätigkeit könnten die Produktionskosten durch den Einfluss des Lernens und der steigenden Erfahrung gesenkt werden, da Produkte und Wertschöpfungsketten verbessert werden können [27].

Der Bausektor ist für ein Drittel aller Treibhausgasemissionen weltweit verantwortlich [40]. Um die definierten Klimaziele zu erreichen, gibt es daher ein großes Einsparpotenzial. Die Emissionen teilen sich auf in die Energie, die für den Betrieb benötigt wird, und die Energie, die bei der Herstellung und Entsorgung in Baumaterialien steckt (graue Energie). Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Gebäuden (in der Regel fünfzig Jahre) sind die getroffenen Entscheidungen für einen langen Zeitraum gültig. Aus diesem Grund ist es notwendig, schon jetzt beim Bau neuer Gebäude auf den Einfluss der Materialwahl zu achten. Holz als nachwachsender Rohstoff und langfristiger Kohlenstoffspeicher bietet hierfür die optimalen Voraussetzungen. [41].

Eines der größten Zukunftspotenziale für den Holzbau liegt in der zunehmenden Verstädterung und dem damit verbundenen Platz- und Wohnraumangel in den Ballungsräumen. Aus diesem Grund sind Nachverdichtungen und Erweiterungen notwendig, um neuen Wohnraum zu erschließen und die Belegungsdichte zu erhöhen. Holz bietet hier den Vorteil eines vergleichsweise geringen Gewichts, so dass Erweiterungen an bestehenden Strukturen möglich sind. Durch den hohen Vorfertigungsgrad lassen sich kurze Bauzeiten und damit geringere Beeinträchtigungen für die Bewohner realisieren. Außerdem sind keine größeren Eingriffe in die Umwelt notwendig als bei traditionellen Bauweisen, so dass Staub- und Lärmbelastigung reduziert werden. Auch die präzisere Fertigung vereinfacht den Anschluss der Bauteile an die vorhandene Substanz. Darüber hinaus kann Holz zur Modernisierung bestehender Gebäude (z. B. durch Vorhangfassaden) verwendet werden, um den Energieverbrauch zu senken.

## Lösungsstrategien

Forschungsarbeiten und weitergehende Untersuchungen sind notwendig, um bestehende Wissenslücken zu schließen, aber auch um neue Entwicklungen anzustoßen und bestehende Systeme zu verbessern.

In diesem Projekt wurden vor allem die Eigenschaften der im Holzbau verwendeten Klebstoffe betrachtet, um die fehlenden Informationen zum Materialverhalten zu ergänzen. Dazu waren experimentelle Versuche notwendig, um das Materialverhalten in verschiedenen Konfigurationen (von klein bis groß) und bei unterschiedlichen Temperaturbelastungen zu zeigen. Mit den aus diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnissen ist es möglich, Holzwerkstoffsysteme für die Brandschutzbemessung besser zu dimensionieren und damit das Sicherheitsniveau zu erhöhen bzw. zu gewährleisten.

Um die Erkenntnisse schnell und praktisch umsetzen zu können, ist es notwendig, sie mit den verschiedenen Interessengruppen zu teilen. Konferenzen und Workshops für Vertreter aus Wissenschaft, Planern, Industrie, Rettungsdiensten und Behörden sind geeignete Möglichkeiten. Diese sollten auch während des Projekts stattfinden, da bereits gewonnene Erkenntnisse diskutiert werden können. Dieser Austausch zwischen den verschiedenen Interessengruppen ist notwendig, um ein gemeinsames Verständnis über das Verhalten von Holzwerkstoffen im Brandfall und die mögliche Notwendigkeit von Änderungen in den Konstruktionsmodellen zu entwickeln.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch die Mitarbeit in Normungsgremien Ergebnisse einzubringen und so bestehende Bemessungsansätze möglichst schnell für die Anwendung anzupassen und auf Basis der neuen Erkenntnisse zu verbessern oder neue Modelle einzuführen.

Eine weitere Möglichkeit, neues Wissen zu vermitteln, ist die Einbeziehung von Studenten und praktizierenden Ingenieuren. Durch die Einbindung von Forschungsinstituten, die in der Lehre tätig sind, ist dieser Prozess relativ einfach zu realisieren. Allerdings ist ein Austausch der beteiligten Forschungspartner (bei Verbundprojekten) notwendig, um Zugang zu allen neuen Entwicklungen zu haben.

Gerade bei internationalen oder innereuropäischen Projekten, an denen mehrere Partner länderübergreifend beteiligt sind, ist die Reichweite größer einzuschätzen. Auch der Wissensaustausch kann durch die unterschiedlichen Erfahrungen und Ansätze gefördert werden.

Aus diesem Grund sind gute Verwertungsstrategien sinnvoll und notwendig, um eine breitere Anwendung und schnellere Umsetzung neuer Erkenntnisse zu fördern.

Es gibt regionale Unterschiede zwischen den einzelnen EU-Ländern in Bezug auf die Ausgangslage und die Randbedingungen für den Holzbau. Daher gibt es in den einzelnen Ländern unterschiedliche Bauvorschriften, die den Holzbau in unterschiedlichem Maße einschränken. Diese Vorschriften definieren Anforderungen, die ein Gebäude in jedem Land erfüllen muss. Sie zielen meist auf den Brandschutz und die Anforderungen an die statische Sicherheit ab. Jeder am Bau Beteiligte muss sich an diese Vorschriften halten, auch wenn er aus dem Ausland kommt. Der freie Dienstleistungsverkehr ist also nicht eingeschränkt.

Auch bei den Bauvorschriften gibt es Unterschiede zwischen präskriptiven und leistungsbezogenen Ansätzen, und es existiert kein einheitlicher Ansatz. Während präskriptive Bauvorschriften die vorgeschriebenen Anforderungen enthalten und angeben, wie ein Gebäude zu errichten ist bzw. wie diese Faktoren in die Gebäudeplanung einzubeziehen sind, geben leistungsbezogene Bauvorschriften an, wie ein Gebäude funktionieren sollte bzw. welche Ziele damit verfolgt werden.

Ein präskriptiver Ansatz ist in dieser Hinsicht begrenzt, wenn es Abweichungen von einfachen Standardgebäuden gibt. Für diese kann es sehr schwierig oder unmöglich sein, die in den Vorschriften festgelegten Standardregeln anzuwenden. Dies bedeutet natürlich nicht unbedingt, dass das Gebäude unsicher ist, sondern nur, dass es die als akzeptabel angesehenen Lösungen nicht erfüllen kann.

Daher gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Übereinstimmung mit den Vorschriften nachzuweisen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von bereits akzeptierten Lösungen, die die von den Baubehörden festgelegten Brandschutzanforderungen erfüllen. Die andere Möglichkeit ist die Anwendung von Methoden der Brandschutztechnik. Hier ist es möglich, einen Entwurf mit bereits akzeptierten Lösungen zu vergleichen. Wenn das Sicherheitsniveau des alternativen Entwurfs gleichwertig oder höher ist als das der zuvor akzeptierten Lösung, gilt der Entwurf als vorschriftsgemäß. Eine weitere Methode ist die Verwendung von Brandbemessungen und Brandversuchen zur Bewertung eines Entwurfs anhand absoluter Kriterien. Diese Strategie ist unter der Voraussetzung anwendbar, dass das Sicherheitsniveau nicht verringert wird. Eine Kombination der genannten Methoden ist ebenfalls möglich.

Vorab akzeptierte Lösungen können den Entwurfsprozess vereinfachen, da der Entwurfsverfasser nur sicherstellen muss, dass das vorgeschlagene Gebäude und seine Nutzung in den Anwendungsbereich des vorgeschriebenen Entwurfs fallen. Daher sind keine Analysen oder Berechnungen erforderlich. Der Entwurfsverfasser muss nicht nachweisen, dass der Entwurf sicher ist. Infolgedessen können vorakzeptierte Lösungen aufgrund ihrer einfachen Anwendung kostengünstiger sein als Maßnahmen, die aus einem ingenieurtechnischen Nachweis resultieren.

Wenn eine vorab akzeptierte Lösung durch eine andere ersetzt wird, kann dies als Entwurfsalternative bezeichnet werden. Mehr Alternativen bedeuten, dass die kostengünstigsten Alternativen für ein bestimmtes Bauprojekt ausgewählt werden können. Aus diesem Grund bieten vorakzeptierte Lösungen die Möglichkeit, die Kosten zu vereinfachen und zu senken, wenn viele und ausreichende Alternativen zur Verfügung stehen. Nichtsdestotrotz müssen alle Konstruktionsalternativen überprüft werden, um zu zeigen, dass das erreichte Sicherheitsniveau den gesetzlichen Anforderungen des jeweiligen Landes entspricht. Die Entwicklung und Bereitstellung von Standardlösungen sowie von Bauteilkatalogen und Erfahrungsberichten über bereits realisierte Projekte kann die Bandbreite und Anwendbarkeit von Holzwerkstoffen erhöhen, da der Planungsprozess vereinfacht wird.

Die leistungsorientierte Planung lässt sich jedoch schneller an neu entwickelte Produkte oder bestimmte Materialien wie Holz als Tragwerk anpassen. Die Informationen, die von den bereits akzeptierten Lösungen und Vorschriften geliefert werden, schränken die Verwendung dieser Produkte ein, auch wenn sie die Planungsanforderungen erfüllen würden. Außerdem fehlt möglicherweise ein Rahmen für die Bewertung neuer Produkte.

Im Hinblick auf die Brandschutzanforderungen, die den Holzbau in den verschiedenen Ländern auf bestimmte Anwendungsbereiche (Gebäudehöhe, Bekleidung usw.) beschränken, bietet der leistungsorientierte Ansatz eine flexiblere Möglichkeit, um Innovationen zu erleichtern. Es gibt keine Beschränkungen für bestimmte Materialien solange die Schutzziele nachgewiesen werden. Dadurch wird ein fairer Wettbewerb zwischen den verschiedenen Bauarten geschaffen. Auch das Sicherheitsrisiko wird nicht erhöht, da die vorgeschlagenen Lösungen die Erfüllung der vorgeschriebenen Leistungsanforderungen voraussetzen. Um Brandschutztechniken angemessen ausführen zu können, ist ein grundlegendes Verständnis der verwendeten Prinzipien erforderlich, die für die Entwicklung leistungsorientierter Entwürfe notwendig sind. Kenntnisse der Bauvorschriften sind ebenso erforderlich wie Kenntnisse über das Brandverhalten von Baustoffen und die Feuerbeständigkeit von Bauteilen, um die Leistungsmerkmale zu überprüfen. Dies ist bei der Anwendung eines präskriptiven Ansatzes nicht der Fall.

Beide Systeme haben Vor- und Nachteile. Es gibt viele Situationen, z. B. bei einfacheren Gebäuden, in denen es nicht wirklich notwendig ist, brandschutztechnische Methoden anzuwenden. In diesem Fall ist es wünschenswert, bereits akzeptierte Lösungen zu haben, um das Prüfverfahren zu vereinfachen und zu verbilligen. Mehr Alternativen können die Kosten senken, da die am besten geeignete Lösung ausgewählt werden kann. Diese müssen kontinuierlich angepasst werden, wenn eine neue Lösung auf den Markt kommt, die nachweislich die Anforderungen der jeweiligen Bauvorschrift erfüllt.

Die Recherchen haben auch gezeigt, dass es gewisse Vorurteile gegenüber dem Baustoff Holz aufgrund seiner brennbaren Eigenschaften gibt. Diese beruhen meist auf mangelndem Wissen und können mit einer größeren Verbreitung von Holzkonstruktionen abgebaut werden, wenn gezeigt wird, dass diese Gebäude das Sicherheitsniveau einhalten können. Die sichere Verwendung neuer Holzprodukte kann nur durch weitere Forschung gewährleistet werden, um das Material- bzw. Bauteilverhalten zu untersuchen und mögliche Gefahrenquellen zu identifizieren. Das Hauptziel ist es, die Schutzziele der Bauvorschriften zu gewährleisten.

Bei der Definition von Normbränden und dem Nachweis von Bauteilen werden in den meisten Bauvorschriften und Normen die Standardbrandkurven verwendet. Diese stellen keine realistischen Brandszenarien in Gebäuden dar und können daher konservativ sein, da viele Merkmale wie Belüftung oder örtlich begrenzte Brände nicht berücksichtigt werden. Um die Brandsicherheit von Bauteilen zu überprüfen, werden in der Regel Brandversuche durchgeführt, bei denen die Brandbeanspruchung auf diesen standardisierten Brandkurven (ETK) basiert. Diese Tests werden mit zunehmender Größe der geprüften Bauteile immer teurer.

Daher können Kosten eingespart werden, wenn kleinere Prüfungen oder Prüfverfahren verwendet werden. Ein weiterer Vorteil ist die leichtere Wiederholbarkeit und die Möglichkeit, aufgrund der geringeren Kosten mehr Daten zu sammeln, da mehr Versuche möglich sind.

Eine weitere Möglichkeit zur Kosteneinsparung wäre die Verwendung von Naturbrandmodellen, um Bauteile für bestimmte Brandlasten auszulegen und eine Überdimensionierung aufgrund konservativer Konstruktionsansätze zu vermeiden.

Technische Methoden wie numerische Simulationen sind eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von Bauteilen. Es sind jedoch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die vorhandenen Materialmodelle zu verbessern und zu validieren, damit aussagekräftige und zuverlässige Ergebnisse erzielt werden können. Derzeit werden häufig effektive Parameter verwendet, die nicht alle physikalischen Vorgänge bei einer thermischen Belastung abbilden und nicht der Realität entsprechen. Daher besteht hier das Potenzial, die Materialmodelle weiter zu verbessern und mehr instationäre Transportprozesse einzubeziehen.

Durch länderübergreifende Zusammenarbeit ist es möglich, Erfahrungen auszutauschen, Doppelforschung zu vermeiden und gemeinsame Datenbanken aufzubauen, die auch die Kosten bei der Entwicklung neuer technischer Produkte und deren Verbreitung auf dem Markt reduzieren können.

Die identifizierten Barrieren und Hindernisse für die weitere Verbreitung des Holzbaus und neuer Holzbauprodukte gehen meist Hand in Hand oder beeinflussen sich gegenseitig. Ein großer Teil der

Hemmnisse ist jedoch immer mit mangelndem Wissen verbunden. Sei es über die Leistungsfähigkeit von neuen Bauteilen, die Anwendbarkeit in der Praxis oder die Einschränkungen durch Bauvorschriften, wenn die notwendigen Nachweise fehlen. Aus diesem Grund ist die Forschung in diesen Bereichen erforderlich, um kritische Wissenslücken zu schließen und die Anwendbarkeit neuer Produkte zu erleichtern sowie die Sicherheit der Produkte und Gebäude zu gewährleisten. Insbesondere durch vorakzeptierte Lösungen besteht die Möglichkeit, Standardgebäude schneller, einfacher und kosteneffizienter zu planen und zu errichten. Aber auch die länderübergreifende Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Instituten kann ein wichtiger Beitrag zur schnelleren Verbreitung neu entwickelter Holzprodukte, Prüfverfahren oder Bemessungsmodelle sein.

### **Arbeitspaket 3: Experimentelle Nachweise**

Aufgrund der chronologischen Abfolge zur Bearbeitung der Arbeitspakete wird Arbeitspaket 3 zur Besserung Nachvollziehbarkeit vorgezogen, da die Untersuchungen und Ergebnisse des Arbeitspakets 2 hauptsächlich auf diesem aufbauen.

Hier wurden vier verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um das Verhalten von eingeklebten Gewindestangen unter Temperaturbelastung zu untersuchen, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### **Versuchsreihe 1**

##### **Versuchsreihe 1 - Materialien**

Die Versuchsreihe 1 umfasste kleinformatige Prüfkörper unter Zugscherbelastung in Anlehnung an die EN 302-1 [42], um die Versuchsparameter für die weiteren Untersuchungen festlegen zu können. Dabei wurden mehrere Varianten und Ausführungen untersucht, die Einfluss auf das Versagen haben können:

- Die Prüfkfiguration
- Die Höhe der Belastung
- Die Temperatur
- Die Klebstofffugendicke
- Der Klebstofftyp
- Das Aufheizverhalten

Pro Variante wurden je 10 Prüfkörper getestet. Die Ergebnisse wurden anschließend auf „Ausreißer“ untersucht. Die entsprechenden Werte wurden aussortiert und werden in den nachfolgenden Ergebnissen und Darstellungen nicht mehr aufgeführt.

Die Prüfkörper wurden aus Buchenholzplatten hergestellt. Das Holz wurde vor der Verklebung im Normklima gelagert (20 °C / 65% r. F.) bis die Ausgleichsfeuchte erreicht wurde. Insgesamt ergaben sich elf verschiedene Prüfreihe. Die Verklebung der Platten für alle Prüfkörper wurde aufgrund der begrenzten Größe der hydraulischen Presse in drei unterschiedlichen Chargen gefertigt. Die ursprünglich aus acht Prüfvarianten bestehende Konfiguration wurde in den ersten zwei Chargen hergestellt. Für die erweiterten Versuche mit längeren Lagerdauern der Prüfkörper unter Wärmeeinwirkung wurden die Platten der Charge drei eingesetzt. Die mittlere Rohdichte beträgt für Charge 1 712,8 kg/m<sup>3</sup> für Charge 2 729,0 kg/m<sup>3</sup> und für Charge 3 775,2 kg/m<sup>3</sup>.

Zur Verklebung wurden zwei unterschiedliche Klebstoffsysteme verwendet.

- 2K-EP
- 2K-PUR

Die Klebstoffe werden im Folgenden als Klebstoff 1 bzw. Adhesive 1 (2K-EP) und Klebstoff 2 bzw. Adhesive 2 (2K-PUR) bezeichnet.

Zur Bestimmung der notwendigen Aufheizdauer wurden in einige Prüfkörper innerhalb der Klebefuge Thermoelemente des Typs K eingelassen. Vor den Versuchen wurden die Prüfkörper mit eingeklebten Thermoelementen aller drei Fugendicken in die Wärmeschranke gelegt und die Aufheizdauern zum Erreichen der jeweiligen Temperaturstufe protokolliert. Aufgrund der hieraus gewonnen Heizdauern wurden die notwendigen Aufheizzeiten für die einzelnen Temperaturstufen festgelegt

##### **Versuchsreihe 1 - Prüfkfigurationen**

Insgesamt wurden zwei verschiedene Prüfkfigurationen mit unterschiedlichen Varianten durchgeführt. In Prüfkfiguration 1 (Warmzugversuche) wurden die Prüfkörper vor der Prüfung in einem Ofen auf das angestrebte Temperaturniveau gebracht und danach in die Prüfmaschine eingespannt. Daraufhin wurde eine weggesteuerte Zugbelastung von 2,5 mm/min bzw. 5 mm/min aufgebracht bis die Prüfkörper versagt haben. Die hohe Geschwindigkeit wurde ausgewählt, um einen Einfluss aus der Abkühlung der Prüfkörper zwischen Entnahme aus dem Ofen und Einbau in die Prüfmaschine so gering wie möglich zu halten. Die Prüfgeschwindigkeit wurde verringert, nachdem bei den aufgeheizten Prüfkörpern mit Fugendicken von

3,0 mm bereits ein Versagen direkt nach der Lastaufbringung festgestellt wurde. Messtechnisch aufgezeichnet wurde jeweils die Längsverformung durch die Universalprüfmaschine der Fa. Zwick, die maximale Zuglast bis zum Bruch der Prüfkörper sowie visuell der Holzfaserbruchanteil je Prüfkörper (geschätzt in 10 % Schritten).

Es wurden drei Klebstoffugendicken (0,1 mm; 1,0 mm; 3,0 mm) getestet. Bei den Warmzugversuchen wurden die Prüfkörper neben der Raumtemperatur von 20 °C, auf die vier Temperaturstufen 60 °C (nach DIN 1052 [43]), 70 °C und 90 °C (nach EN 301 [31]) sowie 110 °C erhitzt und anschließend mechanisch belastet. Bei der Temperaturstufe von 90 °C wurde darüber hinaus beurteilt, inwieweit sich die Erwärmungsgeschwindigkeit auf die Festigkeit der Klebefuge auswirkt. Hier wurde zwischen einer langsamen (90\_s: 65 min bis 90 °C erreicht wurden) und einer schnellen Aufheizperiode (90\_f: 10 min bis 90 °C erreicht wurden) unterschieden.

Bei der langsamen Erwärmung wurde ein Tempereffekt bei beiden Klebstoffen festgestellt, wodurch sich eine Nachverfestigung des Klebstoffs ergibt. Aus diesem Grund wurden zusätzlich drei weitere Versuchsreihen (Charge 3) bei 70 °C und mit einer Klebstoffugendicke von 1,0 mm durchgeführt, bei denen die Prüfkörper nach Erreichen des angestrebten Temperaturniveaus für je 30 min, 60 min bzw. 120 min auf dieser Temperatur gehalten wurden, bevor die mechanische Prüfung stattfand (70\_30, 70\_60, 70\_120). Die überschüssigen Prüfkörper wurden schließlich bei der Temperaturstufe von 40 °C verwendet. Da hier jedoch nur ca. drei Prüfkörper pro Temperaturstufe verwendet wurden, werden diese nicht als repräsentativ angesehen.

Zur Kontrolle wurden während der Versuche ebenfalls Prüfkörper mit Thermoelementen parallel zu den Versuchsprobekörpern aufgeheizt, um die Klebstoffugentemperatur zu messen.

Um einen Temperaturabfall in der Klebefuge in der Zeitspanne bis zum Einbau in die Prüfvorrichtung in der Prüfkonfiguration 1 zu verhindern, wurden die Prüfkörper nach der Thermoschrankentnahme wärmeisoliert. Zusätzlich war in die Prüfvorrichtung eine Heizbox eingebaut, die im Vorhinein auf das jeweils gleiche Temperaturprüfniveau vorgeheizt wurde (s. Abbildung 1). Hierbei konnte festgestellt werden, dass selbst bei der höchsten Temperaturstufe von 110 °C durch die getroffenen Maßnahmen lediglich ein Abfall von maximal 3 °C in der Klebefuge zwischen Aufheizen und Einbau des Prüfkörpers auftritt.

Ein Einfluss der Umwicklung der Prüfkörper mit dem Dämmmaterial auf die Scherzugfestigkeit durch Reibungskräfte konnte nicht festgestellt werden.

In Prüfkonfiguration 2 (Warmkriechversuche) wurden die Prüfkörper in die Prüfvorrichtung eingespannt und mit einer konstanten mechanischen Zuglast (abgeleitet aus Prüfkonfiguration 1 bei 20 °C) beansprucht. Der in den Prüfstand eingebaute Ofen wurde auf eine Temperatur von 110 °C vorgeheizt. Ein Abkühlen auf Raumtemperatur und erneutes Aufheizen des Prüfstandes für jeden Prüfvorgang wurde aufgrund des hohen Zeit- und Mehraufwands als nicht praktikabel angesehen. Das Lastniveau wurde auf jeweils 40 % bzw. 60 % der Maximallast aus den Referenzversuchen festgelegt. Aufgrund des schnellen Versagens vor Erreichen des Lastniveaus der Prüfkörper mit 3,0 mm Klebefuge mit 2K-EP unter einer Last von 0,6  $F_{max}$  wurde bei dieser Prüfreihe aus diesem Grund ein neues Lastniveau von 20 % betrachtet.

Neben der Längsverformung wurde die Temperatur in der Klebefuge sowie die Zugbelastung aufgezeichnet. Außerdem wurde der Holzfaserbruchanteil (visuell in 10 %-Schritten) notiert.

Auf eine Anbringung von Thermoelementen in die Prüfkörper während der Prüfung wurde verzichtet, da diese eine Schwächung der Klebefläche darstellen und die Ergebnisse zur Zugfestigkeit verfälschen können.



**Abbildung 1: Eingebaute Thermobox in Prüfeinrichtung**



## Versuchsreihe 1 - Versagensarten

Nach der Prüfungsdurchführung wurde qualitativ die Versagensart der Prüfkörper festgestellt. Hier wurde zwischen sechs Varianten unterschieden (s. auch Abbildung 2):

- Adhäsionsversagen Klebstoff (a)
- Kohäsionsversagen Klebstoff (b)
- Holzversagen (c)
- Mischbruch, sobald eine Versagensart mehr als 20 % an der Bruchfläche beteiligt war
  - Mischbruch aus Adhäsions- und Kohäsionsversagen (a-b)
  - Mischbruch aus Adhäsions- und Holzversagen (a-c)
  - Mischbruch aus Kohäsions- und Holzversagen (b-c)



a



c



a-b



a-c

**Abbildung 2: Versagensarten der Prüfkörper**

Des Weiteren wurden Prüfkörper mit großem Blasenanteil (trat häufiger bei dicken Klebefugen und beim Klebstoff 1 auf, da viskoser in Verarbeitung) auf die erreichte Bruchlast und Bruchfigur untersucht (s. Abbildung 3). Beim Klebstoff 2 wird vermutet, dass die während der Verarbeitung im Gegensatz flüssigere Viskosität dazu führt, dass einer Blasenentstehung vorgebeugt wird. Wenn davon auszugehen war, dass die Blase einen negativen Einfluss auf die erreichte Bruchlast hatte, wurden die Prüfkörper aussortiert und nicht in die Analyse aufgenommen. Einige Prüfkörper wiesen beim Bruch keine vollständige Trennung der verklebten Flächen auf. Bei diesen wurde die Bruchlast und die resultierenden Festigkeiten mit in die Analyse aufgenommen. Der Holzfaserverbruchanteil beim nachträglichen, händischen Auftrennen der restlichen Verklebung wurde hingegen nicht berücksichtigt, da nicht bestimmt werden konnte, welcher Anteil des Bruchbildes auf Grundlage der Belastungseinrichtung und welcher aufgrund der nachträglichen Trennung basiert.



**Abbildung 3: Blasenbildung in Prüfkörper mit Fugendicke 3,0 mm**



## Versuchsreihe 1 - Einfluss der Temperatur

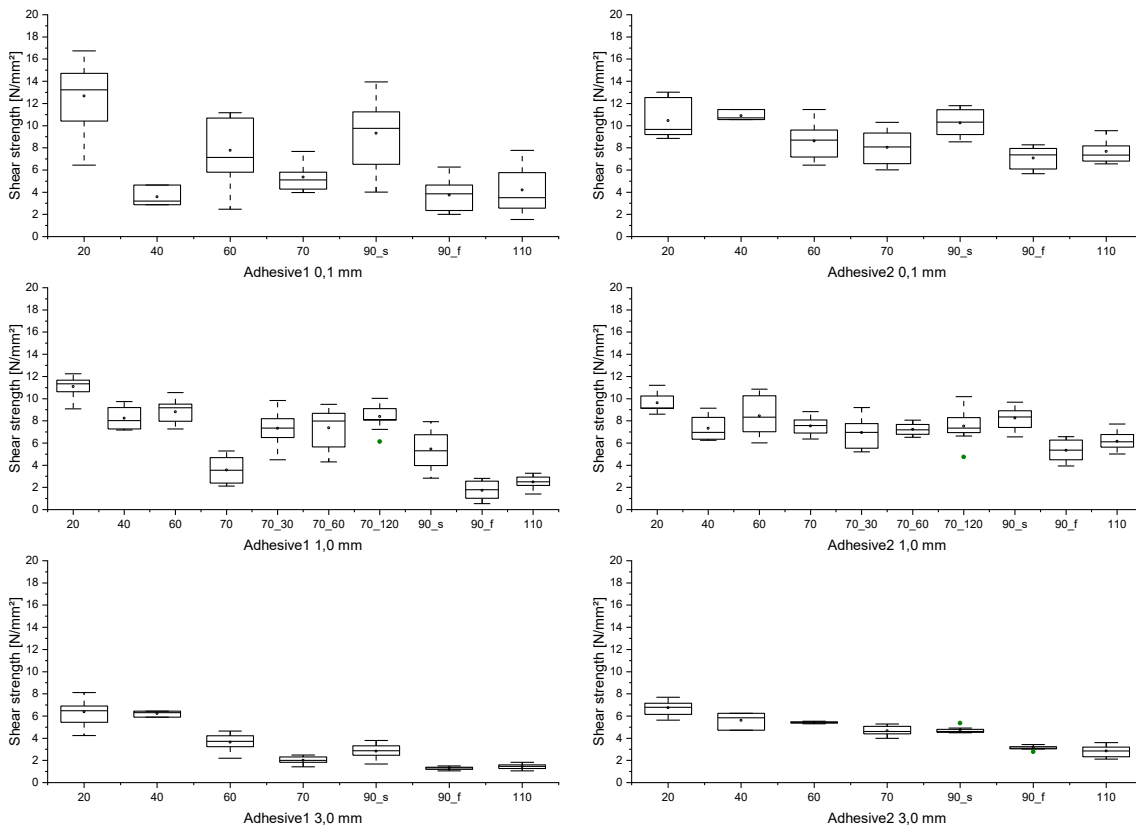
Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die erreichten Schubfestigkeiten der durchgeführten Warmzugversuche. Auf der horizontalen Achse werden die unterschiedlichen Temperaturprofile angegeben. Die zugehörigen Schubfestigkeiten werden auf der y-Achse angezeigt. Die Diagramme zeigen, dass Klebstoff 1 bei den Referenzversuchen im Schnitt eine etwas höhere Festigkeit erreicht als Klebstoff 2. Diese liegen bei der Fugendicke von 0,1 mm ungefähr 20 % höher und bei der 1,0 mm Fugendicke ca. 15 %. Bei der Fugendicke von 3,0 mm ist dies nicht der Fall. Hier wird aufgrund der größeren Fugendicke vermutet, dass eine zusätzliche Momentenbelastung auftritt, die zu einem früheren Versagen der Prüfkörper führt.

Für Klebstoff 1 mit einer Fugendicke von 0,1 mm ist bereits bei 60 °C ein starker Rückgang der Schubfestigkeit zu erkennen, der mit steigendem Temperaturniveau weiter absinkt. Die sehr geringen Werte bei der Temperaturstufe von 40 °C stellen vermutlich einen Fehler in den Prüfkörpern dar, da der Abfall atypisch verläuft und unter den ermittelten Werten von 60 °C liegt. Bei dem Versuch mit einem Temperaturniveau von 90 °C bei langsamer Erwärmung der Prüfkörper zeigt sich ein Anstieg der Schubfestigkeit im Vergleich zur Prüfung mit schnellem Aufheizen. Als Grund hierfür wird ein Temperatureffekt mit Nacherhärtung angesehen. Härten Klebstoffe bei Raumtemperatur aus, so kann eine nachträgliche Temperatureinwirkung zu einem Nachhärtungseffekt führen, wodurch der Vernetzungsgrad und die Glasübergangstemperatur erhöht wird. Gerade bei 2K-EP Klebstoffen ist eine gute Nachhärtung bei Temperaturen um 70°C möglich, da die OH-Gruppen der Epoxidkomponente bei Raumtemperatur noch nicht an den zu höheren Vernetzung führenden Reaktionen teilnehmen. Hierdurch wird eine höhere Festigkeit des Klebstoffs erreicht. Der gleiche Effekt wird für die 1,0 mm dicke Klebstoffe deutlich.

Bei den Versuchen auf einem Temperaturniveau von 70 °C, mit anschließender Lagerung der Prüfkörper im Thermoschrank für jeweils 30, 60 und 120 Minuten wird ebenfalls eine Nacherhärtung festgestellt. Je länger die Lagerdauer ist, umso höher wird die Schubfestigkeit.

Bei 110 °C ist ein nicht signifikanter Anstieg der Schubfestigkeit zu erkennen. Das liegt vermutlich an der langen Aufheizdauer von 70 Minuten, wodurch sich ein leichter Nacherhärtungseffekt gegenüber den Versuchen bei schneller Erwärmung und der Temperatur von 90 °C eingestellt hat. Da die Steigung der Festigkeit allerdings nur gering ausfällt, wird vermutet, dass in diesem Temperaturbereich bereits die Zersetzung des Klebstoffs stattfindet und eine Nacherhärtung nur eine untergeordnete Rolle spielt bzw. keinen großen Effekt auf die Festigkeitssteigerung hat.

Bei der Klebstofffugendicke von 3,0 mm ist trotz ungünstiger Belastungssituation eine Abnahme der Schubfestigkeit bei steigender Temperatur zu erkennen. Bei der langsamen Erwärmung für die Temperaturstufe 90 °C ist ein leichter Anstieg zu erkennen was auch hier für einen Temperatureffekt spricht.



**Abbildung 4: Schubfestigkeit der Versuche innerhalb der Warmzugversuche**

Für Klebstoff 2 ist bei allen drei Fugendicken ebenfalls ein Abfall der Schubfestigkeit ab 60 °C zu erkennen. Dieser fällt allerdings nicht so stark aus wie für Klebstoff 1. Auch die gesamte Festigkeitsabnahme ist im Fall von 110 °C geringer als bei Klebstoff 1.

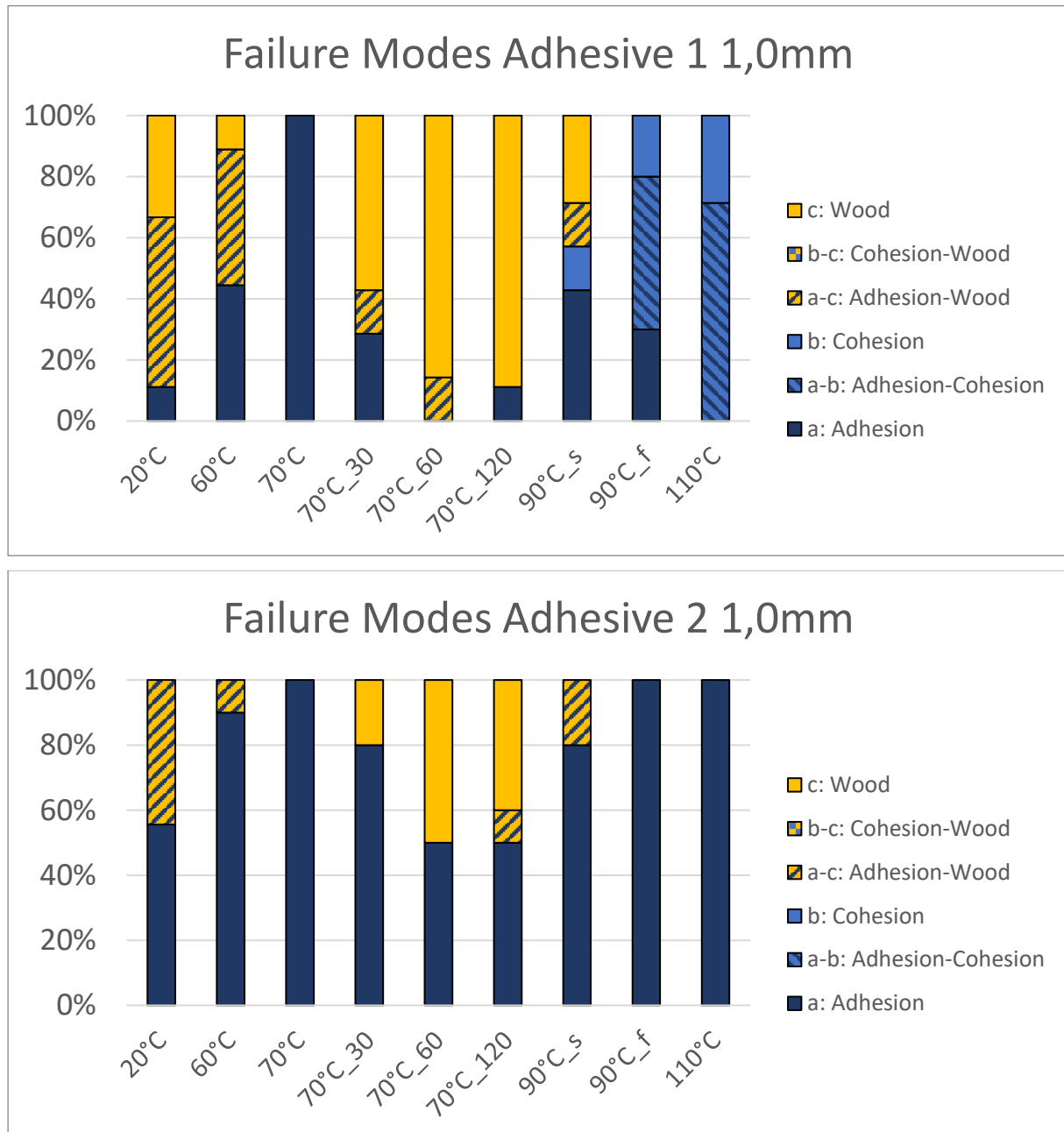
Bei der langsamen Erwärmung für 90 °C ist für die Klebstofffugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm eine leichte Zunahme der Schubfestigkeiten zu erkennen. Diese Nacherhärtung ist aber nicht so stark ausgeprägt wie bei Klebstoff 1. Die Prüfkörper beim Temperaturniveau mit 70 °C zeigen bei der Lagerung im Thermoschrank im Gegensatz dazu kein signifikanten Schubfestigkeitszunahmen. Erst ab einer Lagerdauer von 120 Minuten ist ein leichter Anstieg zu erkennen. Diese stellten sich erst bei einer Temperatur von 90 °C ein, weshalb davon ausgegangen wird, dass bei diesem Klebstoff höhere Temperaturen notwendig sind und das Verfahren zur Temperung von Klebstoffen daher auf den jeweiligen Klebstofftyp angepasst werden muss. Insgesamt sind daher mehr Versuche notwendig, um die optimalen Nacherhärtungsparameter zu bestimmen. Die Versuche haben gezeigt, dass diese abhängig vom Klebstofftyp, von der Temperatur und der Zeitdauer der Temperatureinwirkung sind und diese einen großen Einfluss auf die zu erreichende Festigkeit des Klebstoffs besitzen.

Die Ergebnisse werden durch die Versagensmodi der einzelnen Versuche bestätigt. Die ermittelten Versagensmodi werden beispielhaft für eine Klebstofffugendicke von 1,0 mm in den beiden nachstehenden Diagrammen anteilmäßig dargestellt (s. Abbildung 5). Dabei weisen bläuliche Einfärbungen auf ein Klebstoffversagen und gelbliche Verfärbungen auf ein Holzversagen hin. Die Ergebnisse für die anderen Klebstofffugendicken befinden sich im Anhang 0.

Bei Raumtemperatur weist der Klebstoff 1 mit ca. 90 % einen größeren Anteil an Holz- und Mischbruch als der Klebstoff 2 auf (ca. 40 %). Hier ist deshalb von einer größeren Festigkeit des Klebstoffs 1 bei Normaltemperatur auszugehen.

Für den Klebstoff 1 ist ein Anstieg an Adhäsionsversagen bei einer Temperatur von 60 °C zu beobachten. Dieser Anteil steigt bei 70 °C auf 100 %. Ein Holzbruch in jeglicher Form tritt ab dieser Temperatur nicht mehr auf. Ab 90 °C verändert sich der Versagensmodus im Klebstoff und wechselt von einem Adhäsions- zu einem Kohäsionsversagen, wodurch vermutet wird, dass die innere Festigkeit des Klebstoffs abnimmt. Erst bei den Versuchsreihen mit langsamer Erwärmung bei der Temperaturstufe von 90 °C oder der Lagerung der Prüfkörper bei 70 °C steigt der Anteil am Holzversagen wieder. Daraus wird ersichtlich, dass bei längerer Aufheizdauer eine Nacherhärtung stattfindet. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Dauer von 60 Minuten bereits ein Großteil des Nacherhärtungsprozesses abgelaufen ist, da sich für 120 Minuten keine wesentlichen Steigerungen im Holzversagen eingestellt haben.

Beim Klebstoff 2 tritt im Vergleich zu Klebstoff 1 bei Raumtemperatur kein reines Holzversagen auf. Auch hier wird bei den Schubfestigkeiten ein ca. 15 % geringerer Wert als für Klebstoff 1 erreicht. Ab 60 °C ist in 90 % der Fälle der Klebstoff maßgeblich für das Versagen der Verbindung. Es tritt dabei hauptsächlich ein Adhäsionsbruch zum Holz auf. Bei der längeren Aufheizdauer bzw. der Versuchsreihe mit der langsamen Erwärmung sind hier im Gegensatz zu den Werten der Schubfestigkeit Anzeichen für eine Nacherhärtung des Klebstoffs zu sehen, da ein Zuwachs des Holzfaserverbruchsanteils vorhanden ist. Dieser ist allerdings nicht so stark ausgeprägt wie für den Klebstoff 1. Auch werden bei einer Lagerung von 120 Minuten keine signifikanten Unterschiede im Versagensverhalten festgestellt, woraus geschlossen wird das auch bei Klebstoff 2 nach ca. 60 Minuten ein Großteil des Nacherhärtungsprozesses abgeschlossen sein müsste.



**Abbildung 5: Versagensart der beiden Klebstoffe mit 1,0 mm Klebstofffugendicke (a: Adhäsion, b: Kohäsion, c: Holz)**

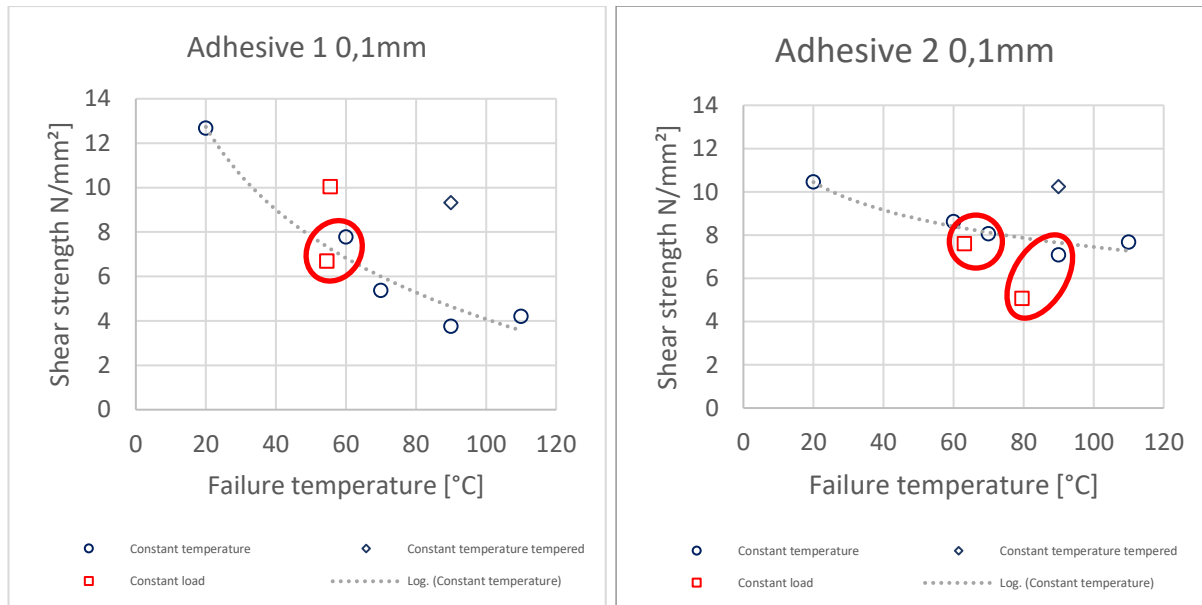
Die durchgeführten Kriechversuche belegen jedoch, dass dieser Nacherhärtungseffekt bei einer schnellen Erwärmung nicht auftritt. Daher wird während einem Brandfall kein positiver Einfluss auf die Tragfähigkeit des Klebstoffs erwartet. Insgesamt wird die Temperung jedoch als eine gute Nachbehandlungsmöglichkeit der Verbindungen angesehen, um deren Glasübergangstemperatur sowie die Festigkeit des Klebstoffs dauerhaft zu erhöhen. Diese muss allerdings klebstoffabhängig angepasst werden, da die Klebstofftypen unterschiedlich auf die Erwärmung reagieren.

## Versuchsreihe 1 - Einfluss des Prüfzenarios

In den nachfolgenden Diagrammen werden die Ergebnisse sowohl aus der Prüfkongfiguration 1 als auch der Prüfkongfiguration 2 miteinander verglichen. Hierzu werden im Falle der Warmzugversuche die Mittelwerte der erreichten Schubfestigkeit auf die einzelnen konstanten Temperaturstufen (20 °C, 60 °C, 70 °C, 90 °C, 110 °C) während der Versuche bezogen. Im Falle der Warmkriechversuche wird die aufgebrachte konstante Ziellast auf die entsprechende Schubfestigkeit der Verbindung umgerechnet und mit den mittleren gemessenen Versagenstemperaturen kombiniert. Die Versuche mit Nacherhärtungseffekten aus Prüfkongfiguration 1 werden getrennt aufgeführt und fließen nicht in die logarithmische Trendlinie zum Festigkeitsabfall ein.

In Abbildung 6 werden die Werte für eine Klebstoffugendicke von 0,1 mm dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Klebstoff 1 bei den Versuchen mit konstantem Temperaturniveau (Prüfkongfiguration 1) einen größeren Festigkeitsabfall aufweist als Klebstoff 2. Bei der Temperatur von 90 °C finden sich in beiden Diagrammen je zwei unterschiedliche Werte. Der höhere entspricht den Versuchen mit langer Aufheizdauer und zeigt die erhöhten Festigkeitseigenschaften durch den Nacherhärtungseffekt an. Vergleicht man die Werte der Warmkriechversuche mit den jeweils nächsthöheren Schubfestigkeiten der Warmzugversuche fällt auf, dass trotz der kleineren Last in Prüfkongfiguration 2 eine geringere Versagenstemperatur vorliegt (rote Markierung). Eine Ausnahme bildet hierbei für Klebstoff 1 der Kriechversuch mit höherer Belastung, da für diesen kein vergleichbarer Wert vorliegt.

Allerdings liegen bei den Warmkriechversuchen bei beiden Lastniveaus ungefähr gleiche Versagenstemperaturen vor, weshalb angenommen wird, dass die Tragfähigkeit bereits für das niedrigere Lastniveau bei einer Erwärmung des Klebstoffs nicht mehr gewährleistet wird. Im Gegensatz dazu liegen bei Klebstoff 2 für die Versuche mit konstanter Last (Prüfkongfiguration 2) beim niedrigeren Lastniveau anscheinend Tragreserven vor bzw. die Schwächung des Klebstoffs fällt geringer aus, wodurch sich erst zu einem späteren Zeitpunkt und einer höheren Temperatur ein Versagen einstellt.



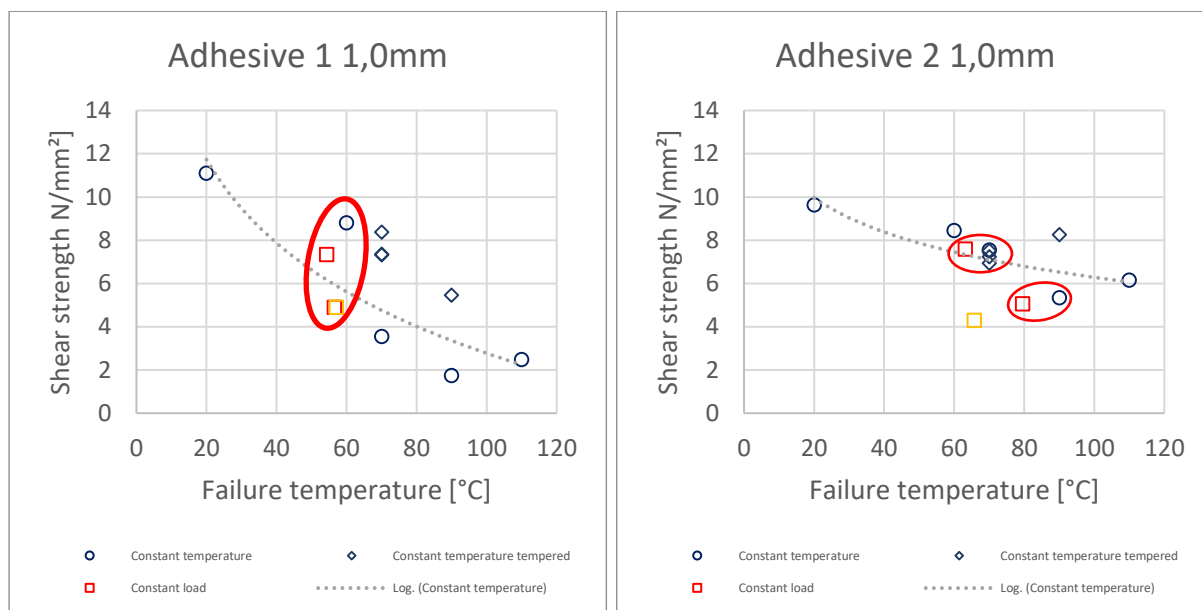
**Abbildung 6: Vergleich der Ergebnisse aus den zwei Prüfkongfigurationen bei den Prüfkörpern mit einer Klebstoffugendicke von 0,1 mm**

Für die Fugendicke von 1,0 mm stellt sich ein ähnliches Bild ein (s. Abbildung 7). Die Warmkriechversuche mit einer Temperaturbelastung von 130 °C sind orange dargestellt. Bei den Temperstufen von 70 °C und 90 °C sind für die Versuche mit konstanter Temperatur (Prüfkongfiguration 1) mehrere Werte aufgrund der Versuche mit Nacherhärtungseffekten vorhanden.

Klebstoff 2 weist bei den Warmzugversuchen keinen so großen Festigkeitsabfall auf wie Klebstoff 1. Dieser besitzt jedoch bei Raumtemperatur eine insgesamt höhere Tragfähigkeit. Vergleicht man bei Klebstoff 1 die Werte der Prüfkongfiguration 2 mit jenen der Prüfkongfiguration 1 (rot markiert) fällt auf, dass trotz geringerem Lastniveau eine niedrigere Versagenstemperatur vorliegt. Dabei liegen für beide Lastfälle die Versagenstemperaturen der Kriechversuche wieder auf einem ähnlichen Niveau, wodurch davon ausgegangen wird, dass die Tragfähigkeit des Klebstoffs bereits für das niedrigere Lastlevel nicht mehr gegeben ist. Der gleichbleibende Temperaturbereich bei den Kriechversuchen (auch bei der schnellen Erwärmung auf 130 °C) lässt auf eine kritische Temperatur schließen, bei dem die Tragfähigkeit des Klebstoffs rapide abnimmt. Diese Beobachtung stimmt auch mit den Verformungskurven ein, bei denen sich keine bzw. nur eine insignifikante Kriechverformung einstellt, sondern ein schlagartiges Versagen der Prüfkörper auftrat.

Bei Klebstoff 2 ist bei den Warmzugversuchen mit einem Niveau von 70 °C keine Steigerung der Festigkeit zu erkennen. Diese tritt erst bei den Versuchen mit langsamer Erwärmung auf 90 °C auf, wodurch davon

ausgegangen wird, dass höhere Temperaturen notwendig sind, um den Nacherhärtungsprozess anzuregen. Der Vergleich der Warmkriechversuche mit den nächsthöheren Werten der Zugversuche aus Prüfkongfiguration 1 zeigt geringere Versagenstemperaturen. Allerdings unterscheiden sich die Versagenstemperaturen in Abhängigkeit des vorherrschenden Lastniveaus. Bei einer Erhöhung der Temperatur sind daher ausreichend Tragreserven im Klebstoff vorhanden, um das Lastniveau von 40 % der Referenzlast aufzunehmen, sodass erst bei höheren Temperaturen die weitere Festigkeitsabnahme zu einem Versagen führt.



**Abbildung 7: Vergleich der Ergebnisse aus den zwei Prüfkongfigurationen bei den Prüfkörpern mit einer Klebstofffugendicke von 1,0 mm**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Vergleich zwischen den beiden Konfigurationen zeigt, dass das gewählte Prüfverfahren Einfluss auf die Ergebnisse besitzt. Dabei zeigen die Warmkriechversuche niedrigere Werte für das Klebstoffversagen und sollten somit auf der sicheren Seite liegen. Des Weiteren spiegeln die Versuche die Belastungssituation in der Realität besser wider. Durch die Belastungsweise liegen die Kriechversuche näher an der Praxis, da keine Haltezeit der Temperatur vorhanden ist, sondern diese kontinuierlich gesteigert wird. Des Weiteren stehen die Prüfkörper unter einer konstanten mechanischen Belastung.

Die Warmzugversuche bieten dahingehend den Vorteil, dass sie leicht wiederholt werden können, da ein einfacher Prüfaufbau und -ablauf vorhanden ist, der einfach nachgebildet werden kann, sodass eine Vergleichbarkeit verschiedener Studien besteht.

Bei den Warmkriechversuchen muss eine Aufheizvorrichtung in der Prüfeinrichtung vorhanden sein. Diese kann sich jedoch je nach Leistungsfähigkeit, Größe und Wärmeübertragungsmechanismus unterscheiden, wodurch der Aufheizevorgang sich anders entwickeln kann. Des Weiteren ist in der Praxis ein Abkühlen der Heizvorrichtung auf Raumtemperatur nicht als wirtschaftlich anzusehen. Dadurch wird der Prüfkörper bereits beim Einbau in die Prüfeinrichtung thermisch belastet, was ja nach Zeitaufwand zu differenzierten Ergebnissen führen kann.

### Versuchsreihe 1 - Einfluss des Lastniveaus

Innerhalb der Versuche der Prüfkongfiguration 2 wurden die Zeitpunkte zum Versagen der Prüfkörper bestimmt und daraus auf die in der Klebefuge vorherrschende Temperatur geschlossen. Die in den Versuchen gemessenen Temperaturen je Prüfkörper werden beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung 8 für ein Belastungsniveau mit 40 % der Maximalbelastung aus den Referenzversuchen dargestellt. Dabei stehen die blauen gefüllten Symbole für Klebstoff 1, während die grünen Symbole Klebstoff 2 repräsentieren.

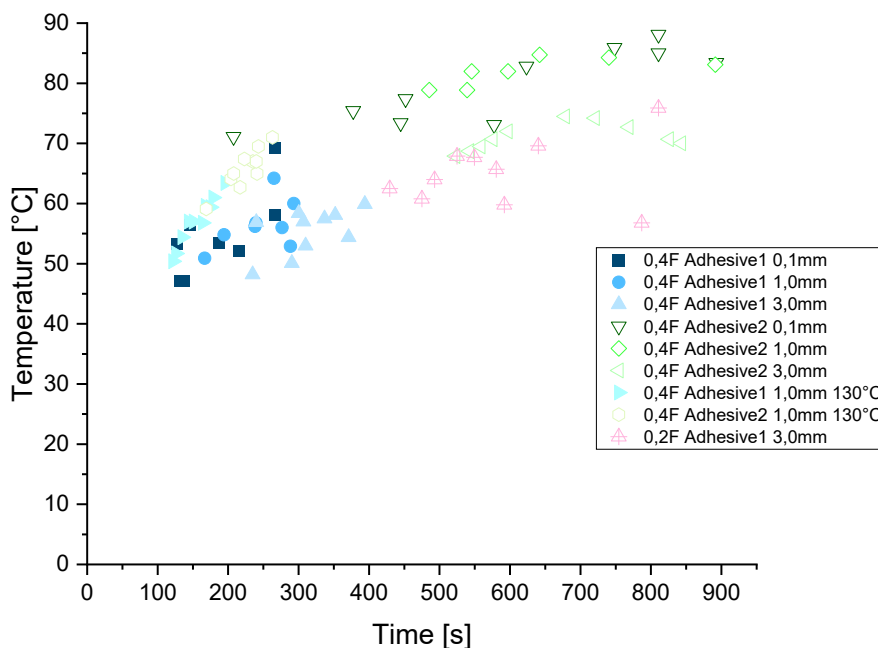
Es ist zu erkennen, dass Klebstoff 1 im Vergleich zu Klebstoff 2 frühzeitiger und damit auch bei niedrigeren Temperaturen versagt, was mit den Ergebnissen und dem stärkeren Festigkeitsabfall aus den Warmzugversuchen korreliert und für eine geringere Widerstandsfähigkeit gegen Wärmeeinwirkung spricht.

Die Werte von Klebstoff 1 liegen für alle Klebstofffugendicken in einem ähnlichen Temperaturbereich. Zeitgleich fällt auf, dass die 3,0 mm dicke Klebstoffuge für Klebstoff 1 längere Versuchsdauern aufweist, was mit den größeren Ausmaßen des Prüfkörpers und der damit einhergehenden langsameren Durchwärmung zusammenhängen kann. Erste Temperaturmessungen zur Prüfkongfiguration 1 im Thermoschrank haben für

ein Erreichen einer Temperatur von 70 °C in der Fuge zu einer vierminütigen längeren Aufheizdauer im Vergleich zu den Fugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm geführt (jeweils ca. sechs Minuten). Dieser Effekt wird auch bei Klebstoff 2 deutlich, da hier bei zwar ähnlichen Versuchsdauern geringere Versagenstemperaturen erreicht werden als für die Prüfkörper mit dünnen Klebstoffugen. Aufgrund der kurzen Versuchsdauern sowie der geringen Versagenstemperaturen im Bereich von unter 60 °C ist davon auszugehen, dass eine Nachverfestigung bzw. Temperung des Klebstoffes unter diesen Randbedingungen nicht stattfindet.

Für die Versuche mit schneller Erwärmung auf 130 °C fällt auf, dass sich die Versuchsdauern bei beiden Klebstoffen verkürzen. Die kritische Temperatur wird hier aufgrund der schnelleren Erwärmung der Klebstoffuge früher erreicht. Die Versagenstemperaturen von Klebstoff 1 liegen dabei in einem ähnlichen Bereich wie bei den 110 °C Versuchen. Für Klebstoff 2 wird eine Reduktion, um im Durchschnitt ca. 5 °C festgestellt.

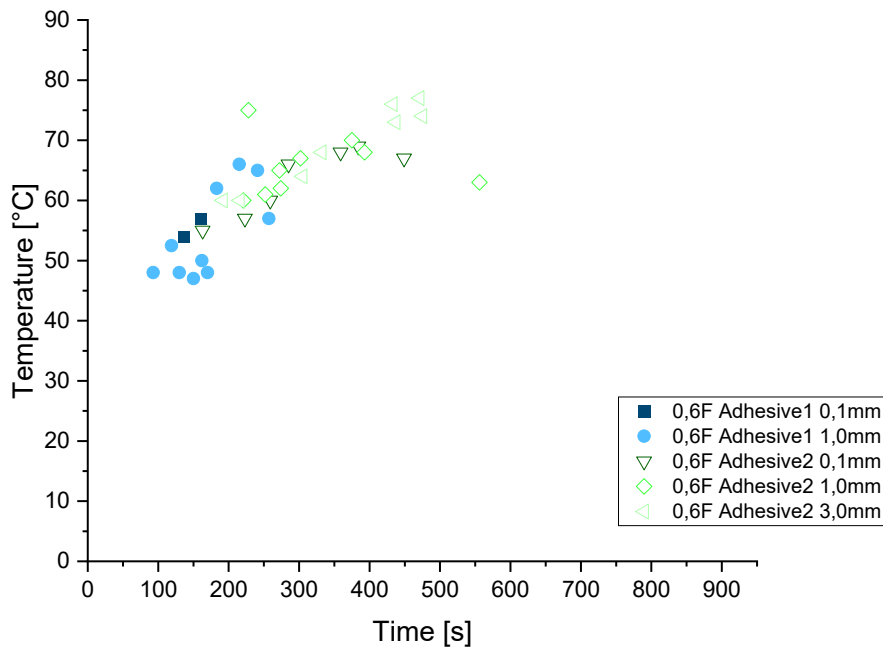
Die aufgebrachte Last von 20 % der Referenzversuche für die Klebstoffugendicke von 3,0 mm bei Klebstoff 1 führt zu einer längeren Versuchsdauer mit erhöhten Versagenstemperaturen. Es wird davon ausgegangen, dass die Festigkeit im Temperaturbereich von 60 °C ausreicht, um die niedrigere mechanische Last aufzunehmen und erst höhere Temperaturen den Klebstoff so schwächen, dass ein Versagen eintritt.



**Abbildung 8: Versagenstemperaturen der Warmkriechversuche für eine Belastung von 20 % bzw. 40 % der Referenzlast**

Im Bereich der Versuche mit erhöhter Zugbelastung ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Klebstoff 1 weist wieder geringere Versagenstemperaturen auf als Klebstoff 2 (s. Abbildung 9). Für beide Fugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm liegen die mittleren Versagenstemperaturen unter 60 °C und liegen auf etwa gleichem Niveau wie bei den Versuchen mit 40 % der Referenzlast. Daraus wird gefolgert, dass die Resttragfähigkeit des Klebstoffs 1 bei Temperaturen von 60 °C bereits einen Großteil seiner Tragfähigkeit verliert, wodurch bereits bei den Versuchen mit niedrigerem Lastniveau ein Versagen im gleichen Temperaturbereich auftritt. Wenn man das Lastniveau auf unter 20 % der festgelegten Referenzlast festgelegt hätte, wären voraussichtlich höhere Versagenstemperaturen möglich gewesen.

Klebstoff 2 weist deutlich kürzere Versagenszeiten auf als bei den Versuchen mit geringerer Lasteinwirkung. Da der Klebstoff mit steigender Temperatur an Festigkeit verliert und gleichzeitig eine höhere mechanische Belastung vorherrscht, erscheint es plausibel, dass bereits bei niedrigeren Temperaturen die Resttragfähigkeit des Klebstoffs überschritten wird.



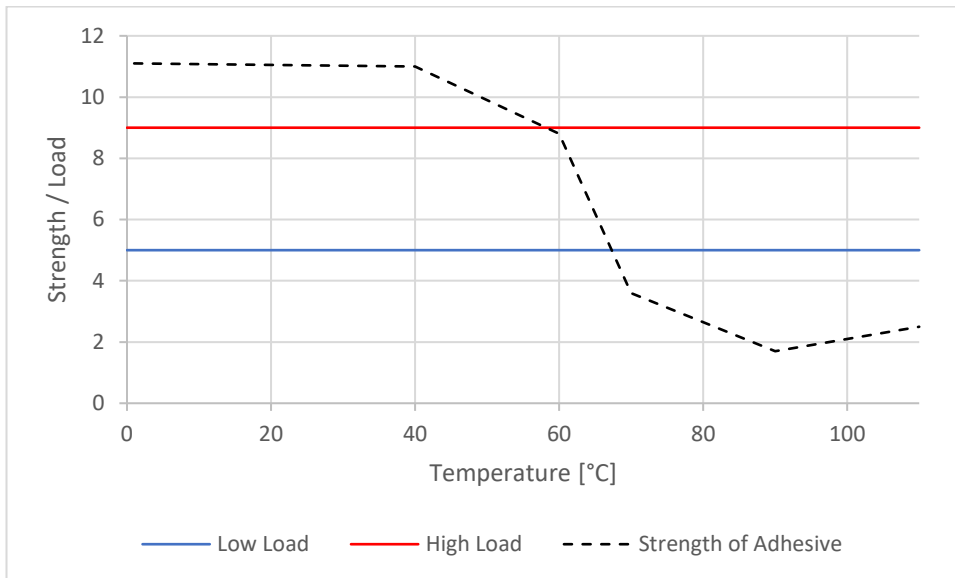
**Abbildung 9: Versagenstemperaturen der Warmkriechversuche für eine Belastung von 60 % der Referenzlast**

Die Versuche zeigen, dass die Höhe der mechanischen Belastung das Versagensverhalten des Klebstoffs unter Temperatureinwirkung beeinflusst. Der Klebstoff verliert mit steigender Temperatur an Festigkeit, wenn ein Nacherhärtungseffekt ausgeschlossen werden kann. Die Höhe des Abfalls ist klebstoff- und temperaturabhängig, wodurch sich unterschiedliche Restfestigkeiten im Vergleich zur Normaltemperatur einstellen können. Wenn diese Resttragfähigkeit durch das vorhandene Lastniveau überschritten wird, ist von einem Versagen der Verbindung auszugehen. Ein zu Beginn höheres Lastniveau bzw. ein höherer Ausnutzungsgrad kann daher zu einem früheren Versagen der Verbindung bei niedrigeren Temperaturen führen, da die Restfestigkeit des Klebstoffs schneller überschritten wird. In Abbildung 10 wird schematisch die mittlere Klebstofffestigkeit basierend auf Klebstoff 1 mit einer Klebstofffugendicke von 1,0 mm über die verschiedenen Temperaturstufen gezeigt (schwarz gestrichelt). Diese nimmt ab Erreichen von einer Temperatur von 60 °C kontinuierlich ab. Werden im Falle von Kriechversuchen zu Beginn vergleichsweise hohe Lasten angesetzt (rot) wird die Restfestigkeit vom Klebstoff entsprechend bei geringeren Temperaturen überschritten als bei einem zu Beginn niedrigerem Lastniveau (blau).

Sind beim Klebstoff höhere thermische Widerstandsfähigkeiten vorhanden oder das Lastniveau liegt zu Beginn der Temperatureinwirkung unter der Resttragfähigkeit der entfestigten Klebstoffverbindung, kann sich auch das Versagensbild ändern. Es findet in diesem Fall kein abruptes Versagen statt, sondern es setzt erst ein Kriechvorgang ein. Der Klebstoff besitzt noch ausreichend Tragfähigkeit. Bei steigender Temperatur entfestigt sich der Klebstoff stärker, wodurch sich dessen Verformung erhöht bis die Resttragfähigkeit so weit absinkt, dass ein Versagen eintritt.

Bei einer höheren Temperaturbelastung und damit einhergehenden schnelleren Temperaturanstieg im Klebstoff konnte gezeigt werden, dass die Bedingungen für einen Kriechvorgang nicht mehr gegeben sind, da die Tragfestigkeit des Klebstoffs schneller abnimmt.





**Abbildung 10: Skizze zum Zusammenhang der Festigkeitsabnahme mit dem Lastniveau**

### Versuchsreihe 1 - Einfluss der Klebstofffugendicke

Für die untersuchten Klebstofffugendicken von 0,1 mm, 1,0 mm und 3,0 mm wurden mitunter verschiedene Versagensmuster und Tragfähigkeiten festgestellt. Dabei wiesen die dünneren Fugendicken ein ähnliches Verhalten im Versagen sowie bezüglich der erreichten Schubfestigkeit auf. Die Prüfkörper mit 3,0 mm Klebstofffugendicke hatten bei den Referenzversuchen bei Raumtemperatur eine vergleichsweise deutlich geringere Schubfestigkeit. Als Grund wird hier die Belastungseinrichtung vermutet, da aufgrund der größeren Exzentrizität basierend auf der Fugendicke ein zusätzliches Versatzmoment eingebracht wird, das Querkräfte in der Verbindung erzeugt, die ein vorzeitiges Versagen bewirken. Der hohe Anteil an Holzfaserbruch in diesen Versuchsreihen bekräftigt diese Aussage. Allerdings ist auch bei diesen Prüfkörpern bei Temperaturbelastung ein maßgebliches Versagen des Klebstoffs sowie ein Abfallen der Schubfestigkeit zu beobachten. Da aus anderen Forschungsarbeiten bekannt ist, dass eine dickere Klebstofffugendicke in Kombination mit Gewindestangen einen positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit hat, was im Gegensatz zu den hier durchgeführten Versuchen steht, wird diese Prüfmethode als nicht geeignet angesehen Klebstofffugen mit Dicken über 1,0 mm zu untersuchen.

### Versuchsreihe 2 – Brandversuche ohne mechanische Belastung

#### Versuchsreihe 2 – Materialien

In der Versuchsreihe 2 wurden Prüfkörper mit eingeklebten metrischen Gewindestangen 60 Minuten lang der Einheits-Temperaturzeitkurve ausgesetzt. Es wurde dabei keine mechanische Belastung aufgebracht. Ziel war es, thermische Parameter für numerische Simulationen zu generieren und den Einfluss unterschiedlicher Ausführungskonfigurationen und brandschutztechnische Maßnahmen auf die Temperaturentwicklung innerhalb der Klebeverbindung zu untersuchen.

Insgesamt wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. In Versuchsreihe 2.1 wurden die Gewindestangen parallel zur Faserrichtung eingeklebt und die Prüfkörper einseitig brandbeansprucht. Bei Versuchsreihe 2.2 wurden die Gewindestangen quer zur Faser eingeklebt und einseitig vom Brand beansprucht. In Versuchsreihe 2.3 wurden die Stangen parallel zur Faser eingeklebt. Die Brandbeanspruchung erfolgte von allen vier Seiten.

Da keine mechanische Belastung vorlag und die Klebstofffugendicke im Vergleich zu den anderen Baustoffen gering ist, wurde angenommen, dass der Einfluss des Klebstofftyps auf die Wärmeübertragung eine untergeordnete Rolle spielt. Daher wurde für die Verklebung aller Prüfkörper derselbe Klebstoff verwendet. Hier wurde Klebstoff 1 verwendet, weil er in den vorangegangenen Versuchen der Versuchsreihe 1 einen geringeren thermischen Widerstand gezeigt hat. Daher wurde angenommen, dass die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen.

Als Gewindestangen kamen metrische Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 mit den Durchmessern von 12 mm und 20 mm zum Einsatz.



Zudem wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse G24 h verwendet. Die Balken wurden zuvor auf Fehler und Risse geprüft, bevor sie auf die erforderlichen Längen zugeschnitten wurden. Ziel war es, möglichst fehlerfreie Prüfkörper zu erhalten, insbesondere für die Lamelle, in die die Gewindestange jeweils eingeklebt wurde. Das Holz wurde mindestens 28 Tage bei Raumtemperatur gelagert, um den Gleichgewichtsfeuchtegehalt zu erreichen. Die Dichte wurde an den Prüfkörpern gemäß EN 408 bestimmt [44]. Für die drei Versuchsreihen wurden folgende Durchschnittsdichten ermittelt:

- V2.1: 435,1 kg/m<sup>3</sup>  $\tau$  = 2,7 %
- V2.2: 430,9 kg/m<sup>3</sup>  $\tau$  = 3,9 %
- V2.3: 446,3 kg/m<sup>3</sup>  $\tau$  = 5,1 %

## Versuchsreihe 2 – Prüfkonfigurationen

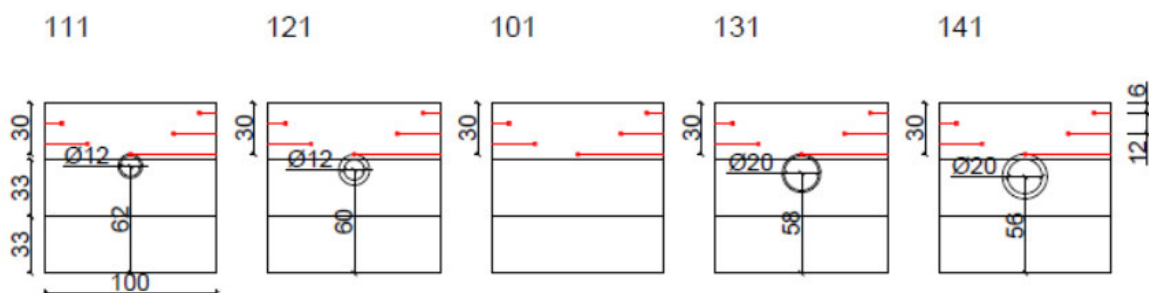
In Versuchsreihe 2 wurden drei verschiedene Prüfkonfigurationen betrachtet. Die einzelnen Aufbauten der Prüfkörper dieser Reihen befinden sich dabei jeweils im Anhang B.1.

Im Rahmen der Versuchsreihe 2.1 wurden fünf Prüfkörper geplant und einseitig der Einheits-Temperaturzeitkurve ausgesetzt. Die Prüfkörper unterschieden sich durch den Gewindestangedurchmesser und die Klebstofffugendicke. Sie wurden mit drei Ziffern benannt. Die erste Ziffer steht für die Prüfserie (1: Versuchsreihe 2.1), die zweite für den Bohrlochdurchmesser (1: 14 mm, 2: 18 mm, 3: 22 mm, 4: 26 mm) und die dritte für die Prüfkörpernummer innerhalb der Serie (1 da jeweils nur ein Prüfkörper):

- 101 Bezugsprobe ohne Gewindestange
- 111 Gewindestange M12 & Klebstofffugendicke 1 mm
- 121 Gewindestange M12 & Klebstofffugendicke 3 mm
- 131 Gewindestange M20 & Klebstofffugendicke 1 mm
- 141 Gewindestange M20 & Klebstofffugendicke 3 mm

Die Prüfkörper hatten jeweils einen Querschnitt von 100 mm x 100 mm. Ein Prüfkörper wurde aus zwei Abschnitten mit einer Länge von jeweils 300 mm zusammengesetzt, so dass sich eine Gesamtlänge von 600 mm ergab. Die Gewindestangen mit einer Klebstofffugendicke von 1 mm hatten eine Einbindelänge von 150 mm pro Seite bei einer Gesamtlänge von 300 mm. Bei einer Klebstofffugendicke von 3 mm wurden an beiden Enden der Stange Abstandshalter in Form von Kunststoffkappen angebracht, um eine zentrale Position im Bohrloch zu gewährleisten. Hierfür wurde die verklebte Länge der Stange um die Höhe je einer Kappe erhöht. Daraus ergeben sich Gesamtlängen von 324 mm und 328 mm für die Gewindestangen der Prüfkörper 121 und 141.

Zur Messung der Temperaturentwicklung in den Prüfkörpern wurden Thermoelemente vom Typ K eingebaut. Diese wurden im Abstand von jeweils 6 mm in die Prüfkörper eingebettet. Die Bohrungen für die Gewindestangen wurden so geplant, dass sich der Bohrlochrand in einer Tiefe von 30 mm von der dem Feuer zugewandten Oberfläche befand. Hierdurch sollte untersucht werden, ob der Durchmesser der Gewindestange oder die Dicke der Klebefuge einen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten hat. Die beiden Positionen der Thermoelemente befanden sich in einem Abstand von 50 mm und 130 mm von der Fuge der beiden Prüfkörperhälften (s. Abbildung 11 und Anhang B.1).



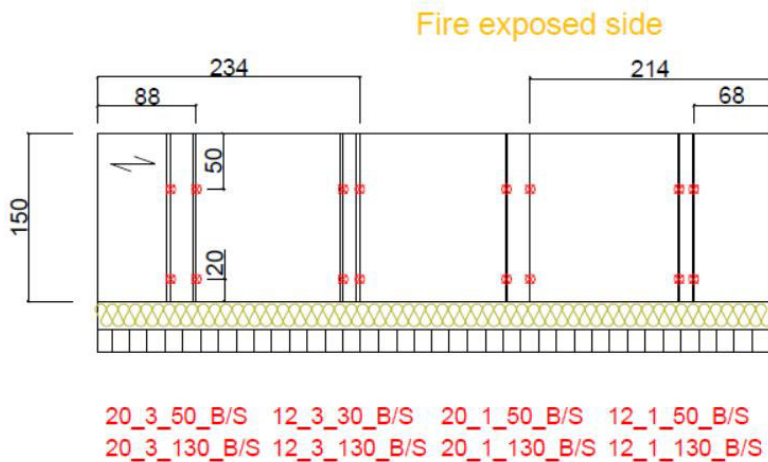
**Abbildung 11: Einbettungstiefe und Position der Thermoelemente in den Prüfkörpern der Versuchsreihe 2.1**

In der Versuchsreihe 2.2 wurden insgesamt acht Prüfkörper hergestellt. Die Gewindestangen wurden quer zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt. Pro Prüfkörper werden zwei metrische Gewindestangen mit einem Durchmesser von 20 mm und zwei mit einem Durchmesser von 12 mm eingesetzt. Die Klebstofffugendicke wird zwischen 1 mm und 3 mm variiert. Die Höhe eines Prüfkörpers ist je nach Struktur und Länge der Abdeckung unterschiedlich:

- PK1 Einbindelänge 150 mm - Gewindestange bündig abschließend mit brandzugewandter Seite
- PK2 Einbindelänge 150 mm - 10 mm Holzpfropfen auf der brandzugewandten Seite

- PK3 Einbindelänge 150 mm - 30 mm Holzpfropfen auf der brandzugewandten Seite
- PK4 Einbindelänge 450 mm - 20 mm brandraumseitige überstehende Gewindestange mit Unterlegscheibe und Mutter auf der brandzugewandten Seite
- PK5 Einbindelänge 450 mm - 10 mm Holzpfropfen auf der brandzugewandten Seite
- PK6 Einbindelänge 450 mm - 30 mm Holzpfropfen auf der brandzugewandten Seite
- PK7 Einbindelänge 450 mm - 12,5 mm GKF-Platte auf der brandzugewandten Seite
- PK8 Einbindelänge 450 mm - Gewindestange bündig abschließend mit brandzugewandter Seite

Zur Messung der Temperatur in der Klebefuge wurden Thermoelemente vom Typ K eingesetzt. Diese wurden entweder in einer Tiefe von 50 mm von der dem Feuer brandzugewandten Seite und 20 mm von der dem Brand abgewandten Seite angebracht. Der Messpunkt war bei allen Prüfkörpern der Rand des Bohrlochs. Nur bei den Prüfkörpern 1 und 7 wurden zusätzliche Messpunkte im Kontaktbereich der Gewindestange zum Klebstoff angebracht, um den Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Wärmeleitung zu untersuchen (s. Abbildung 12 und Anhang B.1).



**Abbildung 12: Längsschnitt durch Prüfkörper 1 der Versuchsreihe 2.2 mit Lage der Thermoelemente am Bohrlochrand (B) und an der Gewindestange aus Stahl (S) mit der Bezeichnung des Gewindestangendurchmessers (1. Stelle), der Klebstofffugendicke in mm (2. Stelle) und der Messtiefe in mm von der beflamten Oberfläche (3. Stelle)**

Die Versuchsreihe 2.3 bestand aus drei Prüfkörpern. Diese bestanden jeweils aus zwei gleich langen Hälften und hatten eine Gesamtlänge von 100 cm. Die Gewindestangen befanden sich in der Mitte des Querschnitts. Der Durchmesser der Gewindestangen variierte zwischen 12 mm und 20 mm und der Querschnitt der Prüfkörper zwischen 60 mm x 60 mm und 100 mm x 100 mm. Der Querschnitt entspricht der geforderten Mindestüberdeckung nach EN 1995-1-1 von  $2,5 \cdot d_{rod}$ . [2] Die Einbindelänge betrug 150 mm pro Prüfkörperhälfte mit einer Klebstofffugendicke von jeweils 1 mm. Die Prüfkörper wurden dabei wie folgt bezeichnet:

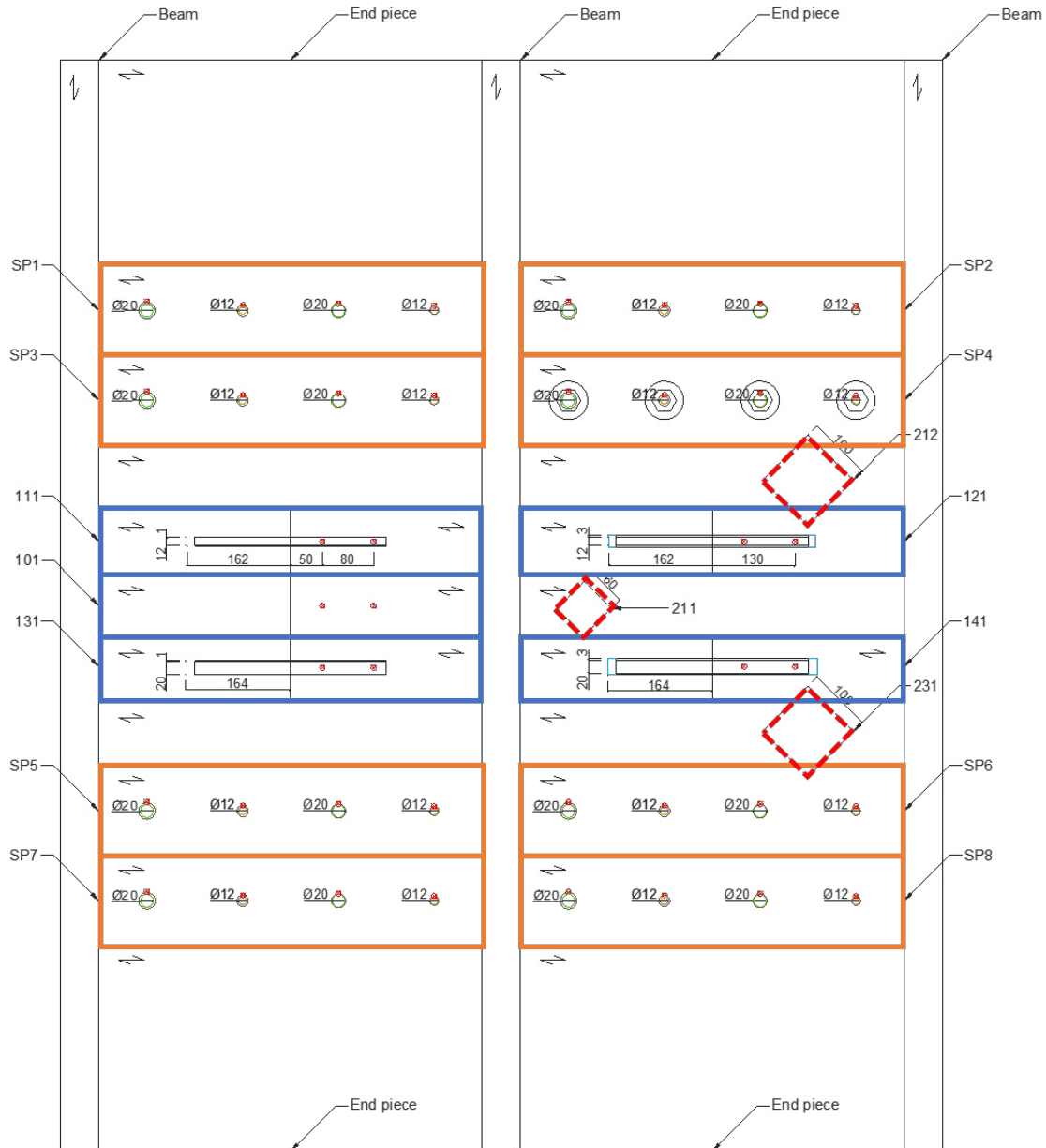
- 211 QS 60 mm x 60 mm, M12
- 212 QS 100 mm x 100 mm, M12
- 231 QS 100 mm x 100 mm, M20

In einer der Prüfkörperhälften wurden innerhalb der Klebefuge zwischen Gewindestange und Bohrlochrand zwei Thermoelemente mit Kontakt zum Gewindestange angebracht, um die Temperatur zu messen. Diese Messpunkte befanden sich 50 mm und 120 mm von der Fügefläche der beiden Prüfkörperhälften entfernt. Hierzu war es notwendig die Prüfkörper entlang der Faserrichtung der Länge nach zu halbieren. Durch die Dicke des Sägeblatts von 2 mm wurde die Seitenlänge daher an zwei Seiten jeweils auf 58 mm bzw. 98 mm reduziert.

Die Prüfkörper aller drei Versuchsreihen wurden im Rahmen eines Brandversuchs geprüft. Dazu wurden die Prüfkörper mit Schrauben zu einem Deckenelement verbunden. Die brandzugewandte Seite hatte eine ebene Oberfläche. Abbildung 13 zeigt die Draufsicht auf den geplanten Deckenprobekörper.

Als tragende Elemente wurden drei Vollholzbalken mit einer Länge von 2,5 m und einem Querschnitt von 60 mm x 120 mm verwendet. An deren Seiten wurden die einzelnen Prüfkörper verschraubt. Die Prüfkörper der Versuchsreihe 2.1 wurden in der Mitte (in der Abbildung 13 blau markiert) und die Prüfkörper der Versuchsreihe 2.2 im Randbereich der Decke (orange markiert) positioniert. Zwischen den Prüfkörpern der beiden Prüfreihen wurden Balken mit einem Kanthölzer von 100 mm x 100 mm eingebaut, um eine gegenseitige Beeinflussung weitestgehend auszuschließen. An diesen "Abstandshaltern" wurden die Prüfkörper der Versuchsreihe 2.3 aufgehängt (rot markiert). Um die Öffnung des Brandofens komplett durch den Deckenprüfkörper abzudecken, wurden an den Rändern des Prüfkörpers Brettschichtholzelemente mit

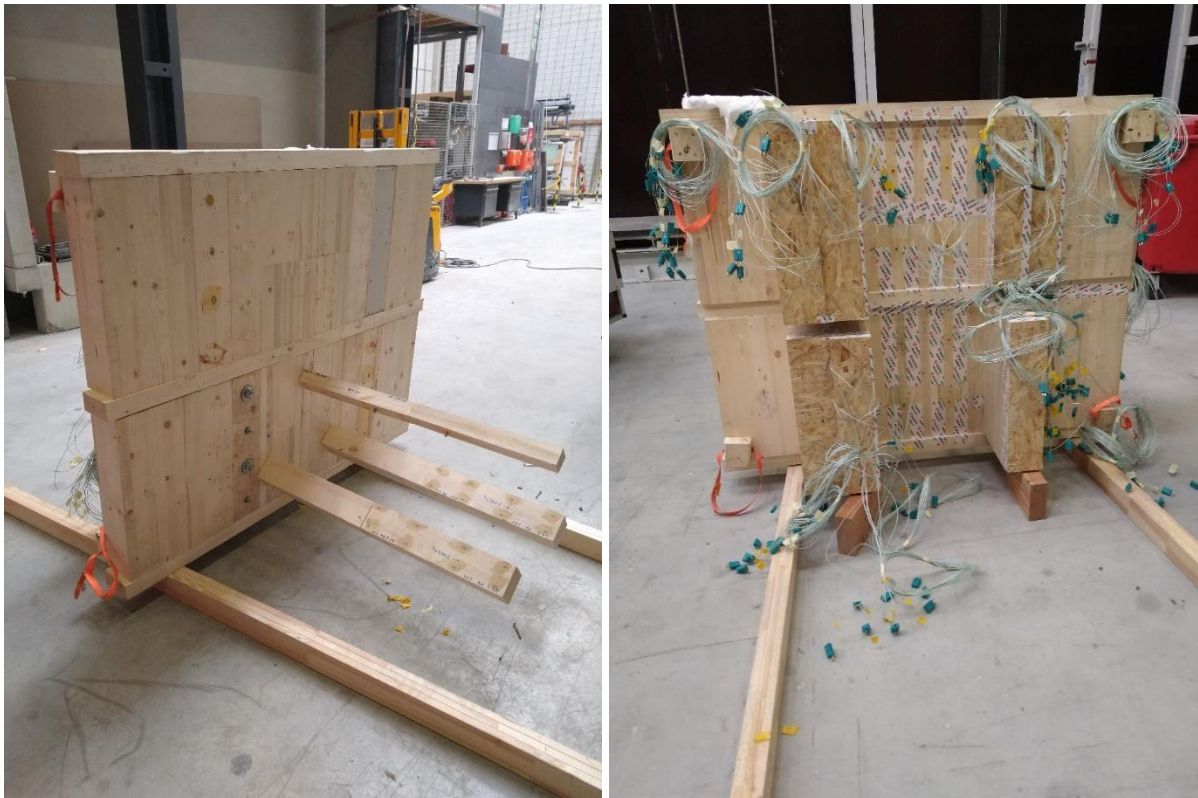
einer Höhe von 450 mm zwischen den tragenden Balken angeordnet. Die einzelnen Prüfkörperaufbauten sind im Anhang B.1 dargestellt.



**Abbildung 13: Ansicht des Deckenprüfkörpers aus den Versuchsreihen 2.1 (blau), 2.2 (orange) und 2.3 (rot)**

Die konstruktionsbedingten Fugen und Spalten wurden auf der brandabgewandten Seite mit luftdichtem Klebeband abgedichtet, um das Austreten von Rauch zu verhindern. Die Öffnungen für die Thermoelemente und Eckverbindungen wurden ebenfalls mit Silikon abgedichtet. Aus Transportgründen wurde die Decke in zwei Hälften zur Prüfstelle transportiert und vor Ort endmontiert (s. Abbildung 14).





**Abbildung 14: Deckenprüfkörper vor Brandversuch (links: Brandzugewandte Seite, rechts: brandabgewandte Seite)**

Nach dem Abkühlen wurde die Holzkohleschicht nach 7 Tagen für eine Nachuntersuchung der einzelnen Prüfkörper mit einem Stahlbürstenaufsatz auf einer Bohrmaschine entfernt. Es war bereits erkennbar, dass bei den Prüfserien 2.1 und 2.2 alle Gewindestangen an der Oberfläche sichtbar waren und keine Holzüberdeckung mehr vorhanden war (siehe Abbildung 15). Die Prüfkörper der Versuchsreihe 2.3 sind während des Versuchs vollständig verbrannt, so dass eine Untersuchung nicht möglich war.



**Abbildung 15: Ansicht der brandzugewandten Seite nach dem Brandversuch (links: mit Holzkohleschicht, rechts: gereinigt)**

### **Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkonfiguration 2.1**

Durch die Thermolemente war eine Aufzeichnung der Temperaturentwicklung innerhalb der einzelnen Prüfkörper möglich. Diese wird in den nachfolgenden Abbildungen für die Messtiefen von 6 mm und 30 mm dargestellt. Auf der horizontalen Achse befindet sich die Versuchsdauer, auf der vertikalen Achse die mittlere Temperatur der beiden Messpunkte je Messtiefe. Die Kurven der einzelnen Temperaturen für jeden Prüfkörper sind in Anhang B.2 dargestellt.

Zusätzlich wurde aus den Restquerschnitten der Prüfkörper die jeweilige mittlere Abbrandrate bestimmt. Hier fiel auf, dass der seitliche Einbrand an den Stößen der einzelnen Prüfkörper relativ hoch war. Zusätzlich wurde

im Bereich der Messstellen aufgrund der eingefrästen Kanäle höhere Abbrandtiefen festgestellt (s. Abbildung 16).

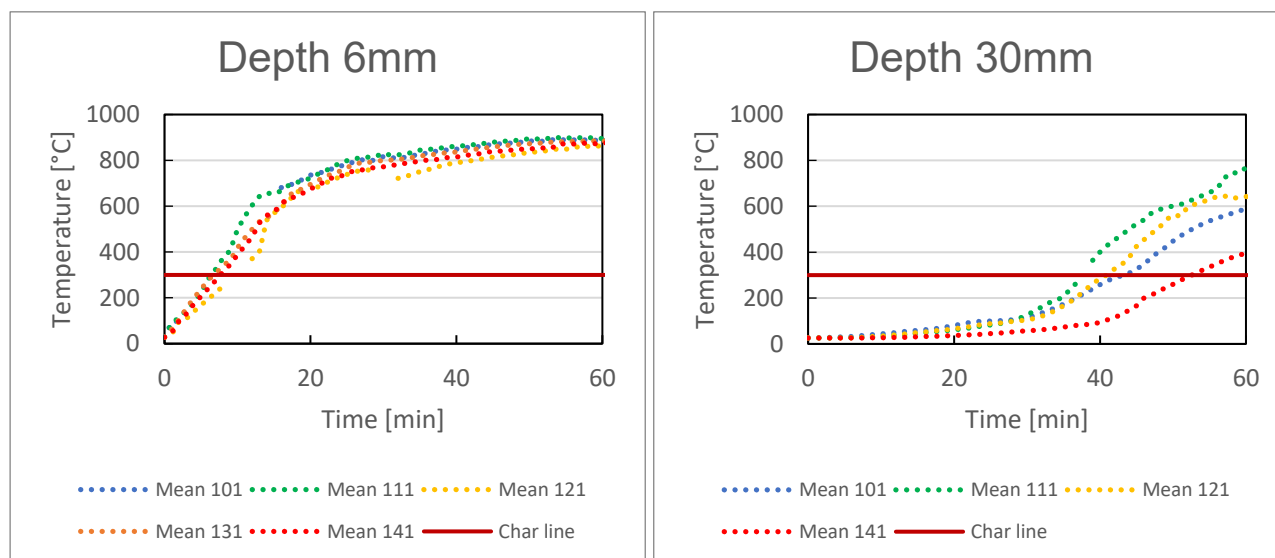


**Abbildung 16: Vertiefter Einbrand an Messstellen von Thermoelementen bei Prüfkörper 101 der Versuchsreihe 2.1**

Für die Messtiefe von 6 mm werden für alle Prüfkörper ähnliche Kurven gezeigt (siehe Abbildung 17). Die 300 °C-Isotherme als Abbrandgrenze von Holz wird nach etwa 8 Minuten überschritten, was einer Abbrandrate von 0,75 mm/min entspricht.

In einer Tiefe von 30 mm gibt es keine Temperatur für den Prüfkörper 131, da das Thermoelement in einem Abstand von 50 mm von der Fuge keine Daten lieferte. Bei einem Abstand von 130 mm wurde die Fräsung fälschlicherweise auf eine Tiefe von 24 mm gesetzt.

Die Temperaturkurven zeigen bei der Messtiefe von 30 mm größere Unterschiede beim Erreichen der 300 °C-Isotherme. Im frühesten Fall wird diese nach ca. 38 Minuten erreicht. Im spätesten Fall für den Prüfkörper 141 wird sie erst nach fast 52 Minuten erreicht. Bei dieser Zeitdauer ergäbe sich eine Abbrandrate von 0,59 mm/min, die unter der am verbrannten Prüfkörper gemessenen Abbrandrate von 0,73 mm/min liegt. Es wird davon ausgegangen, dass die hohe spezifische Wärmekapazität von Stahl einen Kühleffekt bewirkt, da vergleichsweise mehr Energie zum Aufheizen der Gewindestange zugeführt werden muss. Da das Volumen der Gewindestange mit dem Quadrat des Durchmessers zunimmt, wird mehr Energie benötigt, um die gleiche Temperaturerhöhung zu erreichen. Im Falle des Prüfkörpers 141 ist der Durchmesser mit 20 mm größer. Leider war eine vergleichbare Messung bei Prüfkörper 131 aufgrund des fehlenden Thermoelementes in dieser Tiefe nicht möglich.



**Abbildung 17: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 6 mm und 30 mm**

## Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkongfiguration 2.2

Während der Versuche wurden die Temperaturen am Rand des Bohrlochs in einem Abstand von 50 mm von der dem Feuer zugewandten Holzoberfläche und 20 mm von der dem Feuer abgewandten Seite gemessen. Bei den Prüfkörpern 1 und 7 wurden zusätzlich Thermoelemente direkt an der Stange angebracht. Die folgenden Diagramme zeigen beispielhaft die Temperaturentwicklung der einzelnen Messpunkte. Die Diagramme aller Prüfkörper sind im Anhang B.3 separat dargestellt. Die Bezeichnung der Thermoelemente richtet sich nach dem Durchmesser der Gewindestange (12 mm und 20 mm), der Dicke der Klebefuge (1 mm und 3 mm) und dem Messort (B: Bohrlochrand; S: Stahl).

Die Thermoelemente wurden durch Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 8 mm eingeführt. Trotz der Vorbohrung mit einem Bohrständler und der geringen Bohrlochtiefe weicht das Bohrloch aufgrund seines sehr kleinen Durchmessers teilweise von der geplanten Position ab. Grund dafür können Äste

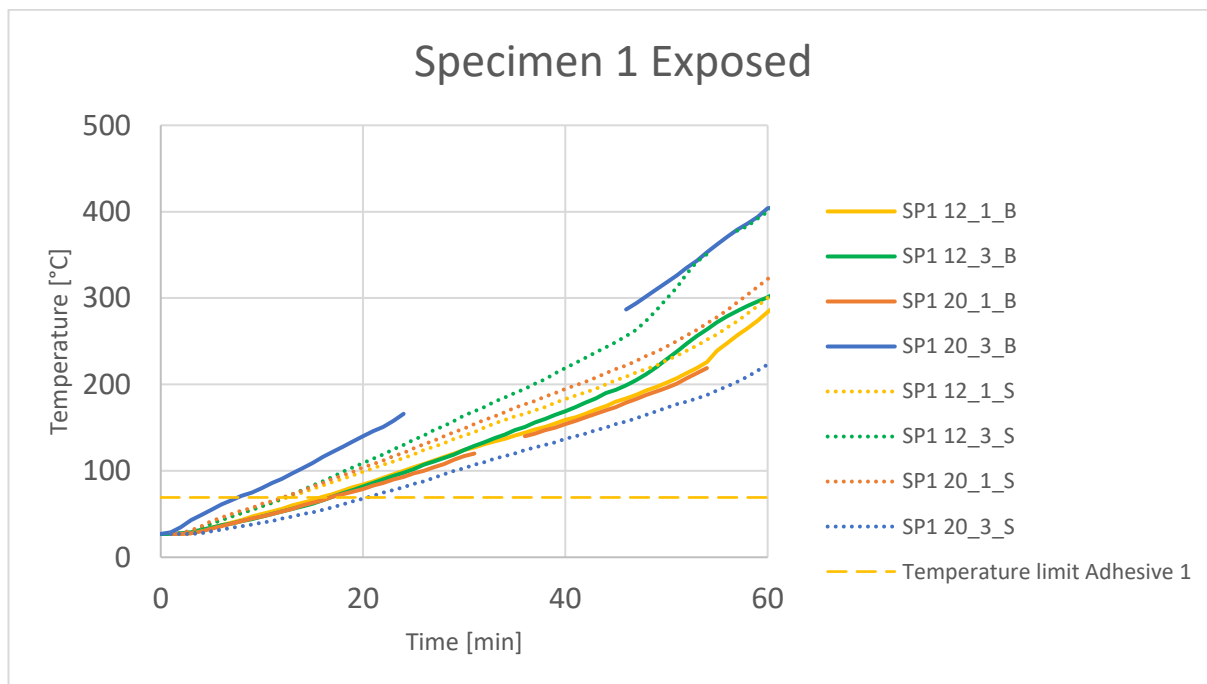
und die ungleichmäßige Faserstruktur des Holzes sein. Deshalb wurden die Prüfkörper nach den Versuchen entlang der Gewindestange aufgespalten, um die Abbrandraten sowie die Position der Thermoelemente zu überprüfen.

Die daraus resultierenden Unterschiede in den Temperaturverläufen durch unterschiedliche Positionen der Messpunkte erschweren den Vergleich der Prüfkörper untereinander. Es können jedoch allgemeine Aussagen über die einzelnen Auswirkungen der Überdeckungen gemacht werden. Die genauen Positionen der Messpunkte werden für eine spätere numerische Simulation verwendet, so dass sie entsprechend mit den Materialparametern validiert werden können.

Bei den in der Versuchsreihe 3 durchgeführten Kriechversuchen unter Temperaturbelastung wurde für Klebstoff 1 eine Temperaturgrenze von 69° C ermittelt. Oberhalb dieser Temperatur kann davon ausgegangen werden, dass die Belastbarkeit des Klebstoffs so weit reduziert wird, dass es bei mechanischer Beanspruchung zum Versagen kommt. Diese Grenze ist in den Diagrammen dargestellt, um zu zeigen, wann sie überschritten wurde und wie wirksam die verschiedenen brandschutztechnischen Abdeckungen sind.

Abbildung 18 zeigt die Temperaturkurve für den Prüfkörper 1 auf der brandzugewandten Seite. Die gestrichelten Linien zeigen die Kurven für die Messungen an der Gewindestange, während die durchgezogenen Linien für den Bohrlochrand gelten. Die Benennung erfolgt über den Gewindestangendurchmesser, die Klebstofffugendicke und die Messstelle am Bohrlochrand (B) oder an der Gewindestange (S). In fast allen Fällen sind die Temperaturen an der Stahlstange höher als an den Messpunkten am Bohrlochrand. Eine Ausnahme bildet die Gewindestange mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Klebstofffugendicke von 3 mm (20\_3). Der Grund dafür ist ein abweichender Messpunkt des Thermoelements. Der Messpunkt (20\_3\_S) verschiebt sich um 6 mm von der Stange weg in das Holz hinein, wodurch der Temperaturverlauf vergleichsweise niedrig ist. Gleichzeitig befindet sich der eigentlich am Bohrlochrand geplante Messpunkt (12\_3\_B) direkt an der Stange, so dass die Temperatur im Vergleich stärker ansteigt. Es kann festgestellt werden, dass die Gewindestange maßgeblich für den Temperatureintrag in das Bauteil verantwortlich ist.

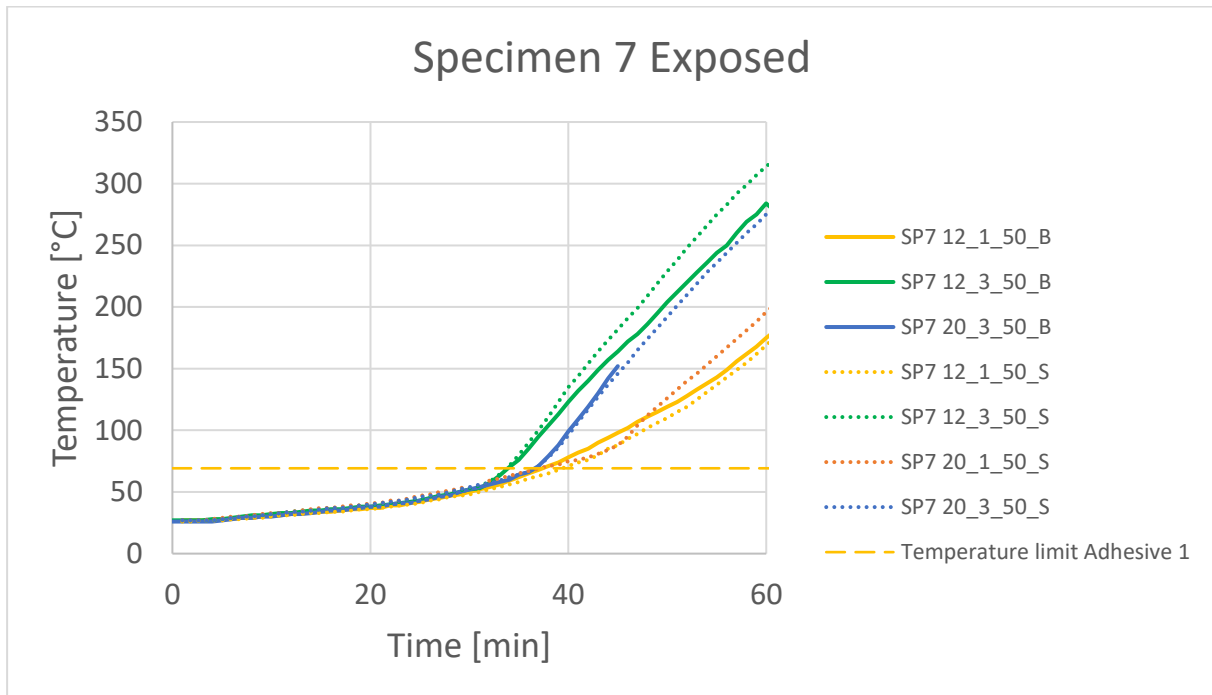
Nach durchschnittlich ca. 14 Minuten wird die kritische Temperaturgrenze des Klebstoffs in 50 mm Tiefe überschritten, wenn der Gewindestange nicht brandschutztechnisch abgedeckt ist.



**Abbildung 18: Temperaturkurven für Prüfkörper 1 auf der brandzugewandten Seite**

Der Prüfkörper 7 wurde auf der brandzugewandten Seite mit einer 12,5 mm dicken Gipskartonplatte abgedeckt (s. auch Anhang B.1). Dadurch verlängert sich die Überschreitung der kritischen Temperaturgrenze in einer Tiefe von 50 mm im Vergleich zu Prüfkörper 1 um 22 Minuten auf ca. 36 Minuten (siehe Abbildung 19). Zudem wird ein Knick im Verlauf der Messkurven festgestellt, der für einen erhöhten Temperaturanstieg steht. Hier wird angenommen, dass die Gipskartonplatte im Bereich von 25 Minuten bis 30 Minuten abgefallen ist. Die Temperatur wird in einer Tiefe von 50 mm des Holzprobekörpers gemessen, weshalb dieser Anstieg in der Grafik sich nur verzögert darstellt. Da zu diesem Zeitpunkt bereits höhere Temperaturen im Ofen herrschen, kommt es zu einem schnelleren Anstieg als bei Prüfkörper 1. Ein Einfluss des Gewindestangedurchmessers oder der Klebstofffugendicke lässt sich nicht ableiten. Die Abweichungen der Temperaturverläufe einer Messtiefe können auch mit einem unterschiedlichen Zeitpunkt sowie einem nicht vollständigen Abfall der Gipskartonplatte zusammenhängen.





**Abbildung 19: Temperaturkurven für Prüfkörper 7 auf der brandzugewandten Seite**

Insgesamt haben die Versuche gezeigt, dass eine brandraumseitige Überdeckung der Gewindestange einen positiven Einfluss auf die Temperaturentwicklung bei senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen hat. Die kritische Klebstofftemperatur von 69 °C wird in 5 cm Tiefe auf der brandzugewandten Seite nach ca. 14 Minuten ohne Schutz oder Abdeckung, nach ca. 30 Minuten mit einer Holzabdeckung von 10 mm und nach ca. 60 Minuten mit einer Holzabdeckung von 30 mm erreicht. Eine 12,5 mm Gipskartonplatte schützt den Klebstoff in dieser Tiefe bis zu ca. 35 Minuten.

Bei einer Messtiefe von 130 mm wird die kritische Temperaturgrenze bei ungeschützten Prüfkörpern nach 25 Minuten erreicht. Bei einer 10 mm dicken Holzabdeckung der Gewindestange verdoppelt sich die Schutzzeit auf 50 Minuten und bei einer 30 mm dicken Abdeckung ist nach 60 Minuten Brandeinwirkung nicht mit einer Überschreitung dieser Temperatur zu rechnen.

Bei einer Messtiefe von 430 mm wird die Temperaturgrenze nie überschritten. In den meisten Fällen ist auch kein Wärmeeintrag festzustellen. Lediglich bei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 20 mm konnte eine leichte Temperaturerhöhung im Bereich von 10 °C gemessen werden, wenn die Gewindestangen 20 mm frei in den Ofen ragten (Prüfkörper 4).

Die Temperaturkurven der Messpunkte der brandabgewandten Seite lassen vermuten, dass mit zunehmender Beanspruchungsdauer größere Gewindestangedurchmesser für einen schnelleren Wärmeeintrag verantwortlich sind.

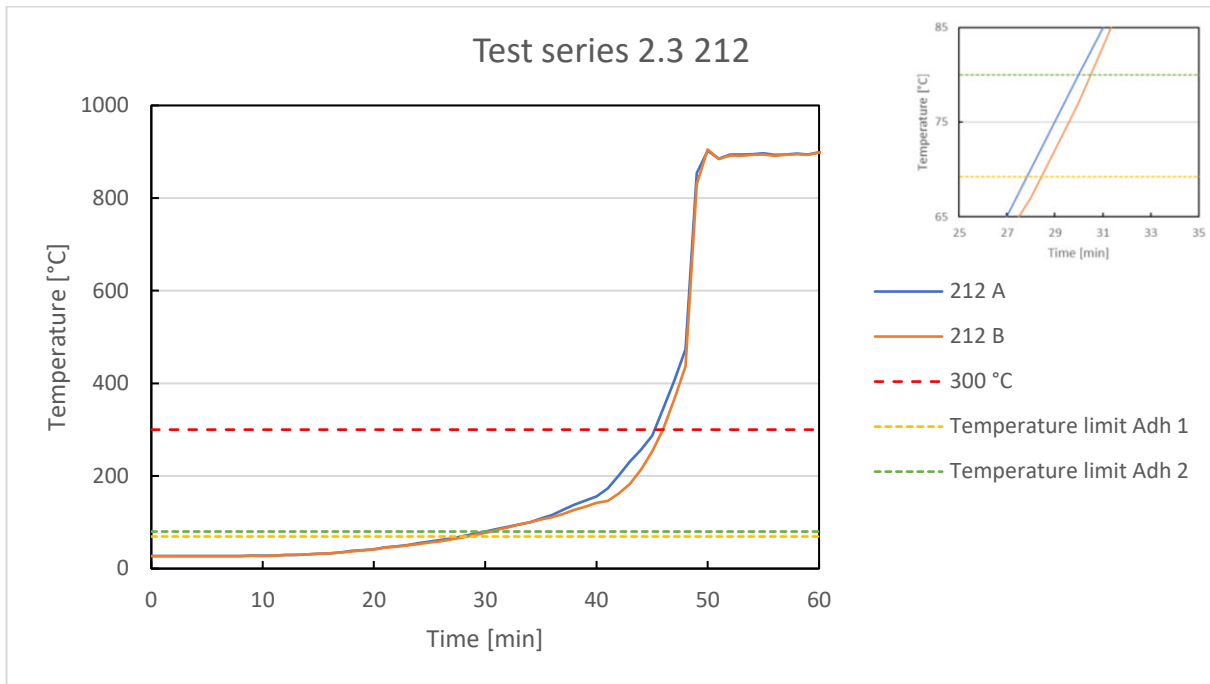
### Versuchsreihe 2 – Ergebnisse Prüfkonfiguration 2.3

Die nachfolgenden Diagramme zeigen beispielhaft den Temperaturverlauf der beiden Prüfkörper 212 und 231. Bei Prüfkörper 211 trat ein Messfehler auf, sodass erst zur 40. Minute Daten aufgezeichnet wurden.

Aus den Versuchen der Versuchsreihe 3 wurde die kritische Temperaturgrenze für die beiden geprüften Klebstoffe abgeleitet. Bei Überschreiten dieser Temperatur muss mit einem Versagen gerechnet werden. Diese liegen bei 69 °C für Klebstoff 1 und 79 °C für Klebstoff 2. Diese werden in den nachfolgenden Diagrammen zur besseren Übersichtlichkeit dargestellt.

Die Temperaturkurven zeigen für beide Messpunkte einen nahezu identischen Verlauf, da sie in exakt der gleichen Tiefe an der Gewindestange eingebaut wurden. Die Fuge zwischen den beiden Hälften scheint keinen Einfluss auf die Temperaturentwicklung zu haben. Die Abweichung kann durch die inhomogene Struktur des Holzes erklärt werden, die einen absolut gleichmäßigen Abbrand nicht zulässt (siehe Abbildung 20). Zudem gab es vermutlich auch lokale Temperaturunterschiede in der Einwirkung.

Die 300 °C - Isotherme als Abbrandgrenze von Holz wird von beiden Messstellen nach ca. 50 Minuten überschritten. Die Holzüberdeckung von 42 mm reicht bei einem Bohrlochdurchmesser von 14 mm bei Klebstoff 1 aus, damit die kritische Temperaturgrenze erst nach ca. 28 Minuten und bei Klebstoff 2 erst nach ca. 31 Minuten erreicht wird.

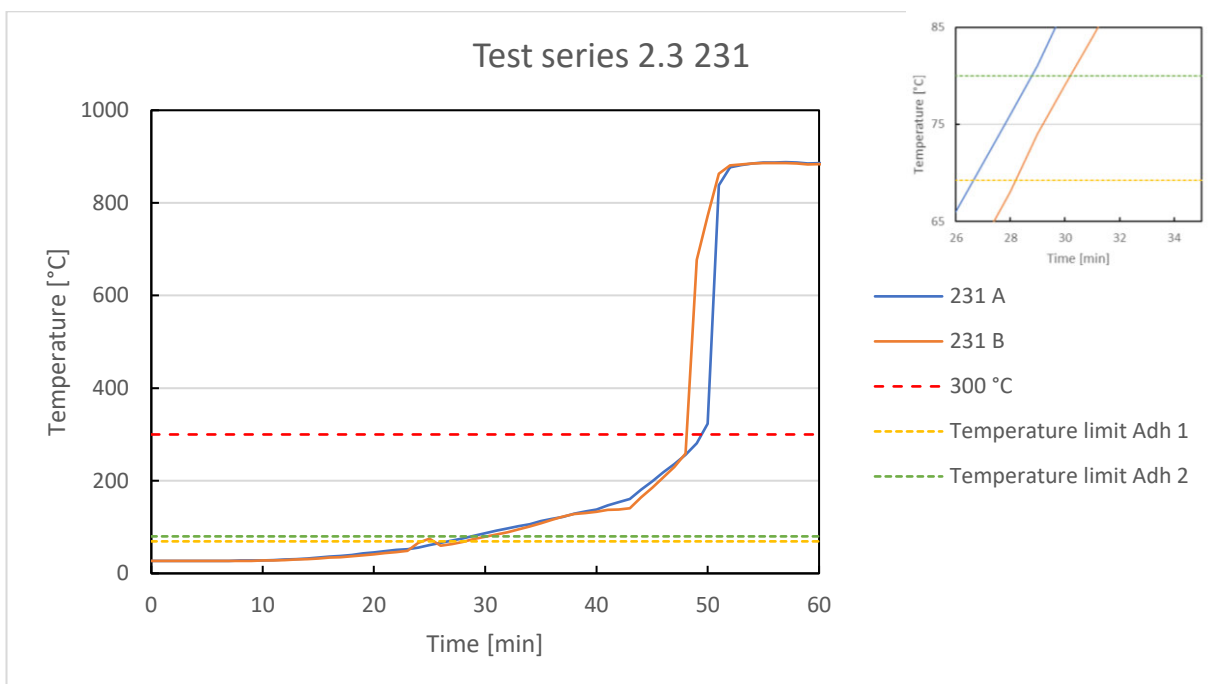


**Abbildung 20: Temperaturkurven für Prüfkörper 212 in Versuchsreihe 2.3**

Ein ähnliches Temperaturprofil zeigt sich für den Prüfkörper 231 (siehe Abbildung 21). Die beiden Messstellen liefern ein nahezu identisches Temperaturprofil bis zum Erreichen der 300 °C - Isotherme.

Aufgrund des größeren Durchmessers der Gewindestange und des daraus resultierenden Bohrlochs von 22 mm hat der Prüfkörper eine insgesamt kleinere Holzüberdeckung von nur 38 mm. Aus diesem Grund werden die kritischen Temperaturgrenzen früher überschritten als bei Prüfkörper 212, nämlich bei ca. 27 Minuten für Klebstoff 1 und ca. 30 Minuten für Klebstoff 2. Allerdings werden die Temperaturgrenzen beider Klebstoffe nur eine Minute früher erreicht, was zum Einen auf die höhere Wärmekapazität des Stahls und damit einem Kühleffekt und zum Anderen auf den ungleichmäßigen Abbrand der Prüfkörper zurückgeführt werden kann, wobei letzteres einen maßgeblichen Einfluss haben dürfte.

Da nach Versuchsende eine Entnahme der Prüfkörper nicht möglich war bzw. keine Reste der Prüfkörper vorhanden waren, war es nicht möglich, die Abbrandraten vergleichend zu den Thermoelementen zu bestimmen.



**Abbildung 21: Temperaturkurven für Prüfkörper 231 in Versuchsreihe 2.3**



## **Versuchsreihe 2 – Zusammenfassung**

Die Versuche haben gezeigt, dass Lage und Einbindelänge der Gewindestange als maßgebende Größe auf die Temperaturentwicklung anzusehen sind.

Bei längs zur Faser eingeklebten Gewindestangen mit vollständiger Überdeckung zeigen die Ergebnisse jedoch, dass der Gewindestangedurchmesser hier nur einen geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Inneren des Prüfkörpers hat. Ein größerer Durchmesser kann die Abbrandrate aufgrund der hohen Wärmekapazität des Stahls verringern. Es ist davon auszugehen, dass dieser Effekt jedoch nur in der näheren Umgebung der Gewindestange auftritt. Andere Parameter wie die Breite einer Fuge, die Position von Ästen oder der Faserverlauf im Holz können auf Grundlage der Versuche einen größeren Einfluss haben. Weitere Versuche mit größeren Gewindestangedurchmessern wären sinnvoll, um einen Effekt in Bezug auf die spezifische Wärmekapazität und den Kühleffekt nachzuweisen.

Bei den Versuchen mit senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen war ein direkter Vergleich aufgrund abweichender Temperaturmesspunkte nur schwer möglich. Allerdings konnte festgestellt werden, dass die Gewindestange maßgeblich für den Wärmetransport in die Verbindung verantwortlich ist. Bei einem größeren Gewindestangedurchmesser von 20 mm zeigen die Messungen stets eine Tendenz zur schnelleren Erwärmung auf der brandabgewandten Seite.

Um den Temperatureintrag in die Bauteile durch die Gewindestange zu begrenzen, wird in jedem Fall eine brandschutztechnische Abdeckung empfohlen. Bei Holzpfropfen von 30 mm Dicke wird die Temperaturgrenze des Klebstoffs 1 (69 °C) in einer Tiefe von 50 mm auf der brandbeanspruchten Seite erst nach knapp 60 Minuten überschritten. Eine Gipskartonplatte mit einer Dicke von 12,5 mm kann das Erreichen der kritischen Temperaturgrenze in einer Tiefe von 50 mm hinter der Holzoberfläche für etwa 36 Minuten verhindern.

Bei Gewindestangen, die parallel zur Faserrichtung eingeklebt sind, ist aufgrund der Ausführungsweise im Regelfall eine Überdeckung aus Holz vorhanden. Diese sollte so dick gewählt werden, dass sie die Klebstofffuge vor einer Erwärmung über eine kritische Temperaturgrenze (abhängig vom Klebstoff) schützt und somit die Tragfähigkeit des Klebstoffs gewährleistet wird.

## **Versuchsreihe 3 – Kriechversuche and Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen bei erhöhter Temperatur**

### **Versuchsreihe 3 – Materialien**

In Versuchsreihe 3 wurden zwei verschiedene Versuchskonfigurationen verwendet. Ziel dieser Serie war es, das mechanische Verhalten bzw. Versagen der Verbindung mit den entsprechenden Temperaturniveaus zu verknüpfen. Dazu wurden Prüfkörper mit Gewindestangen parallel zur Faserrichtung in Holzprobekörper eingeklebt.

Für alle Prüfkörper wurde Brettschichtholz aus Fichte mit der Festigkeitsklasse GL 24h verwendet.

Die Prüfkörper wurden mindestens 28 Tage bei Raumtemperatur (20 °C/ 65 % r. F.) konditioniert, bis die Gleichgewichtsfeuchte erreicht war. Die Dichte wurde nach EN 408 am gesamten Prüfkörper bestimmt. Von den wärmebelasteten Prüfkörpern wurden außerdem Darrversuche nach EN 13183-1 entnommen [45]. Die Dichte und der Feuchtigkeitsgehalt wurden dabei direkt nach der Prüfung und zum Vergleich nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte bestimmt. Der mittlere Feuchtigkeitsgehalt betrug vor der Durchführung der Versuche 13 %.

Die mittlere Dichte aller Prüfkörper nach EN 408 betrug 450 kg/m<sup>3</sup> mit einer Standardabweichung von 5 %. Ein Vergleich mit den Darrversuche ergab eine Differenz von weniger als 2 %.

Es wurden metrische Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 nach DIN 976 verwendet. Die hohe Festigkeitsklasse wurde gewählt, um ein Stahlversagen ausschließen zu können. Die verwendeten Nenndurchmesser der eingeklebten Gewindestangen betragen 12 mm und 20 mm.

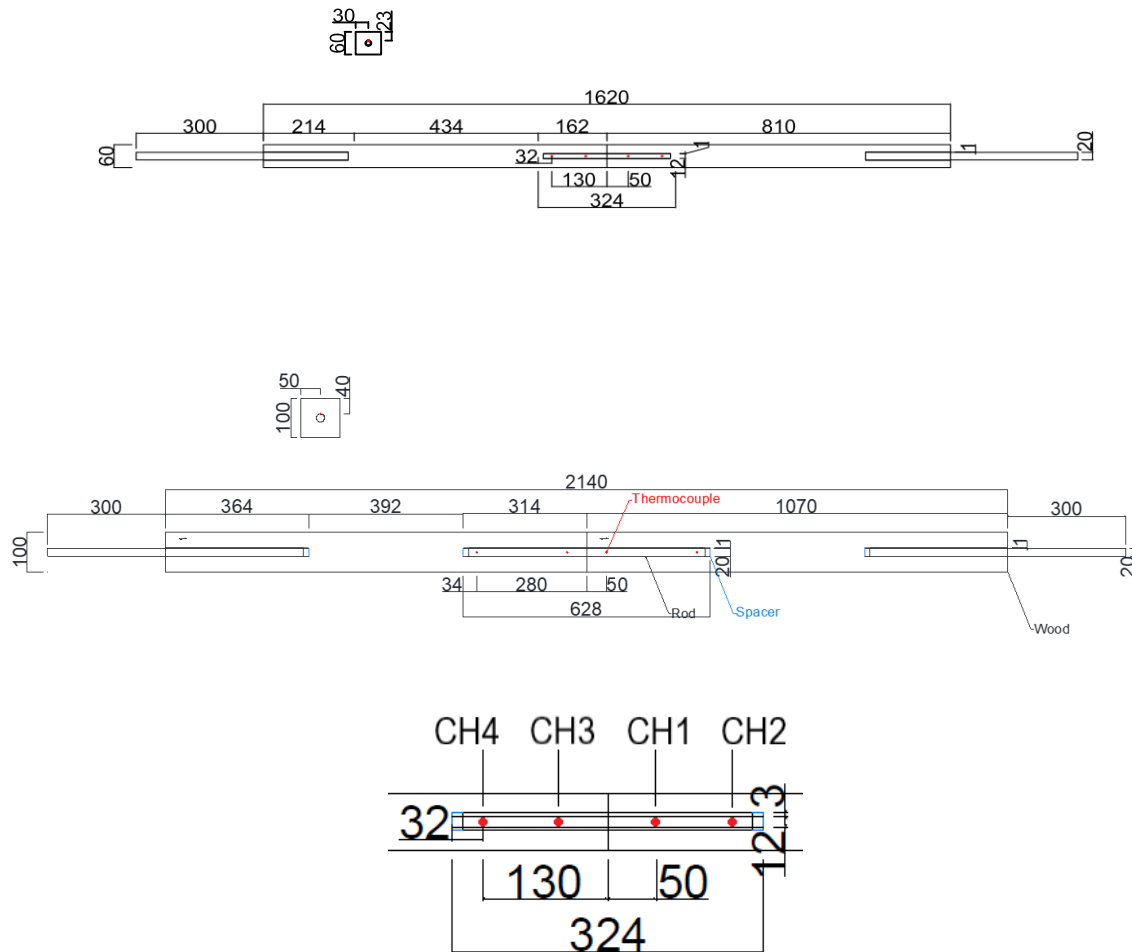
Für die Verklebung wurden ein Zweikomponenten-Epoxidharz (Klebstoff 1) und ein Zweikomponenten-Polyurethan (Klebstoff 2) verwendet.

### **Versuchsreihe 3 – Prüfkonfiguration**

Die Querschnitte betragen entweder 60 mm × 60 mm oder 100 mm × 100 mm, je nach Gewindestangedurchmesser. Die geforderten Mindestabstände von  $2,5 \cdot d_{\text{rod}}$  nach EN 1995-1-1 wurden somit eingehalten. Für die Herstellung eines Prüfkörpers wurden je zwei BSH-balken verwendet. Diese wurden durch das Einkleben einer Gewindestange verbunden. Zur Aufbringung der Zugbelastung wurden an den äußeren Enden des Prüfkörpers jeweils zwei zusätzliche Gewindestangen angebracht. Der Abstand zwischen dem mittleren Gewindestange und den äußeren Gewindestangen betrug gemäß EN 17334 mindestens  $1,4 \cdot$  der Einbindelänge des äußeren Gewindestange.

Es wurden zwei Klebstoffugendicken von 1 mm und 3 mm betrachtet. Bei der Klebstoffugendicke von 3 mm wurden an den Gewindestangeenden Abstandshalter aus Kunststoffkappen angebracht, so dass die Gewindestange im Bohrloch zentriert war. Die Einbindelänge wurde daher um die Höhe eines Abstandshalters verlängert. Der Aufbau des Prüfkörpers ist in Abbildung 22 dargestellt.

Vier Thermoelemente vom Typ K wurden am Rand des Bohrlochs in einem Abstand von 50 mm und 130 mm von der Stoßfuge angebracht (CH1 – CH4).



**Abbildung 22: Schnitte und Messstellen der Prüfkörper in Versuchsreihe 3**

Die Versuchsreihe 3 kann in vier Teile unterteilt werden. In der Versuchsreihe 3.1 fanden die Referenzversuche bei Umgebungstemperatur statt. Die Kriechversuche mit thermischer Beanspruchung wurden in den Versuchsreihen 3.2 bis 3.4 durchgeführt.

Die Prüfkörper aus der Versuchsreihe 3.1 (Referenzversuche bei Raumtemperatur) wurden mit steigender Zugkraft bis zum Versagen des Prüfkörpers belastet. Für jede Konfiguration wurden zwei identische Prüfkörper geprüft. Die Mittelwerte der Bruchlast beider Versuche wurden als Referenzlast für die Kriechversuche unter thermischer Belastung verwendet.

Der zweite Versuchsaufbau umfasste thermische Prüfungen. Hier wurden die Versuche mechanisch mit einer konstanten Zuglast auf der Grundlage der Referenzversuche belastet. Die aus den Referenzversuchen ermittelten Mittelwerte wurden dabei mit 0,4 und 0,6 faktorisiert. Gleichzeitig wurden sie auf eine Temperatur von 110 °C erwärmt, bis aufgrund der Wärmebelastung ein Versagen auftrat. Zu Beginn des Versuchs herrschten Raumtemperaturbedingungen. Um ein Versagen an den Gewindestangen an den beiden Prüfkörperenden zu verhindern, wurde nur der mittlere Teil der Prüfkörper erwärmt.

Zur mechanischen Belastung wurde ein Hohlkolbenzylinder mittels Druckluftsteuerung eingesetzt. Aufgrund der steigenden Verformungen bei höheren Temperaturen musste die mechanische Belastung während des Versuchs nachjustiert werden. Die Abweichung der Belastung zum Sollwert lag über die Versuchsdauer in einem Bereich von +/- 0,5 kN.

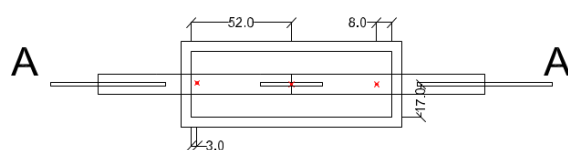
Die Prüfkörper der Versuchsreihe 3.1 hatten zu Beginn keine Verstärkungsmaßnahmen gegen Quersugversagen des Holzes an den Prüfkörperenden vorgesehen. Daher versagten die Versuche 11322 und 11421 nicht wie vorgesehen am mittigen Anschluss, sondern am Krafteinleitungspunkt am Auflager. Die beiden gemessenen Werte für die Versagenslast wurden dennoch in der Auswertung berücksichtigt, da sie deutlich höhere Versagenslasten aufwiesen als ihre jeweiligen identischen Pendanten in dieser Versuchsanordnung. Da das Versagen an der äußeren Fuge des Prüfkörpers auftrat, ist außerdem davon

auszugehen, dass die zentrale Verbindung noch höhere Lasten getragen hätte. Um ein Aufspalten des Holzes an den Enden der Probe infolge von Querkzugspannungen zu verhindern, wurden bei den weiteren Versuchen an allen vier Seiten OSB-Platten als Verstärkungsmaßnahme angebracht. Danach versagten alle Versuche wie geplant in der mittleren Verbindung.

Während der Versuche wurden die Temperatur am Bohrlochrand, die Lufttemperatur im Ofen, die Belastungshöhe und die Gesamtverformung des Prüfkörpers mittels Seilzugwegaufnehmern aufgezeichnet.

Zur Messung der Lufttemperatur wurden ebenfalls vier Thermoelemente verwendet (CH17 - CH20). Zunächst wurden nur zwei Messpunkte in unmittelbarer Nähe der Fuge in der Mitte eines Prüfkörpers installiert (CH19 & CH20). Da infolge der Beheizungsart im Ofen ein Temperaturgradient vom Einlass zum Auslass vorlag wurden zur Erfassung dieses Gradienten weitere Messpunkte im Bereich des Zu- und Ablaufs des konvektiven Wärmeeintrags angebracht (CH17 & CH18). Deren Position ist in Abbildung 23 zu sehen. Auf der Seite des Lufteinlasses wurden stets höhere Temperaturen gemessen als am Auslass, wodurch sich ein Temperaturgefälle in der Box ergab. Dadurch versagten die Prüfkörper ohne Ausnahme auf der Seite des Warmlufteinlasses.

### Top View



### Section A

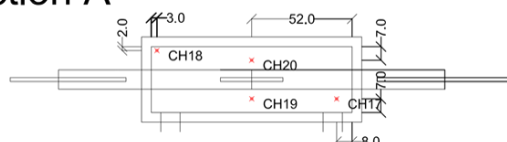


Abbildung 23: Positionen der Thermoelemente CH17 – CH20 (rot) zur Messung der Lufttemperatur

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt den Aufbau der einzelnen Prüfkörper.

Tabelle 1: Aufbau der Prüfkörper in Versuchsreihe 3

Prüfkörper	Klebstoff	Klebstoff- fugendicke [mm]	Querschnitt [mm × mm]	Gesamt- länge [mm]	Durchmesser Gewindestange [mm]	Einbinde- länge [mm]
11111	1	1	60 × 60	1620	12	162
11112	1	1	60 × 60	1620	12	162
11211	1	3	60 × 60	1620	12	162
11212	1	3	60 × 60	1620	12	162
12111	2	1	60 × 60	1620	12	162
12112	2	1	60 × 60	1620	12	162
12211	2	3	60 × 60	1620	12	162
12212	2	3	60 × 60	1620	12	162
11311	1	1	100 × 100	2140	20	150
12311	2	1	100 × 100	2140	20	150
11321	1	1	100 × 100	2140	20	300
11322	1	1	100 × 100	2140	20	300
11421	1	3	100 × 100	2140	20	314
11422	1	3	100 × 100	2140	20	314
12321	2	1	100 × 100	2140	20	300
12322	2	1	100 × 100	2140	20	300
12421	2	3	100 × 100	2140	20	314
12422	2	3	100 × 100	2140	20	314
21111	1	1	60 × 60	1620	12	162
21211	1	3	60 × 60	1620	12	162

<b>22111</b>	2	1	60 × 60	1620	12	162
<b>22211</b>	2	3	60 × 60	1620	12	162
<b>21311</b>	1	1	100 × 100	2140	20	150
<b>22311</b>	2	1	100 × 100	2140	20	150
<b>21321</b>	1	1	100 × 100	2140	20	300
<b>21421</b>	1	3	100 × 100	2140	20	314
<b>22321</b>	2	1	100 × 100	2140	20	300
<b>22421</b>	2	3	100 × 100	2140	20	314
<b>31111</b>	1	1	60 × 60	1620	12	162
<b>32111</b>	2	1	60 × 60	1620	12	162
<b>31321</b>	1	1	100 × 100	2140	20	300
<b>32321</b>	2	1	100 × 100	2140	20	300
<b>41111</b>	1	1	60 × 60	1620	12	162
<b>42111</b>	2	1	60 × 60	1620	12	162

### Versuchsreihe 3 – Versagensarten

Nach der Prüfung wurden die gebrochenen Prüfkörper entlang der Gewindestange gespalten und die Verbindung untersucht. Die Prüfkörper können in den drei verwendeten Materialien versagen. Es wurde zwischen den folgenden Versagensarten unterschieden.

- Versagen des Klebstoffs
  - o Adhäsionsbruch Klebstoff - Holz (a)
  - o Adhäsionsbruch Klebstoff - Stahl (b)
  - o Kohäsives Versagen (c)
- Versagen Holz
  - o Scherbruch in der Nähe der Klebefuge (d)
  - o Spaltung des Holzes (e)
  - o Ausreißen mit einem Teil des umgebenden Holzes (f)
  - o Zugbruch im Holz (g) (ist nicht aufgetreten)
- Stahlversagen durch Überschreiten der Streckgrenze oder der Zugfestigkeit (h) (ist nicht aufgetreten)

Häufig aufgetretene Versagensarten werden in nachfolgender Abbildung 24 dargestellt.



Adhäsionsbruch Klebstoff  
- Stahl (b)

22211

Mischbruch Adhäsion  
Klebstoff-Holz und  
Klebstoff-Stahl (a-b)

31321

Scherbruch in der Nähe  
der Klebefuge (d)

11321

Ausreißen mit einem  
Teil des umliegenden  
Holzes (f)

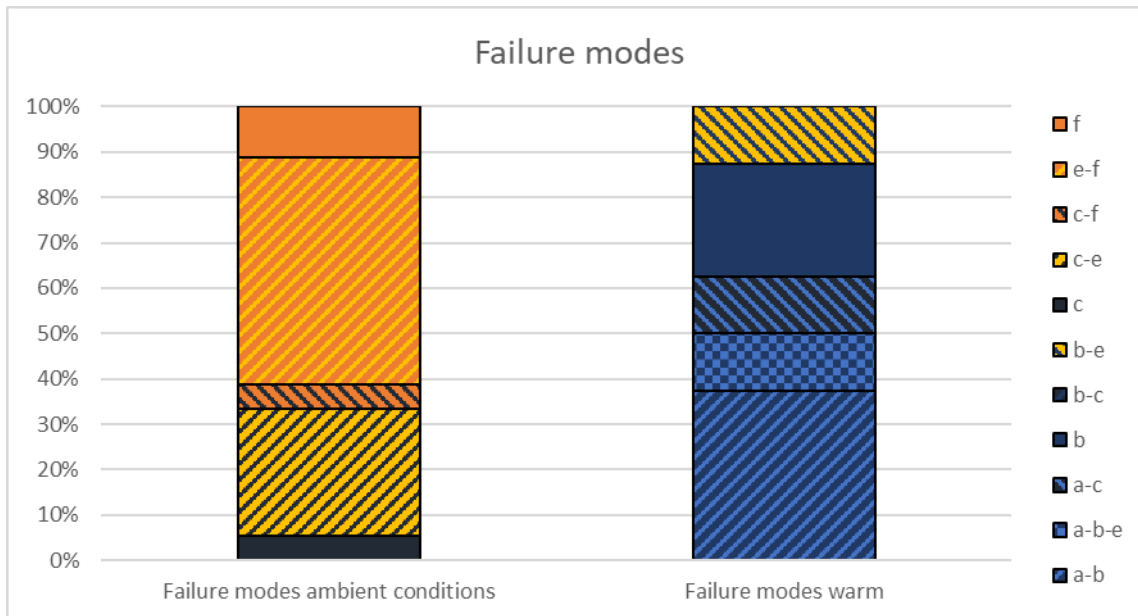
12311

### Abbildung 24: Häufige Versagensarten in der Versuchsreihe 3

In den meisten Fällen konnte ein gemischtes Versagen festgestellt werden. Bei den Versuchen unter Normaltemperatur (20 °C) konnte häufig ein Spalten des Querschnitts beobachtet werden (e). Auch bei den „Warmkriechversuchen“ gab es einige Versuche bei denen ein Spalten auftrat. Bei der Auswertung der digitalen Aufzeichnungen fiel jedoch auf, dass bei einigen Prüfkörpern die Spaltung erst nach dem eigentlichen Versagen stattfand. Diese wurde erst beim Ausbau ausgelöst, wenn der Prüfkörper demontiert und die Gewindestange komplett herausgezogen wurde. Bei den Prüfkörpern 22421 und 31111 konnte nicht mehr festgestellt werden, wann diese Spaltung auftrat. Daher wurde die Spaltung des Holzes in das nachfolgende Diagramm in Abbildung 25 als Bruchkriterium mit aufgenommen.

Abbildung 25 zeigt die verschiedenen Versagensarten für die Referenzversuche und für die Kriechversuche mit thermischer Belastung. Ein Klebstoffversagen zeigt eine bläuliche Färbung, während das Holzversagen im orangefarbenen Bereich liegt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei den Referenzversuchen hauptsächlich Versagen im Holz auftrat. Dabei ist ein großer Teil auf einen Mischbruch zwischen Spaltung und Ausreißen des umgebenden Holzes zurückzuführen.

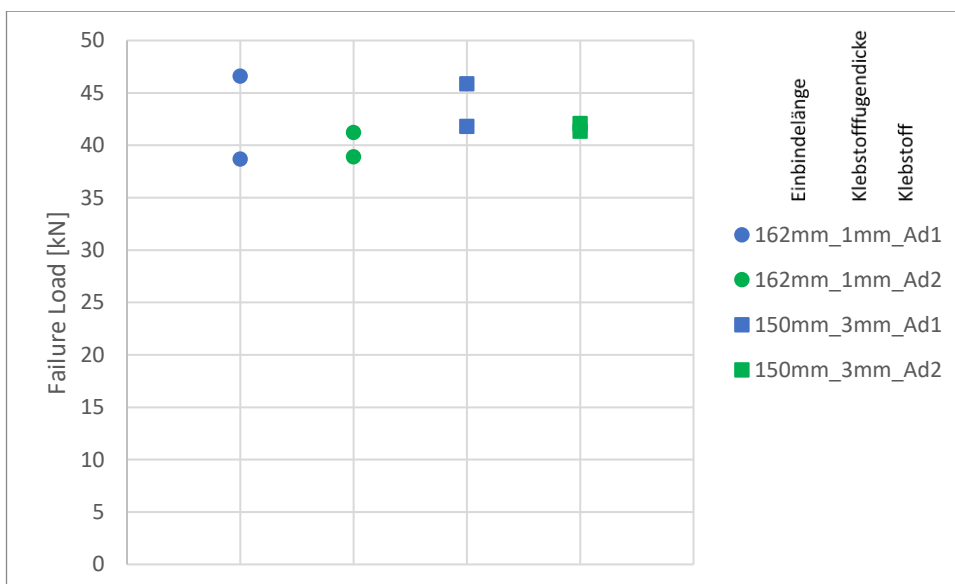
Im Vergleich dazu zeigen die Versuche unter thermischer Belastung deutlich, dass der Klebstoff im Falle eines Versagens entscheidend wird. Nur ein geringer Anteil von knapp über 20% ist mit einem Versagen im Holz verbunden. Ein Einfluss des Querschnitts und des Klebstoffs auf die Art des Versagens kann nicht eindeutig bestimmt werden.



**Abbildung 25: Übersicht über Versagensarten in Versuchsreihe 3 (Versagensarten: Adhäsionsbruch Klebstoff - Holz (a), Adhäsionsbruch Klebstoff - Stahl (b), Kohäsives Versagen (c), Scherbruch in der Nähe der Klebefuge (d), Spaltung des Holzes (e), Ausreißen mit einem Teil des umgebenden Holzes (f))**

### Versuchsreihe 3 –Referenzversuche unter Normaltemperatur

Für die Prüfkörper mit einem Querschnitt von 60 mm x 60 mm aus der Versuchsreihe 3.1 ist die aufgetretene Bruchlast in Abbildung 26 dargestellt. Es wird zwischen den beiden Klebstoffen und der Klebstofffugendicke unterschieden. Die quadratischen Symbole zeigen die Ergebnisse für eine Klebstofffugendicke von 3 mm. Es ist zu erkennen, dass die Bruchlast für beide Klebstoffe im Bereich von 45 kN liegt. Im Durchschnitt sind die Werte für Klebstoff 1 etwas höher als für Klebstoff 2. Die Dicke der Klebefuge führte zu keiner nennenswerten Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung. Da das Versagen in beiden Versuchen hauptsächlich mit dem Spalten und Ausreißen des Holzes verbunden war, wird davon ausgegangen, dass bei der Wahl eines größeren Querschnittes höhere Lasten erreicht worden wären, da das Holz die Hauptversagensursache ist. Aus diesem Grund liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich.



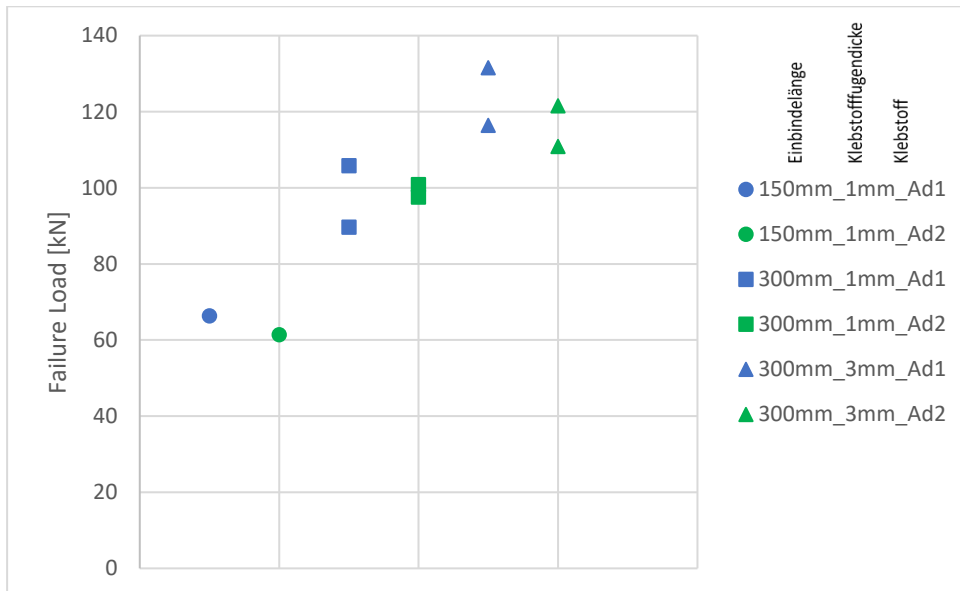
**Abbildung 26: Bruchlast der Prüfkörper mit einem Querschnitt von 60 mm x 60 mm in Versuchsreihe 3.1**

Die Prüfkörper mit einem Querschnitt von 100 x 100 mm zeigen deutlich größere Unterschiede in ihren Bruchlasten in Abhängigkeit der Klebstoffe (siehe Abbildung 27). Aufgrund des größeren Gewindestangendurchmessers bei einer gleichbleibenden Einbindelänge von 150 mm versagte der Prüfkörper für beide Klebstoffe ca. 20 kN später im Bereich von 60 - 65 kN im Vergleich zu den Prüfkörpern mit einer Gewindestangendurchmesser von 12 mm. Durch den größeren Gewindestangendurchmesser und damit

größeren Durchmesser des Bohrlochs ist eine größere Klebefläche für die Übertragung von Scherspannungen vorhanden, was die Ursache für die höheren Versagenslasten im Vergleich zu den kleineren Gewindestangedurchmessern ist.

Bei einer größeren Einbindelänge der Gewindestange steigen die Bruchlasten ebenfalls an. Der Anstieg ist jedoch nicht proportional zur Einbindelänge.

Mit zunehmender Klebstoffugendicke steigt die Bruchlast weiter an. Hierfür kann es zwei Ursachen geben. Das Bohrloch hat einen vergleichsweise größeren Durchmesser, was eine größere Haftfläche zum Holz erzeugt. Zweitens wird angenommen, dass die geringere Steifigkeit des Klebstoffs die Spannungsspitzen an den Bohrlochenden reduziert, die die Ursache für das Aufspalten des Holzes sind. Klebstoff 1 wies in den Versuchen eine um ca. 15% höhere mittlere Tragfähigkeit auf.



**Abbildung 27: Bruchlast der Prüfkörper mit einem Querschnitt von 100 mm x 100 mm in Versuchsreihe 3.1**

Abbildung 28 zeigt einen Vergleich der Prüfergebnisse mit der nach aktuellen draft für EN 1995-1-1 anzusetzenden Tragfähigkeit. Die Werte des Bemessungsmodells werden auf der y-Achse aufgetragen. Die Prüfergebnisse sind auf der x-Achse dargestellt. Liegen die Werte unterhalb der Winkelhalbierenden sagt das Bemessungsmodell geringere Tragfähigkeiten voraus und zeigt konservativere Ergebnisse. Liegen die Werte darüber, wird die Verbindung durch das Bemessungsmodell überschätzt.

Im Diagramm sind drei verschiedene Lastniveaus zu erkennen. Die niedrigsten Werte gelten für den Versuch mit einem Querschnitt von 60 mm x 60 mm und einem Gewindestangedurchmesser von 12 mm. Die höchsten Werte zeigen die Versuchsergebnisse für M20-Gewindestangen mit einer Einbindelänge von 300 mm. Die beiden dazwischen liegenden Ergebnisse repräsentieren die M20-Gewindestangen mit einer kürzeren Einbindelänge von 150 mm.

Das Bemessungsmodell lieferte für alle Prüfkörper geringere Tragfähigkeiten als in den Versuchen. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass es bei den M12-Gewindestangen fast keine Unterschiede in der Bruchlast in Abhängigkeit vom Klebstofftyp oder der Klebstoffugendicke gibt.



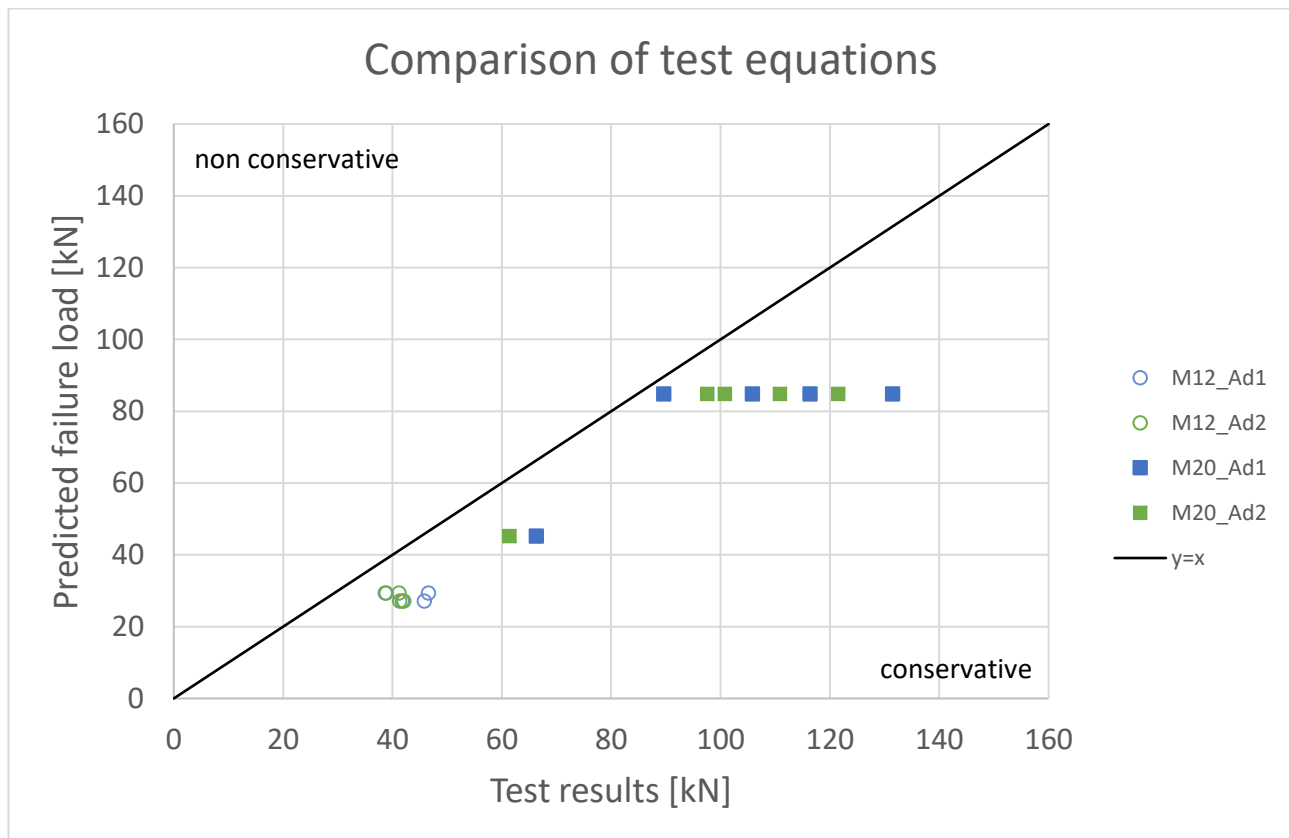


Abbildung 28: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der analytischen Berechnung nach draft zu EC5

### Versuchsreihe 3 – Temperaturkriechversuche

Für die Kriechversuche unter Temperatureinwirkung wurde die Temperatur zum Zeitpunkt der Prüfkörperversagens bestimmt. Diese wird nachfolgend in Abhängigkeit des Klebstoffs mit den Prüfungen aus Versuchsreihe 1 verglichen.

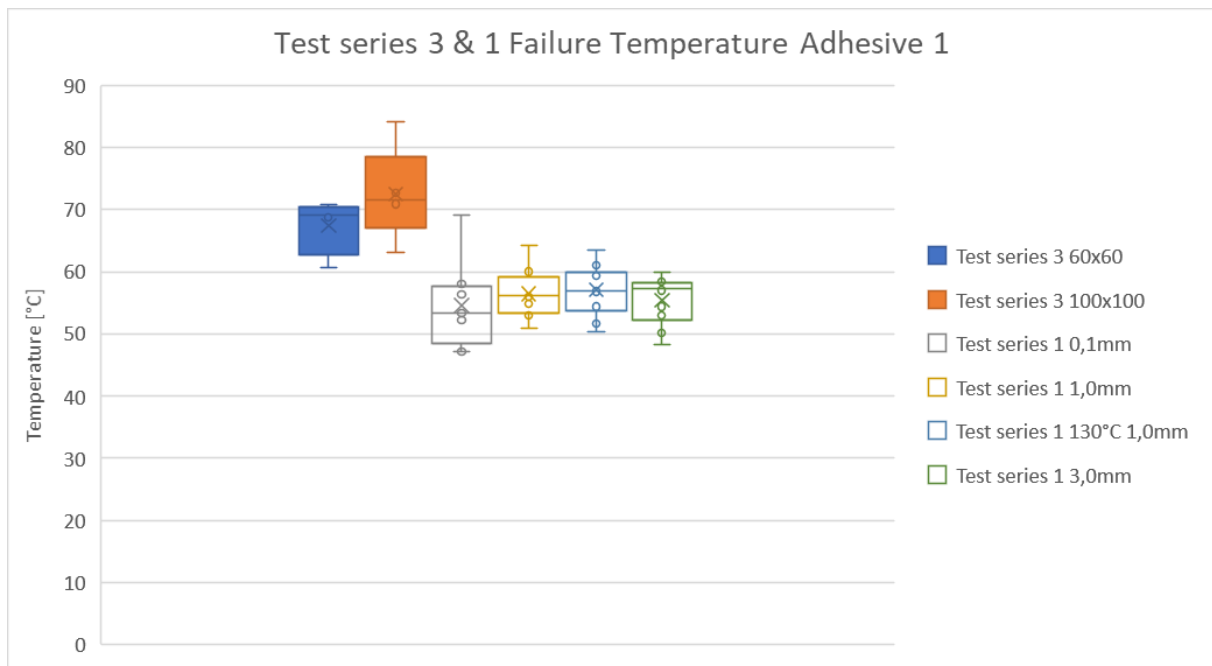
Abbildung 29 zeigt die Versagenstemperaturen der Prüfkörper der Versuchsreihen 1 (Kleinprüfkörper/Scherversuche) und 3 (Temperaturkriechversuche mit eingeklebten Gewindestangen) für Klebstoff 1 bei einem Belastungsniveau von 40 % der Referenzversuche. Für die Versuchsreihe 1 werden die verschiedenen Klebstoffugendicken miteinander verglichen. Bei Versuchsreihe 1 wurde ebenfalls die Konfiguration mit einer Lufttemperatur von 130 °C berücksichtigt. Für die Versuchsreihe 3 wurden die beiden unterschiedlichen Querschnitte miteinander verglichen.

Der Klebstoff 1 erreichte bei der Versuchsreihe 3 Versagenstemperaturen im Bereich von ca. 65 °C bis ca. 80 °C. Diese lagen deutlich höher als die Temperaturen aus den Versuchen der Versuchsreihe 1 mit kleinformatigen Prüfkörpern. Es wird vermutet, dass die geringere relative Belastung der Grund dafür ist. In der Versuchsreihe 3 wurde die Belastung auf den Mittelwert und nicht wie in Versuchsreihe 1 auf den Maximalwert bezogen. In der Versuchsreihe 1 wurde bereits festgestellt, dass eine höheres Belastungsniveau zu einem früheren Versagen führt, weil der Klebstoff mit steigender Temperatur an Festigkeit verliert. Bei höherer Belastung wird die Tragfähigkeit des Klebstoffs entsprechend schneller überschritten, wodurch die Versagenstemperatur sinkt.

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Streuung der Ergebnisse bei den Versuchen mit eingeklebten Gewindestangen größer ist. Da hier größere Prüfkörper verwendet wurden, steigt die Wahrscheinlichkeit von Inhomogenitäten im Holz und in der Klebstoffuge. Eine gleichmäßigere Erwärmung der Klebstoffuge ist bei den kleinformatigen Prüfkörpern wahrscheinlicher, da weniger Einflussfaktoren vorhanden sind (Inhomogenitäten im Materialbereich, Oberfläche, Temperaturverteilung im Ofen usw.). Außerdem weisen die Prüfkörper der Versuchsreihe 3 eine höhere Holzfeuchte auf, was ebenfalls einen größeren Einfluss auf das Aufheizverhalten des Querschnitts haben kann.

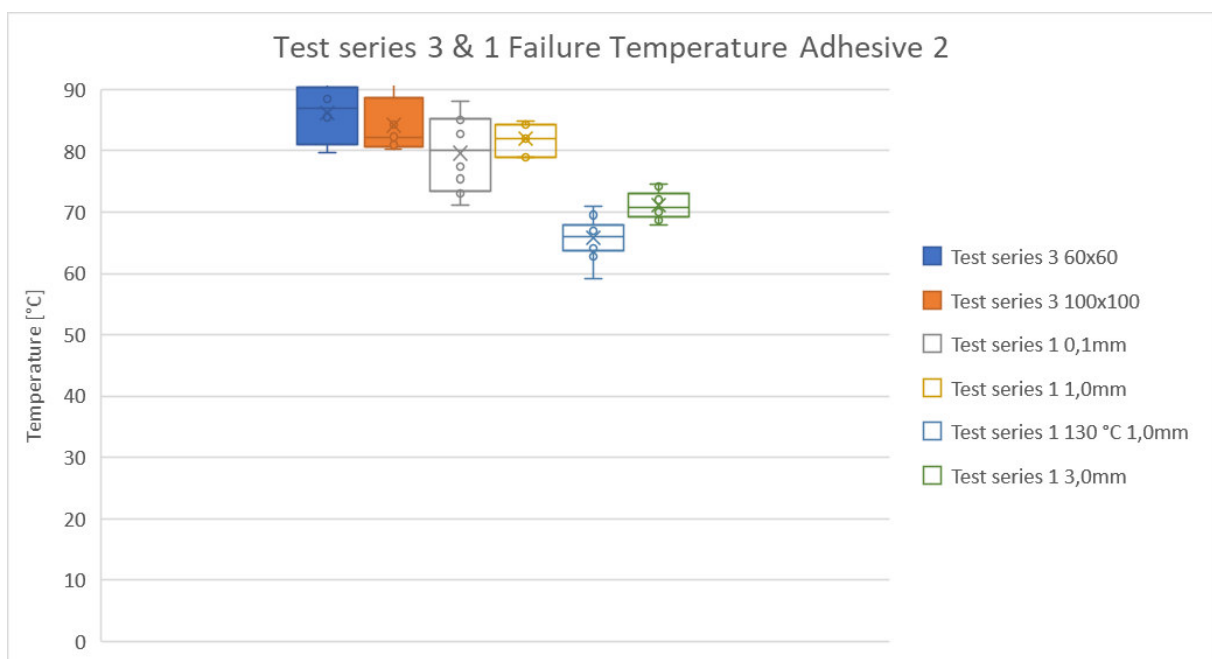
Bei den Prüfkörpern mit einem Querschnitt von 100 mm x 100 mm wurden höhere Versagenstemperaturen gemessen als bei den Querschnitten von 60 mm x 60 mm. Hier konnte kein direkter Zusammenhang mit den anderen Prüfungen und den Versagensarten festgestellt werden.





**Abbildung 29: Vergleich der Versagenstemperaturen von Versuchsreihe 1 (Kleinprüfkörper/Scherversuche) und Versuchsreihe 3 (Temperaturkriechversuche) für Klebstoff 1 mit einem Lastniveau von 40 % der Referenzversuche**

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich für Klebstoff 2 (siehe Abbildung 30). Die Versagenstemperaturen liegen bei der Versuchsreihe 3 im Bereich von ca. 80 °C bis 90 °C und sind damit höher als bei Klebstoff 1. In der Versuchsreihe 1 wurden ähnliche Ergebnisse erzielt. Bei Klebstoff 2 sind die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen 3 und insbesondere die Klebstoffugendicke von 0,1 mm und 1,0 mm der Versuchsreihe 1 nicht so groß wie bei Klebstoff 1.



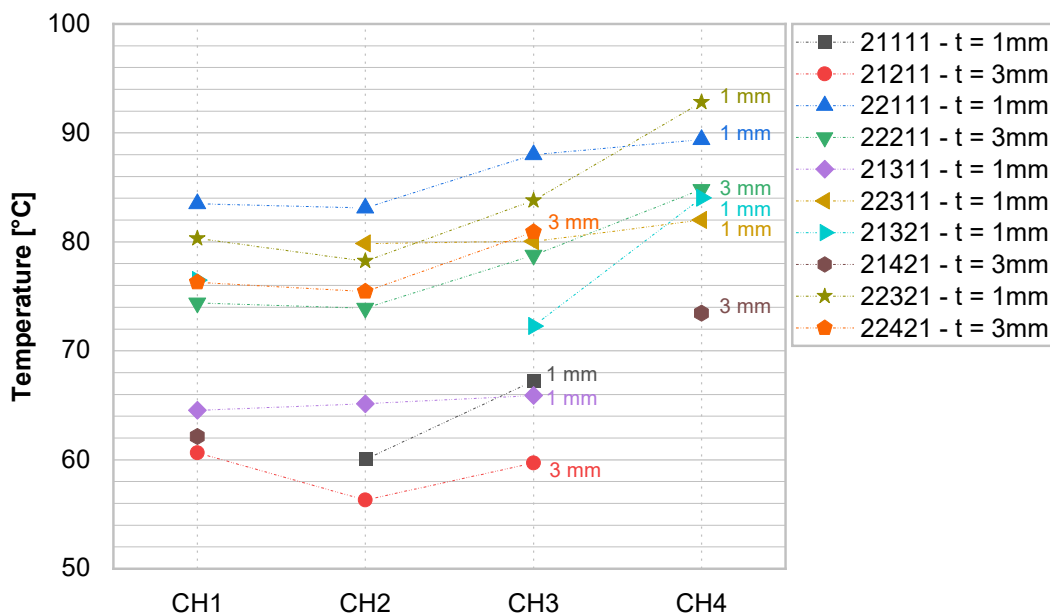
**Abbildung 30: Vergleich der Versagenstemperaturen von Versuchsreihe 1 (Kleinprüfkörper/Scherversuche) und Versuchsreihe 3 (Temperaturkriechversuche) für Klebstoff 2 mit einem Lastniveau von 40 % der Referenzversuche**

Abbildung 31 zeigt einen Vergleich der Klebstoffugendicke der thermisch belasteten Prüfkörper aus der Versuchsreihe 3.2. Die baugleichen Prüfkörper sind in der Legende jeweils untereinander aufgeführt. Sie unterscheiden sich nur in ihrer Klebstoffugendicke von 1 mm und 3 mm. Da hier die Versagenstemperatur dargestellt wird, spielt die Holzüberdeckung der Gewindestange keine Rolle bei der Beurteilung.

Die Messungen zeigen immer eine niedrigere Versagenstemperatur für die 3 mm Klebstoffugendicke. Dies könnte mit der höheren Belastung der Prüfkörper zusammenhängen. Relativ gesehen werden diese auch mit 40 % aus den Referenzversuchen belastet. Bei den Prüfkörpern mit einer Klebstoffugendicke von 3 mm

wurden in den Referenzversuchen jedoch immer höhere Bruchlasten erreicht. Bei den Querschnitten von 60 mm x 60 mm waren dies im Mittel etwa 5 %, bei den Querschnitten von 100 mm x 100 mm wurden im Mittel 20 % höhere Werte erreicht. Es wurde angenommen, dass durch die größere Klebstofffugendicke eine Reduzierung der Spannungsspitzen an den Bohrlochenden auftritt. Daher waren höhere Tragfähigkeiten möglich. Der Klebstoff selbst weist durch die größere Klebstofffugendicke keine höhere Festigkeit auf. Diese und somit die Resttragfähigkeit nehmen mit steigender Temperatur ab. Bereits die Versuchsreihe 1 (Kleinprüfkörper/Scherversuche) hat bestätigt, dass eine höhere mechanische Belastung zu niedrigeren Versagenstemperaturen führt. Der Grund dafür ist, dass die Resttragfähigkeit des Klebstoffs schneller überschritten wird. Da die Festigkeit des Klebstoffs für beide Klebstofffugendicken gleich ist, aber für eine Fugendicke von 3 mm eine vergleichsweise höhere mechanische Belastung angenommen wird, wird die abnehmende Tragfähigkeit des Klebstoffs bei Erwärmung schneller überschritten. Es erscheint daher plausibel, dass bei den größeren Klebstofffugendicken niedrigere Versagenstemperaturen erreicht werden als bei den baugleichen Ausführungen mit einer Klebstofffugendicke von 1 mm.

Bei der Betrachtung der Versagenszeiten fällt auf, dass die größere Klebstofffugendicke zu einem früheren Versagen der Prüfkörper führte. Der Grund dafür könnte zum einen die bereits erwähnte höhere Belastung der Prüfkörper sein, die die Resttragfähigkeit des Klebstoffs schneller überschreiten könnte. Zum anderen hatten die Prüfkörper weniger Holzüberdeckung der Gewindestange, was zu einem schnelleren Temperaturanstieg am Bohrlochrand führen kann. Der Klebstofftyp hatte keinen Einfluss auf dieses Verhalten.



**Abbildung 31: Vergleich der Versagenstemperaturen von Versuchsreihe 3.2 für verschiedene Klebstofffugendicken an den unterschiedlichen Messstellen (CH) [46]**

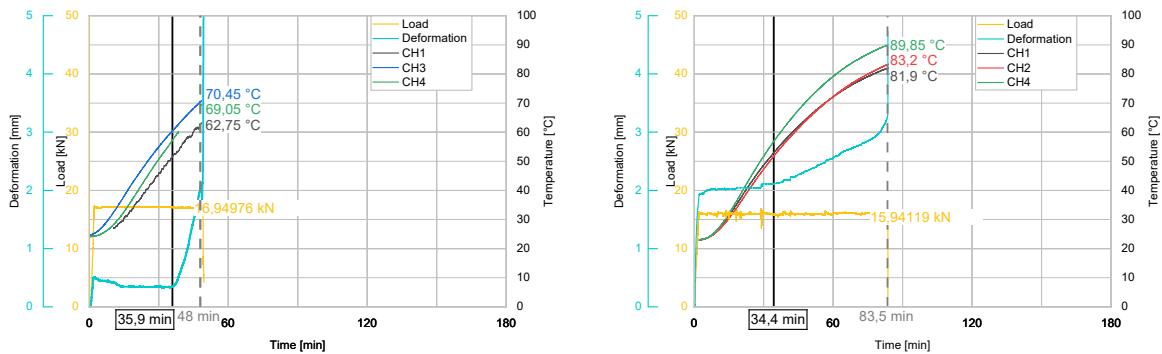
Der Versuchsaufbau erlaubte nur die Messung der Gesamtverformung des Prüfkörpers. Da die Prüfkörper jedoch immer auf der Seite des Lufteinlasses versagten, wird davon ausgegangen, dass ein großer Teil der aufgezeichneten Verformung in diesem Bereich stattfand.

Zwei typische Verformungskurven sind in Abbildung 32 dargestellt. Auf der vertikalen Achse ist die Verformung, die Temperatur und die mechanische Belastung angegeben. Auf der horizontalen Achse ist die Dauer der Versuche aufgetragen. Das linke Diagramm zeigt die Kurve für Klebstoff 1 und das rechte für Klebstoff 2. Auf der x-Achse sind der Zeitpunkt des Versagens sowie der Startzeitpunkt der Verformung eingezeichnet.

Die Verformungskurven lassen sich generell in vier Abschnitte unterteilen. Zu Beginn gibt es einen steilen Anstieg, bei dem die Belastung auf das Zielniveau gebracht wird. Danach bildet sich ein Plateau, in dem sich die Verformung kaum ändert. Die auftretenden Schwankungen sind auf den Druckverlust im Hydrauliksystem zurückzuführen und mussten daher während der Versuche nachgeregelt werden. Im dritten Abschnitt wird der Klebstoff weicher und die Verformung nimmt quasi-linear zu. Das Belastungsniveau kann jedoch weiterhin aufrechterhalten werden. Dieser Anstieg hält bis zur vierten Phase an, die von einem plötzlichen Anstieg der Verformung begleitet wird. In diesem Fall kann die aufgebrachte Last nicht mehr vom Klebstoff übertragen werden und der Prüfkörper versagt plötzlich.

In Abschnitt 3 weisen die beiden Klebstoffe jedoch ein anderes Verhalten auf. Klebstoff 1 zeigt bei allen Prüfkörpern eine deutlich kürzere Zeit bis zum Versagen. Auch der Anstieg der Verformung ist steiler und der Prüfkörper verformt sich schneller und stärker. Bei Klebstoff 2 beginnt die Verformung bei niedrigeren Temperaturen. Allerdings ist hier ein flacherer Anstieg zu beobachten. Hier hält die Verformung über einen längeren Zeitraum an, bis eine kritische Temperatur überschritten wird und der Klebstoff versagt. Der Grund dafür könnte die höhere thermische Beständigkeit von Klebstoff 2 sein. Er behält unter Temperatureinwirkung einen größeren Teil seiner Belastbarkeit im Vergleich zu Klebstoff 1. Aus diesem Grund könnte die reduzierte Festigkeit durch die thermische Belastung bereits zu ersten Verformungen des Klebstoffs führen. Die Tragfähigkeitsgrenze wird jedoch noch nicht überschritten.

Ausgehend von der Versuchsreihe 1 zeigt der Klebstoff 1 bereits beim Erreichen einer Temperatur von 60 °C einen starken Festigkeitsabfall, so dass keine großen Tragfähigkeitsreserven mehr vorhanden sind. Es kommt daher zu schnelleren und größeren Verformungen bis zum Versagen.



**Abbildung 32: Typische Last-Verformungskurven für Klebstoff 1 (links) und Klebstoff 2 (rechts) [46]**

Die Versuche haben gezeigt, dass der Klebstoff eine bestimmte kritische Temperatur nicht überschreiten sollte, um seine Tragfähigkeit zu gewährleisten. Daher wird aus den Versagenstemperaturen der Versuchsreihe 3 eine kritische Temperaturgrenze abgeleitet.

Die Versagenstemperatur wird aus den Versuchen mit einem Belastungsniveau von 40 % der Referenzversuche zur Bestimmung der kritischen Temperaturgrenze herangezogen. Wegen des Temperaturgradienten im Ofen wurden nur die Temperaturen an der Prüfkörperhälfte in die Berechnung einbezogen, in der die Verbindung versagte. Außerdem wurden nur die Versuche, bei denen ein Klebstoffversagen auftrat, für die Bestimmung der Temperaturgrenze berücksichtigt. Für den Brandfall wurde der 20 % - Fraktilwert verwendet.

Die auf diesen Versuchen basierende kritische Temperaturgrenze beträgt 69 °C für Klebstoff 1 und 79 °C für Klebstoff 2. Die Temperaturen wurden auf den nächstliegenden ganzzahligen Wert abgerundet.

Die mittleren Temperaturen in Abhängigkeit von der Belastungsstufe werden in Anhang C angegeben.

Die Fuge zwischen den beiden Prüfkörperhälften mit einem 2 mm dicken Spalt zeigte kein anderes Erwärmungsverhalten als die Probe ohne den Spalt. Es ist daher davon auszugehen, dass bei dieser Breite kein erhöhter Wärmeeintrag in die Verbindung vorliegt.

Die Versuchsdurchführung ließ keine Aussage darüber zu, ob die Verformungen zu Beginn plastischer Natur sind oder ob sie bei erneuter Temperaturabsenkung wieder abnehmen. Eine Erhöhung der Glasübergangstemperatur des Klebstoffs konnte nicht festgestellt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass dieser Effekt im Brandfall keine Rolle für die Festigkeitsentwicklung der Verbindung spielt. Eine Nachuntersuchung der Festigkeitsentwicklung nach einem Abkühlungsprozess wäre hier wünschenswert. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs durch eine entsprechende Vorbehandlung erhöht werden kann und auch das Niveau der kritischen Klebstofftemperaturgrenze auf dieses Niveau angehoben werden kann.

Die Bewertung der kritischen Klebstofftemperaturgrenze erfolgte auf der Grundlage der beiden verwendeten Klebstoffe. Diese sind nicht repräsentativ für alle Klebstoffe desselben Typs, da die Bestandteile und die chemische Zusammensetzung je nach Hersteller variieren. Es sind daher weitere Versuche notwendig, um die kritische Klebstofftemperaturgrenze anderer Klebstoffe zu bestimmen, da eine allgemeine Anwendbarkeit nicht gegeben ist.

Ein weiterer Aspekt, der nicht berücksichtigt wurde, ist die thermische Dauerbelastung des Klebstoffs im Bereich der kritischen Temperaturgrenze und die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit bzw. Ermüdung des Klebstoffs.

## Versuchsreihe 4 – Brandversuche an Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen

### Versuchsreihe 4 – Materialien

Innerhalb der Versuchsreihe wurden vier Brandversuche an Prüfkörpern mit eingeklebten Gewindestangen und mechanischer Beanspruchung (Kriechversuche) durchgeführt. Diese wurden thermisch mit der ETK belastet. Bei den Prüfkörpern wurde der Gewindestangedurchmesser, der Klebstofftyp und die Anzahl der in einen Prüfkörper geklebten Gewindestangen variiert. Das mechanische Belastungsniveau basierte auf den Kaltversuchen der Versuchsreihe 3 bei Raumtemperatur. Zusätzlich wurden vier weitere Referenzversuchskörper im Brandofen platziert, um die Temperatur im Inneren der Prüfkörper während der Versuche zu bestimmen.

Die Prüfkörper wurden aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 h hergestellt. Vor dem Verkleben der Gewindestangen wurde das Holz mindestens 4 Wochen lang unter normalen Klimabedingungen (20 °C / 65 % r. F.) gelagert, bis der Gleichgewichtsfeuchtegehalt erreicht war.

Für die Verklebung der Gewindestangen wurden zwei verschiedene Klebstoffsysteme verwendet:

- 2K-EP (Klebstoff 1)
- 2K-PUR (Klebstoff 2)

Die Holzprüfkörper hatten eine mittlere Dichte von 448 kg/m<sup>3</sup> mit einer Standardabweichung von 6,4 %. Die Darrproben ergaben einen Feuchtegehalt von 13,1 %.

Es wurden metrische Gewindestangen mit der Festigkeitsklasse 8.8 verwendet, so dass sichergestellt werden konnte, dass das Versagen der Verbindung nicht in der Stahlstange stattfindet.

### Versuchsreihe 4 – Prüfkonfiguration

Die Querschnitte der Versuchsreihe 4 wurden auf der Grundlage einer numerischen Analyse mit den Parametern und Ergebnissen der Versuchsreihen 2 (Brandversuche ohne mechanische Belastung) und 3 (Temperaturkriechversuche) geplant. In der Versuchsreihe 3 wurde für beide Klebstoffe eine kritische Temperaturgrenze von 69 °C für Klebstoff 1 und 79 °C für Klebstoff 2 festgelegt, die nicht überschritten werden sollte, um die Tragfähigkeit der Verbindung zu gewährleisten. Auf der Grundlage der in Arbeitspaket 2 beschriebenen numerischen Parameterstudien und diesen Grenzwerten wurde die notwendige Holzüberdeckung berechnet, um eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten zu gewährleisten (s. Tabelle 2). Der Aufbau des Prüfofens wird in Anhang D.1 dargestellt.

**Tabelle 2: Übersicht Prüfkörperaufbau in Versuchsreihe 4**

Prüfkörpernummer	Klebstofftyp	Gewindestangendurchmesser [mm]	Einbindelänge [mm]	Querschnitt [mm x mm]
1	1	12	162	120 x 120
2	2	12	162	100 x 100
3	1	4 * 12	162	180 x 180
4	1	20	150	120 x 120

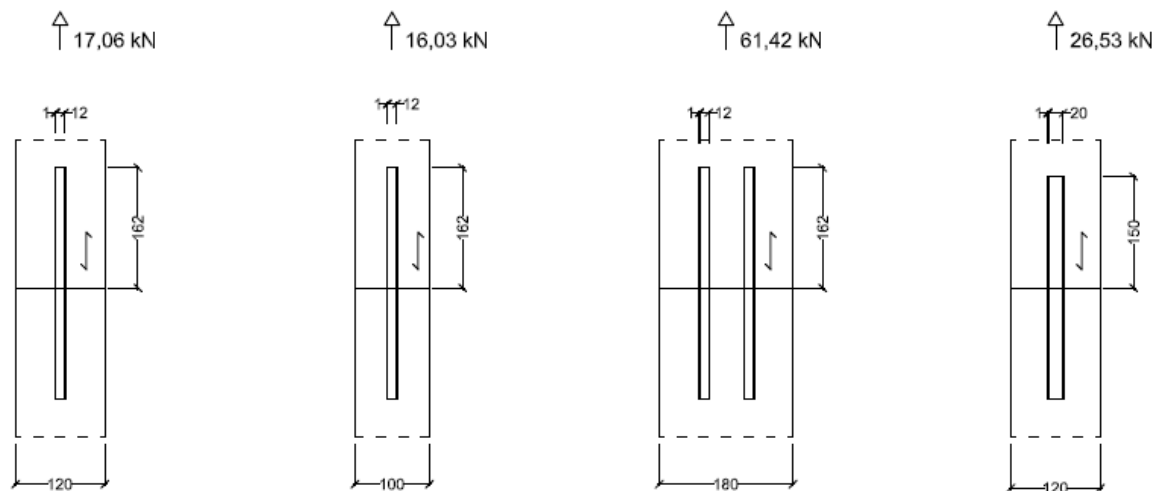
Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte nach dem gleichen Verfahren wie bei der Versuchsreihe 3. Ein Prüfkörper wurde aus zwei BSH-Balken mit den spezifischen Querschnitten hergestellt. Die Länge betrug 1000 mm für jede Hälfte. Die beiden Hälften wurden mit einem eingeklebten Gewindestange mit der gleichen Einbindelänge auf beiden Seiten von 162 mm für den Gewindestangedurchmesser von 12 mm und mit 150 mm für den Gewindestangedurchmesser von 20 mm verbunden (siehe Abbildung 33). Zum Einbringen der Last an beiden Enden des Prüfkörpers wurde eine weitere Gewindestange mit einem Durchmesser von 20 mm mit einer Einbindelänge von 350 mm auf jeder Seite eingeklebt.

SP1

SP2

SP3

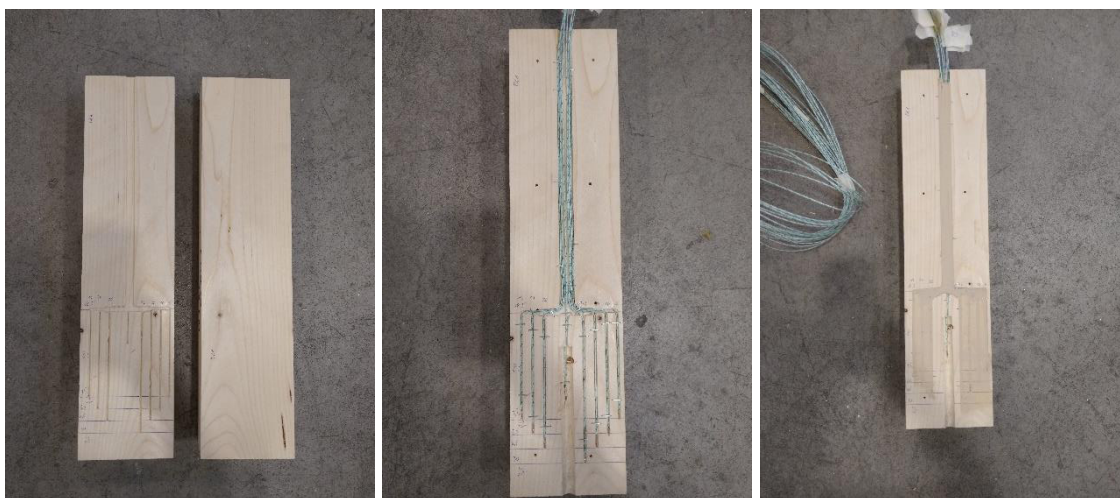
SP4



**Abbildung 33: Skizze und Lasten der Prüfkörper in Versuchsreihe 4**

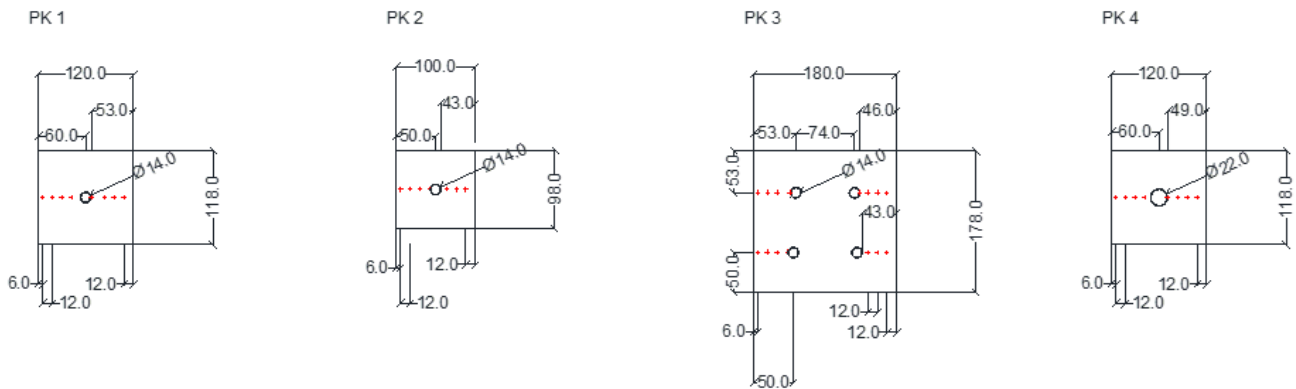
Zur Messung der Temperatur innerhalb der Klebefuge der Gewindestange wurden zwei verschiedene Methoden angewandt. Da die Prüfkörper mechanisch belastet wurden, war es zwingend erforderlich, dass keine Schwächung des Querschnitts oder der Klebefuge auftreten durfte. Daher wurde nur ein Mantelthermoelement senkrecht zur Faserrichtung angebracht, um die Temperatur direkt an der Gewindestange während des Versuchs zu messen. Die Spitze war dabei in Kontakt mit der Gewindestange. Der Draht wurde an der Oberfläche des Prüfkörpers entlanggeführt und mit einem zusätzlichen Gipskartonplattenstreifen abgedeckt, um eine unplanmäßige Wärmeübertragung durch das Mantelthermoelement selbst zu verhindern.

Bei der zweiten Methode wurden strukturell identische Referenzprüfkörper hergestellt. Die Referenzversuche dienen zur Messung der Temperatur in den Tiefen von je 6 mm, 12 mm, 18 mm, 24 mm, 30 mm, 36 mm, 42 mm von der Oberfläche des Prüfkörpers sowie in der Klebefuge mit Hilfe von Thermoelementen des Typs K. Sie wurden aus zwei BSH-Hälften mit einer Länge von je 500 mm hergestellt. Die Referenzprüfkörper wurden während des Versuchs nicht mechanisch belastet. Um die Thermoelemente an den entsprechenden Isothermen zu positionieren, wurden die beiden Prüfkörperhälften mit einer Tischsäge an der Längsseite halbiert (s. Abbildung 34). Das Sägeblatt hatte eine Dicke von 2 mm. Daher waren je zwei Seitenlängen des Prüfkörpers um diese Maße reduziert.



**Abbildung 34: Einbringen der Thermoelemente Typ K in die Referenzprüfkörper**

Im Referenzprüfkörper 3 wurden zwei verschiedene Klebstoffe verwendet. Da Klebstoff 2 eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweist, wurden zwei unterschiedliche Randabstände verwendet. Diese betragen 43 mm für Klebstoff 2 und 46 mm für Klebstoff 1. Die Abmessungen sind in nachfolgender Abbildung 35 dargestellt.



**Abbildung 35: Lage der Thermoelemente Typ K (rot) in den vier Prüfkörpern der Versuchsreihe 4**

Die Versuche wurden unter Kriechkonfiguration mit einer thermischen Belastung geprüft. Dazu wurden die Versuche in die Prüfmaschine eingespannt und mit einer konstanten mechanischen Zugbelastung beaufschlagt. Das Belastungsniveau wurde auf 40 % der mittleren Belastung aus den Referenzversuchen der Versuchsreihe 3.1 festgelegt. Für die Probe mit vier Gewindestangen wurde die Last um 10 % reduziert, wie im 3. Entwurf für EN 1995-1-1 angegeben, da eine gleichmäßige Lastverteilung über alle Gewindestangen aufgrund von Ungenauigkeiten und Abweichungen im Herstellungsprozess der Bohrlöcher nicht gewährleistet werden kann. Die mechanische Belastung wurde bei jedem Versuch mindestens 15 Minuten vor der thermischen Belastung aufgebracht. Als thermische Belastung wurde die Einheits-Temperaturzeitkurve verwendet.

Die Steuerung des Ofens wurde über zwei Thermoplates geregelt die im Abstand von 15 cm der Oberfläche des jeweiligen Prüfkörpers angebracht waren. Die Plates wurden diagonal und in Höhe des Fugenstoßes ausgerichtet.

Zusätzlich wurde ein Mantelthermoelement in der Nähe der Oberfläche jedes Prüf- und Referenzkörpers angebracht, um die Lufttemperatur in der direkten Umgebung zu messen. Diese Werte wurden in der numerischen Simulation als Eingangsgrößen für die thermische Belastung verwendet. Die Referenzprüfkörper befanden sich aufgrund des Prüfstandes nicht auf der gleichen Höhe wie die mechanisch belasteten Prüfkörper, sondern auf einem Podest in 1,0 m Höhe.

Die mechanische Belastung wurde mit einem Hohlkolbenzylinder aufgebracht. Dieser wurde über eine Druckluftzufuhr angesteuert. Während der Versuche kam es zu einem Druckabfall in der hydraulischen Steuerung. Daher musste die aufgebrachte Last manuell nachjustiert werden. Die Abweichung betrug maximal ca. - 0,4 und +0,7 kN. Ziel war es, im Bereich der größeren Last zu bleiben, um auf der sicheren Seite zu sein. Bei steigenden Temperaturen stieg die Verformung an, weshalb die Belastung häufiger nachjustiert werden musste.

Die Verformung des gesamten Prüfkörpers wurde mit zwei Seilzugsensoren gemessen. Sie wurden auf der oberen Querschnittsfläche jedes Prüfkörpers angebracht. Es sollte überprüft werden, ob eine ungleichmäßige Verformung durch eventuelle Schrägstellungen auftritt. Aufgrund des Prüfaufbaus war eine Anbringung für Verformungsmessungen im beflamnten Bereich der Verbindung nicht möglich.

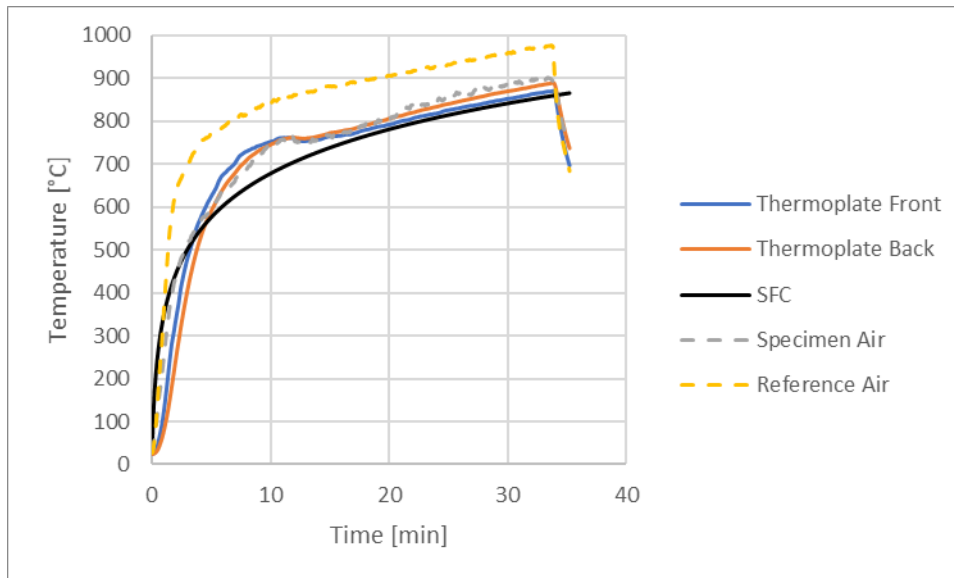
Während der Versuche wurden Endbereiche der Prüfkörper thermisch geschützt, sodass nur die mittleren Bereiche mit Gewindestange einer thermischen Beanspruchung ausgesetzt waren.

## Versuchsreihe 4 - Ergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen die gemessenen Brandraumtemperaturen beispielhaft für Prüfkörper 1. Die Versuchsdauer wird auf die horizontale Achse projiziert. Auf der vertikalen Achse ist die Temperatur dargestellt. Dabei werden fünf verschiedene Temperaturkurven miteinander verglichen. Die ersten beiden zeigen die Temperaturen der Thermoplates. Zusätzlich wird die ETK als Zielkurve (Standard Fire Curve SFC) dargestellt. Die gestrichelten Kurven zeigen die gemessene Lufttemperatur an der Oberfläche der Prüf- und Referenzprüfkörper.

Für Versuch 1 zeigen die durch die Thermoplates aufgezeichneten Daten eine geringfügige Abweichung innerhalb der Grenzwerte der Norm EN 1363-1 [47]. Diese liegen nach ca. fünf Minuten stets über den Werten der ETK. Die Brandraumtemperatur am Referenzprüfkörper zeigt erwartungsgemäß höhere Werte. Im Bereich des mechanisch belasteten Prüfkörpers wurden dazu vergleichsweise niedrigere Temperaturen aufgezeichnet, da die Luftzirkulation durch den massiven Prüfrahmern behindert wurde (s. Abbildung 36). Die Übersicht der anderen Prüfkörper wird im Anhang D.2 wiedergegeben.





**Abbildung 36: Lufttemperatur im Brandversuch für Prüfkörper 1**

Alle Versuche zeigten höhere Temperaturen an den Oberflächen als an den Thermoplates. Vor allem zu Beginn der Versuche reagieren die Thermoplates langsamer auf die Temperaturänderungen im Brandofen. Aus diesem Grund wurden die Werte der Mantelthermoelemente für die numerische Simulation verwendet, da diese die reale Temperaturbelastung der Oberfläche besser wiedergeben.

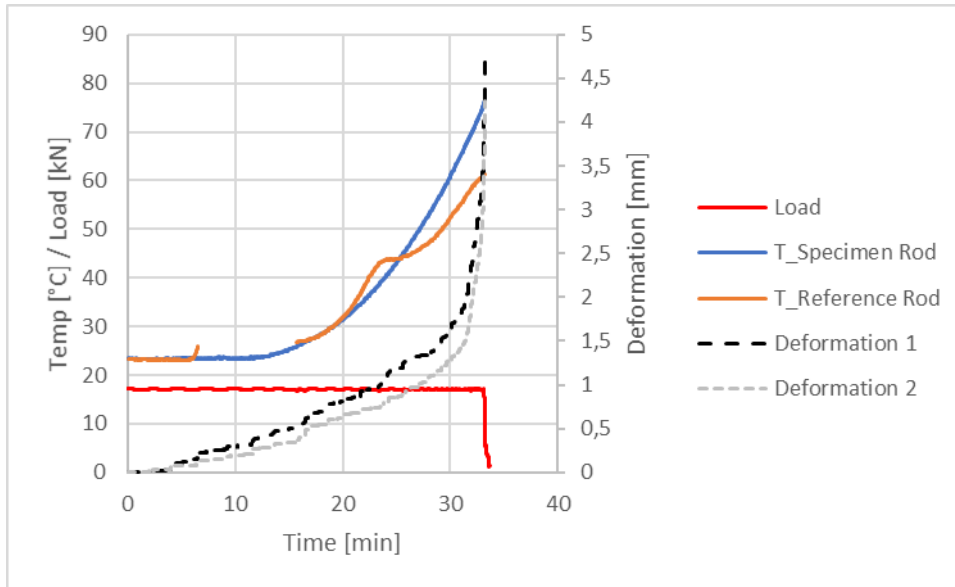
Durch die zum Prüfkörper abweichende Positionierung (tiefer im Brandofen) der Referenzprüfkörper im Brandofen, wurden in allen Versuchen höhere Temperaturen erreicht.

Die Messungen zeigten für alle Referenzversuche ähnliche Temperaturkurven, bis die Temperatur von 100 °C erreicht wurde. Danach sind aufgrund des ungleichmäßigen Abbrands und der daraus resultierenden unterschiedlichen Dicke der Holzkohleschicht größere Abweichungen zu erkennen. Prüfkörper 1 weist dabei in den meisten Fällen höhere Temperaturen auf als die anderen Prüfkörper, da bei diesem nahe der Oberfläche die vergleichsweise höchsten Lufttemperaturen gemessen wurden. Eine nachträgliche Beurteilung der Prüfkörper war aufgrund des Versuchsablaufs mit vollständiger Auskühlung des Brandofens vor der Öffnung nicht möglich.

Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 37) wird beispielhaft die Versagenszeit sowie die Temperaturen der Gewindestange des Prüfkörpers 1 dargestellt. Außerdem werden die Kurven der Gesamtverformung gegeben. Aus diesen Diagrammen wurden die Versagenstemperaturen der einzelnen Gewindestangen abgeleitet. Das Versagen wurde erreicht, wenn die mechanische Belastung nicht mehr auf dem gleichen Niveau gehalten werden konnte und daher abrupt abfiel. Der Zeitpunkt, an dem eine erhöhte Verformung auftrat, wurde erreicht, wenn eine Änderung der Steigung sichtbar war oder die Lastaufbringung aufgrund der zunehmenden Verformung mehr als dreimal pro Minute nachjustiert werden musste.

Für Prüfkörper 1 wurde eine Versagenstemperatur von 74,9 °C gemessen. Der Zeitpunkt des Versagens wurde nach 33 Minuten erreicht. Die Temperaturkurven der Gewindestangen des Prüfkörpers und des Referenzprüfkörpers liegen dabei gegenläufig zu den gemessenen Lufttemperaturen. Hier traten wie bereits erwähnt am Referenzprüfkörper aufgrund seiner Positionierung stets höhere Temperaturen auf. Aus diesem Grund wurde ein schnellerer Temperaturanstieg in der Gewindestange des Referenzprüfkörpers erwartet. Die Abweichungen in der Temperaturentwicklung sind auf das ungleichmäßige Abbrandverhalten des Holzes aufgrund seiner anisotropen Eigenschaften zurückzuführen. Im Allgemeinen zeigen die Temperaturkurven jedoch für alle Prüfkörper ähnliche Verläufe.

Zum Versagenszeitpunkt trat ein Unterschied von ca. 14 °C auf. Die Verformungskurven zeigen einen linearen Anstieg, bis die Temperatur von 67 °C nach einer Brandeinwirkung von ca. 31,5 Minuten erreicht wurde. Danach erhöht sich die Steigung abrupt. In diesem Zeitfenster musste die Zugbelastung wegen der zunehmenden Kriechverformung der Verbindung häufiger nachkalibriert werden. Die restlichen Last- / Temperatur- / Verformungskurven der Prüfkörper werden im Anhang D.3 dargestellt.



**Abbildung 37: Last / Temperatur / Verformungskurven für Prüfkörper 1**

In Prüfkörper 3 wurden vier Gewindestangen verklebt. Eine wies beim Versagen dabei deutlich höhere Temperaturen auf als die anderen Gewindestangen. Bei zwei der Gewindestangen wurde die kritische Temperaturgrenze außerdem nicht erreicht. Daher wird angenommen, dass der Klebstoff bei den höheren Temperaturen fast keine Tragfähigkeit aufwies, da die Tragfähigkeit mit steigenden Temperaturen in der Klebefuge abnimmt. Die mechanische Belastung wurde daher auf die anderen drei Gewindestangen umverteilt, was zu einem früheren Versagen der anderen beiden Stangen führte, da ihre Auslastung dadurch früher überschritten wurde.

Die Prüfkörper versagten alle nach der bemessenen Zeit von 30 Minuten. Die einzelnen Versagenstemperaturen an der Gewindestange für die jeweiligen Prüf- und Referenzprüfkörper werden in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Versagens- und Verformungstemperaturen an der Gewindestange in Versuchsreihe 4**

Prüfkörper	Versagenszeit	Versagenstemp. Test		Verformung	
		Prüfkörper	Referenz	Start	Temperatur
	[min]	[°C]	[°C]	[min]	[°C]
SP1	33	74,9	60,8	31,5	67,6
SP2	34,2	106,9	101,3	28	77,1
SP3	32,1	63,5	56,5	28,5	55,7
		61,7	59,8		53,6
		109	70,9		91,8
		75,4	59,1		67,9
SP4	30,1	68,2	85,1	27	63,8



## Arbeitspaket 2: Brandschutztechnische Bemessungsregeln für Ingenieurholzbauprodukte und -systeme

### Numerische Simulation

#### Materialparameter

Die thermisch belasteten Versuche der Versuchsreihen 2 - 4 wurden mit Hilfe der Software Ansys Workbench numerisch simuliert. Dabei kamen sowohl zweidimensionale und dreidimensionale Modelle zum Einsatz.

Die Temperaturbeanspruchung wird gemäß der Einheits-Temperaturzeitkurve auf das System aufgebracht. Die Wärmeübertragung auf den simulierten Probekörper erfolgt durch Strahlung und Konvektion auf der dem Feuer zugewandten (exponierten) Seite.

Die Probekörper der Prüfreihe 2.1 und 2.2 werden nur von einer Seite dem Feuer ausgesetzt. Die Temperatur der abgewandten Seite wird entsprechend der Umgebungstemperatur auf 25 °C definiert.

Der Wärmeübergang durch Strahlung oder Konvektion hängt von der Umgebungstemperatur und dem Emissionsgrad (Strahlung) bzw. dem Wärmedurchgangskoeffizienten (Konvektion) ab. Die im Modell verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4: Thermische Parameter in Simulation**

Wärmeübertragung	Brandzugewandt	Brandabgewandt
Konvektion $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	25,0	4,0
Strahlung $\epsilon$	0,8	0,8

Zur Beschreibung der Wärmeleitung im Holz kamen die in Tabelle 5 angegebenen Materialkennwerte basierend auf [32, 48] zur Anwendung.

**Tabelle 5: Materialparameter für Holz in Versuchsreihe 2**

Temperatur r [°C]	$\rho/\rho_{20}$	Dichte $\rho$			Wärmeleitfähigkeit (quer) $\lambda_{\perp}$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit (parallel) $\lambda_{\parallel}$ [W/mK]	Spezifische Wärmekapazität c [J/kgK]
		V2.1	V2.2	V2.3			
20	1,06	435,1	430,9	452,2	0,12	0,24	1790
100	1,06	435,1	430,9	452,2	0,3	0,6	1790
110	1,03	422,8	418,7	439,4	0,23	0,46	30796
120	1	410,4	406,5	426,6	0,15	0,3	1790
200	1	410,4	406,5	426,6	0,18	0,36	1790
275	0,62	254,5	252,0	264,5	0,14	0,28	6173
350	0,24	98,5	97,6	102,4	0,09	0,18	690
500	0,22	90,3	89,4	93,8	0,11	0,44	690
800	0,18	73,9	73,2	76,8	0,35	1,4	690
1200	0,12	49,3	48,8	51,2	2	8	690

In Versuchsreihe 2.2 wurden Gipskartonplatten zum Schutz der Gewindestangen vor einer thermischen Beanspruchung angebracht. Die in der Simulation genutzten Materialkennwerte werden in nachfolgender Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Materialparameter für Gipskartonplatten in Versuchsreihe 2 [48]**

Temperatur [°C]	Dichte $\rho$		Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	Spezifische Wärmekapazität c [J/kgK]
	$\rho/\rho_{20}$	[kg/m <sup>3</sup> ]		
20	100	870	0,4	960
70	100	870	0,4	960
100	100	870	0,27	960

<b>130</b>	92,6	805,6	0,13	14915
<b>140</b>	90,2	784,7	0,13	25207
<b>150</b>	87,7	763,0	0,13	21764
<b>170</b>	82,8	720,4	0,13	960
<b>600</b>	82,7	719,5	0,13	960
<b>720</b>	78,6	683,8	0,33	4359
<b>750</b>	77,6	675,1	0,38	960
<b>1000</b>	77,6	675,1	0,8	960
<b>1200</b>	77,6	675,1	2,37	960

Bezüglich der Materialkennwerte der Gewindestange wurde auf die Werte der EN 1993-1-2 zurückgegriffen (s. Tabelle 7).

**Tabelle 7: Materialparameter für Stahl [49]**

<b>Temperatur</b>	<b>Spezifische Wärmekapazität c</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></b>
[°C]	[J/kgK]	[°C]	[W/mK]
20	439,8	20	53,3
599	758,8	799	27,4
600	760,2	800	27,3
650	813,8	1200	27,3
700	1008,2		
734	3916,5		
735	5000		
800	803,3		
899	651,1		
900	650		
1200	650		

Für Klebstoffe gibt es in der Fachliteratur oder durch Hersteller kaum Angaben zu ihren thermischen Materialkennwerten. Die verschiedenen Hersteller geben an, dass die Parameter im Allgemeinen nicht erforderlich sind. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass Klebeverbindungen in der Regel so dünn sind, dass ihr Einfluss auf die Temperaturentwicklung in Bauteilen nur unwesentlich gering ist. Daher gibt es auch keine Informationen über das Hochtemperaturverhalten von Klebstoffen. Der Einfachheit halber wurde die Annahme getroffen, dass der Klebstoff seine Eigenschaften über das gesamte Temperaturprofil beibehält. Um den Einfluss des Klebstoffs innerhalb der Simulationsergebnisse zu untersuchen, wurden drei verschiedene Klebstoffe bei Klebstofffugendicken von 1 mm und 3 mm sowie einer Simulationszeit von 30 Minuten verwendet. Es zeigt sich, dass die Materialparameter mit zunehmender Fugendicke einen größeren Einfluss auf die Temperaturentwicklung in der Klebefuge haben. Bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit wirkt der Klebstoff wärmeisolierend, weshalb hier bei Brand von außen die vergleichsweise niedrigsten Temperaturen an der Gewindestange und die vergleichsweise höchsten Temperaturen am Bohrlochrand berechnet werden. Insgesamt ergaben sich für die Klebstoffe mit den wärmeleitfähigsten sowie wärmeleitfähigsten Eigenschaften in der Endtemperatur Unterschiede von 2 % für kleine Klebstofffugendicken und 6 % für die größeren Fugendicken.

Unter den gewählten Randbedingungen zeigen die Simulationen auch, dass bei Temperaturen im kritischen Temperaturbereich der Klebstoffe zwischen 60 °C und 80 °C die Unterschiede zwischen den einzelnen Klebstofffugendicken vernachlässigbar klein sind. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Klebstofffugendicke nur einen geringfügigen Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat.

Final wurde mit den Klebstoffwerten gerechnet, der die ähnlichsten Dichteigenschaften aufwies, da dieser Kennwert bei allen Klebstoffen bekannt war. Dabei wurden die jeweiligen Dichten der verwendeten Klebstoffe eingesetzt. Die Kennwerte wurden dabei als nicht temperaturabhängig angenommen. Die Materialparameter befinden sich in nachfolgender Tabelle 8.

**Tabelle 8: Materialparameter für Klebstoff**

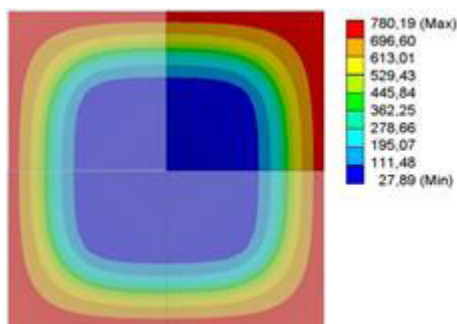
	Dichte $\rho$	Wärmeleitfähigkeit (quer) $\lambda$	Spezifische Wärmekapazität $c$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]
<b>Klebstoff 1</b>	1111	0,283	1268
<b>Klebstoff 2</b>	1350	0,283	1268

**Sensitivitätsanalyse**

Zu Beginn wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkung einzelner Parameter auf das Berechnungsergebnis abschätzen zu können. Diese betrafen unter anderem:

- Die Netzweite
- Die Dimension
- Die Materialien
- Die Vernetzungsqualität

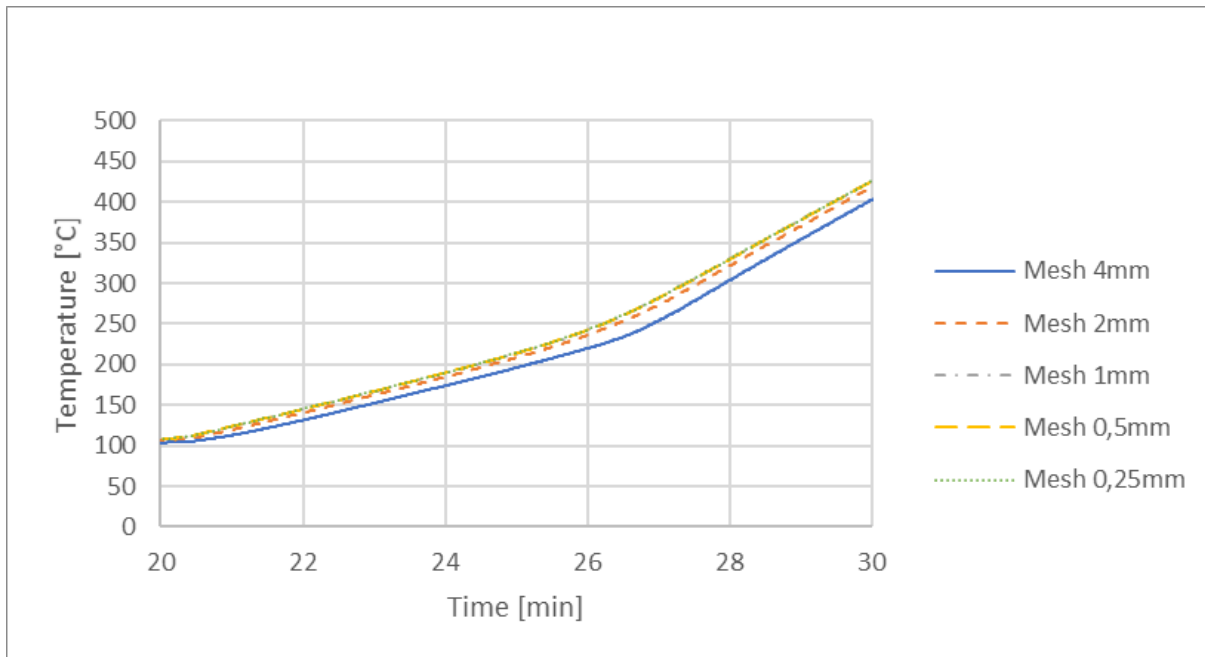
Die Empfindlichkeit des Modells wurde zu Beginn mit den Prüfkörpern der Versuchsreihe 2.3 analysiert. Diese wurden mit der Einheits-Temperaturzeitkurve beansprucht. Im Simulationsmodell wurde ein thermisch transienter Ansatz verwendet, um die zeitabhängige Temperaturänderung in den Prüfkörpern zu berücksichtigen. Zur Simulation des Prüfkörpers im zweidimensionalen Modell wurde aufgrund der Symmetrie ein Viertelquerschnitt verwendet, um die Rechenzeit zu reduzieren (s. Abbildung 38).



**Abbildung 38: Symmetrieeffekt zur Reduzierung der Rechenzeit**

Zu Beginn wurde der gesamte Querschnitt aus einem Material modelliert. Nach Aufbringen der thermischen Belastung wurde die Netzweite der quadratischen Elemente zwischen 0,25 mm und 4 mm variiert. Messpunkt bzw. Zieltemperatur war der geplante Bohrlochrand am Übergang von Holz und Klebstoff eines Prüfkörpers. Die Ergebnisse werden in Abbildung 39 dargestellt. Die Simulationszeit wurde auf 30 Minuten festgelegt. Zur besseren Übersicht wird jedoch nur ein Ausschnitt von 10 Minuten gezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass eine Elementgröße von 4 mm vergleichsweise geringere Werte ergibt.

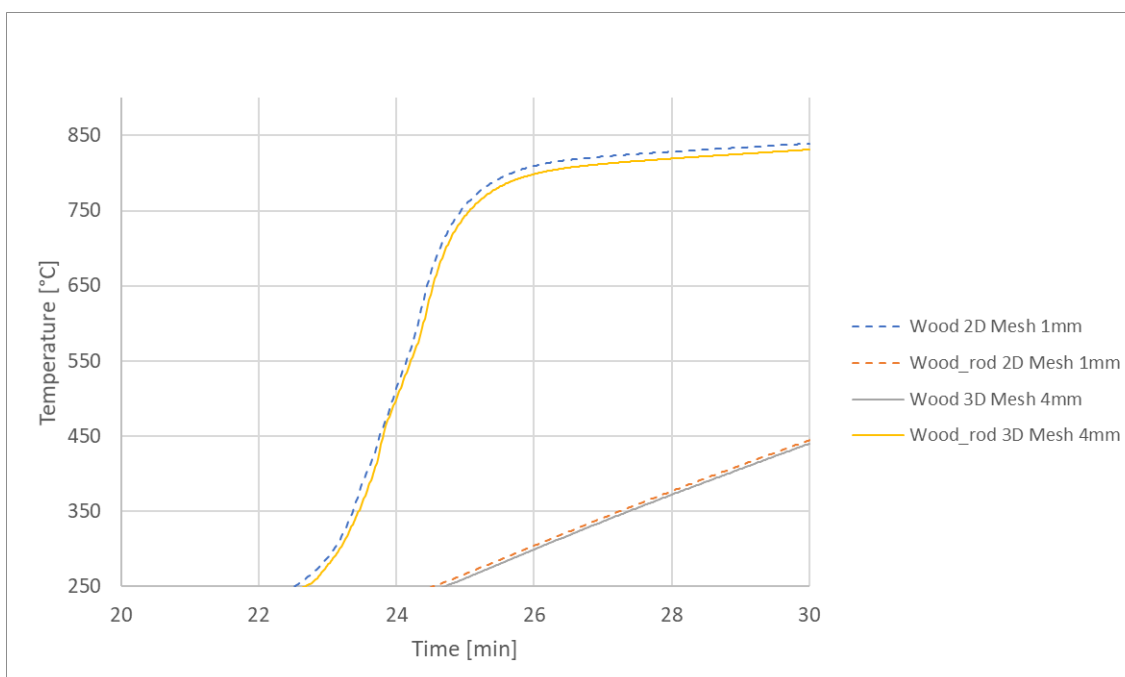
Je feiner die Vernetzung, desto geringer werden die Abweichungen der einzelnen Kurven. Die Abweichungen für 1 mm große Elemente lagen am Ende der Simulation unter 1 % gegenüber den Elementen mit 0,25 mm großen Elementen. Daher wurden für die zweidimensionalen Modelle 1 mm große Netzweiten als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit verwendet.



**Abbildung 39: Einfluss der Netzweite auf die Temperaturentwicklung an der gleichen Messstelle für einen Holzquerschnitt bei 2D-Simulation**

In den weiteren Untersuchungen war zu erkennen, dass im 3-dimensionalen Modell eine Maschenweite von nur 4 mm zu ähnlichen Ergebnissen führt. Da eine weitere Verkleinerung der Maschenweite im dreidimensionalen Modell zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit um mehr als 100% führt, wurde eine Maschenweite von 4 mm für die Berechnung verwendet.

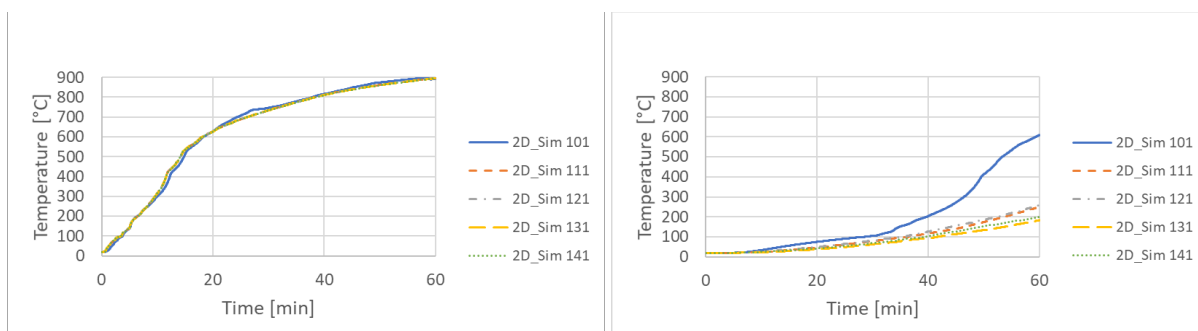
Im nächsten Schritt wurden die Materialien Klebstoff und Stahl in das Modell implementiert und die Temperaturverläufe neu berechnet. Das Modell wurde für die beiden in der Versuchsreihe 2.3 verwendeten Querschnitte von 60 mm x 60 mm und 100 mm x 100 mm erstellt. Die Stangendurchmesser betragen 12 mm bzw. 20 mm. In Abbildung 40 ist das Ergebnis für den kleineren Querschnitt als Beispiel dargestellt. Die Temperatur-Zeit-Kurven mit eingeklebten Gewindestangen (Wood\_rod) zeigen eine langsamere Wärmeentwicklung als bei einem Vollholzquerschnitt. Es zeigt sich auch, dass die beiden gewählten Netzweiten von 1 mm im zweidimensionalen Modell und 4 mm im dreidimensionalen Modell zu nahezu gleichen Temperaturen führen.



**Abbildung 40: Einfluss der Netzweite auf die Temperaturentwicklung für ein zwei- und dreidimensionales Modell für einen Holzquerschnitt sowie für einen Querschnitt mit eingeklebter Gewindestange**

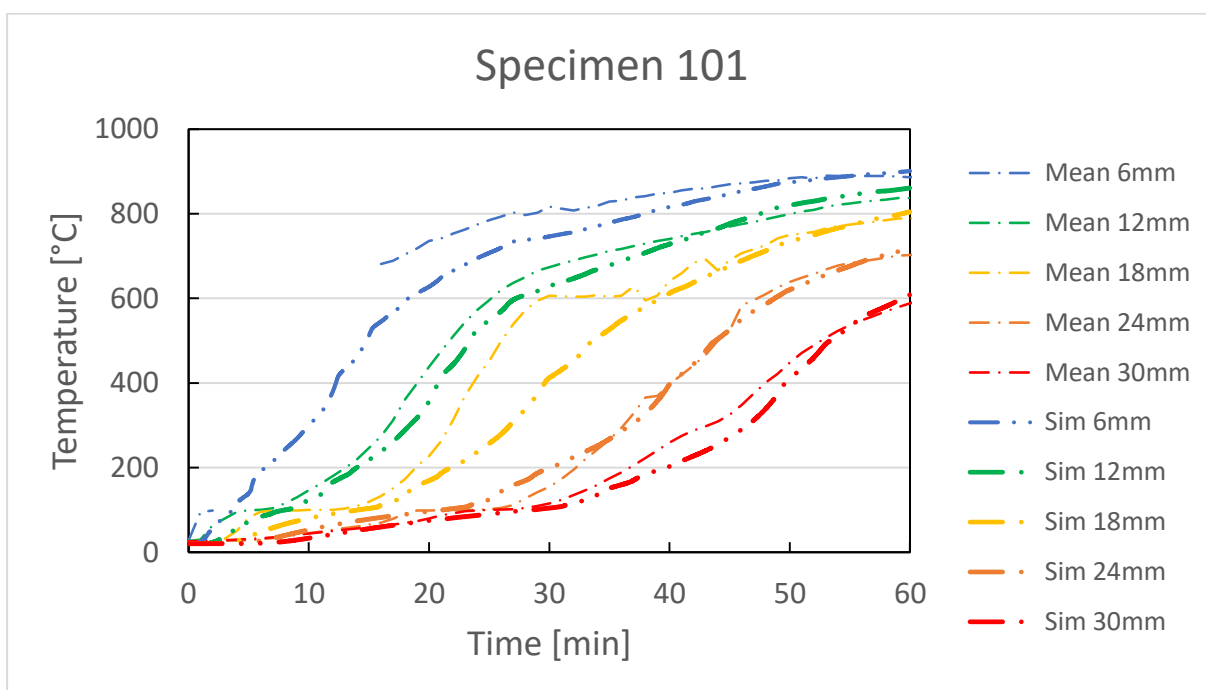
## Parameterstudie

Der Kühleffekt durch die Gewindestange wird auch in den Simulationen der einzelnen Prüfreiheiten sichtbar. Abbildung 41 zeigt die Temperaturen aller 5 Prüfkörper für Versuchsreihe 2.1 mit eingeklebten Gewindestangen längs zur Faserrichtung. Die Messtiefe liegt zwischen 6 mm und 30 mm von der dem Feuer zugewandten Seite. Hier ist zu erkennen, dass es bei der geringen Messtiefe von 6 mm kaum Abweichungen gibt. Bei einer größeren Tiefe von 30 mm (Position des Bohrlochrandes) zeigen die Prüfkörper mit eingeklebten Gewindestangen niedrigere Temperaturen als bei dem Referenzprüfkörper ohne Gewindestange (PK 101). Man sieht auch, dass die Prüfkörper mit dem größeren Gewindestangedurchmesser von 20 mm (131 und 141) kühlere Temperaturen aufweisen. Hier liefert auch die Klebstoffugendicke von 1 mm geringere Werte, da durch die gleichen Querschnitte der Prüfkörper eine größere Holzüberdeckung vorliegt, die die Gewindestange entsprechend länger abschirmt.



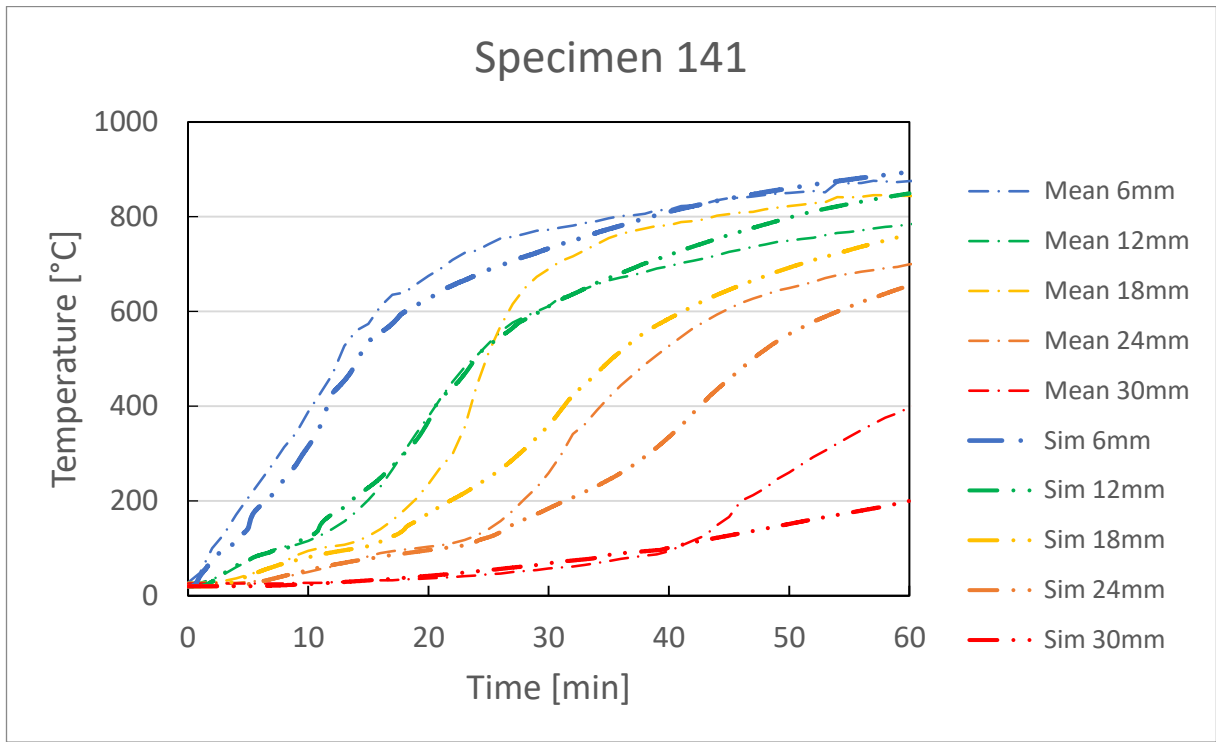
**Abbildung 41: Simulationskurven für die fünf Prüfkörper der Versuchsreihe 2.1 in den Tiefen 6 mm (links) und 30 mm (rechts)**

Die Simulationsergebnisse wurden im Anschluss mit den realen Messergebnissen verglichen (siehe Abbildung 42). Es werden die mittleren Messergebnisse aus den Versuchen dargestellt. Für den Prüfkörper 101 ohne Gewindestangen stimmen die gemessenen Werte gut mit den Simulationsergebnissen überein. Die Simulation liefert meist etwas niedrigere Werte, insbesondere bei den Messungen in 6 mm und 18 mm Tiefe. Hier wurden im Versuch höhere Abbrandraten ermittelt. Die Kurven für alle Prüfkörper werden im Anhang E.1 dargestellt.



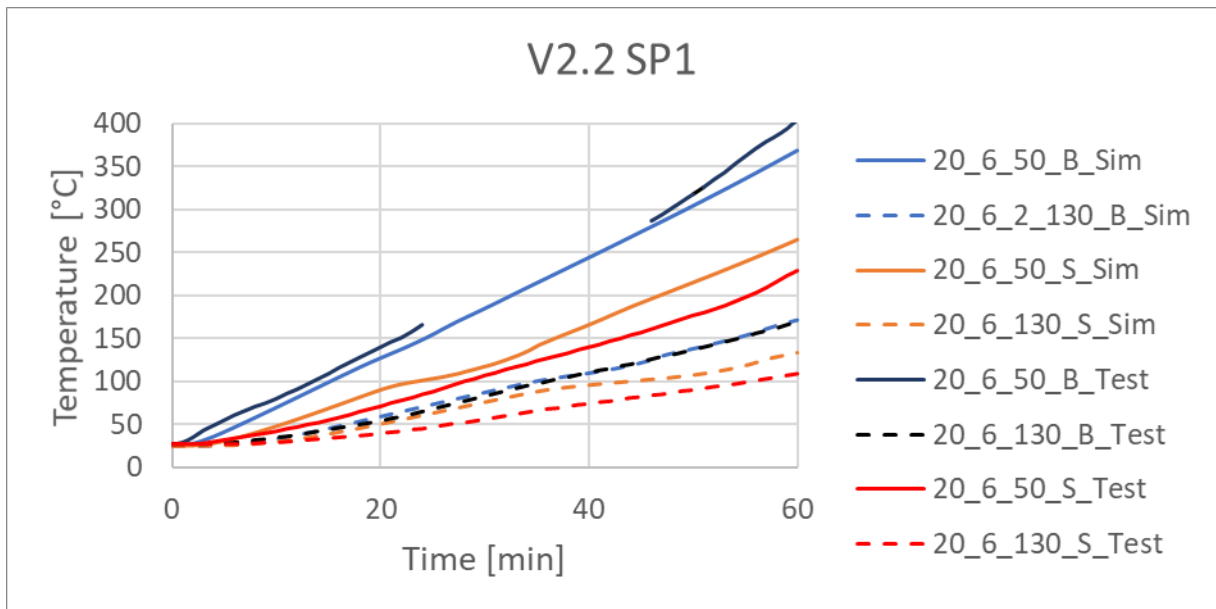
**Abbildung 42: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 101 der Versuchsreihe 2.1**

Der Prüfkörper 141 hatte eine M20-Gewindestange mit 3 mm Klebstoffugendicke (siehe Abbildung 43). Für die Messtiefen von 6 mm und 12 mm liegen die Simulationsergebnisse nahe bei den gemessenen Werten. Größere Abweichungen werden für die entsprechend zunehmenden Messtiefen festgestellt, was mit dem erhöhten Einbrand auf der Höhe der Messpunkte zusammenhängen könnte. Am Bohrlochrand konnte die simulierte Kühlwirkung nicht endgültig durch die Versuche bestätigt werden.



**Abbildung 43: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 141 der Versuchsreihe 2.1**

In Versuchsreihe 2.2 wurde mit den gewählten Materialparametern eine gute Übereinstimmung mit den Prüfergebnissen erreicht. In Abbildung 44 ist der Vergleich der Simulations- und Versuchsergebnisse von Prüfkörper 1 ohne brandschutztechnische Bekleidung beispielhaft dargestellt. Die Gewindestange hatte einen Durchmesser von 20 mm und eine Klebstofffugendicke von 3 mm. Die Messpunkte befanden sich entweder am Bohrloch (B) oder an der Gewindestange aus Stahl (S). Die Messtiefen lagen in einer Tiefe von 50 mm und 130 mm von der dem Feuer zugewandten Seite. In diesem Fall liegen die simulierten Kurven für die Gewindestange in einem konservativeren Bereich, während die Werte am Bohrloch leicht unter den Versuchsergebnissen liegen.



**Abbildung 44: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen und der Simulation für Prüfkörper 1 der Versuchsreihe 2.2**

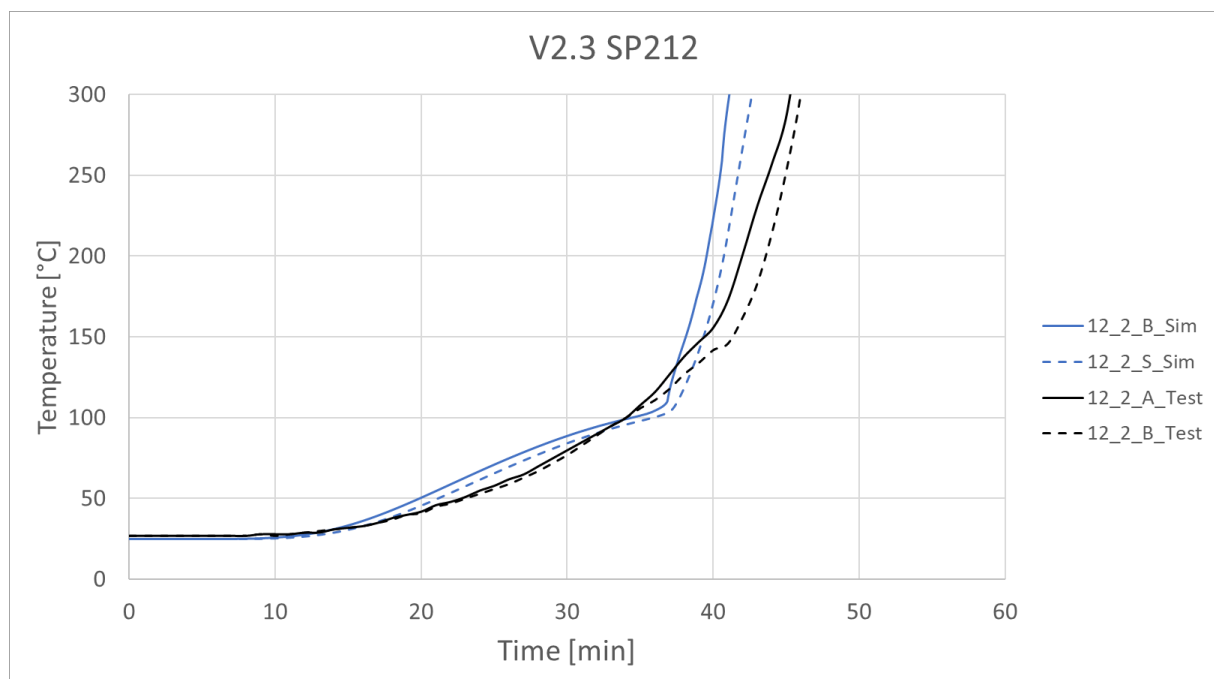
Beim Prüfkörper 7 mit Gipskartonplatten als brandschutztechnische Überdeckung zeigten die Simulationen jedoch zu konservative Ergebnisse. Dabei wurde ein Abfallen der Gipskartonplatte nach 25 Minuten mit Hilfe einer Ekill Funktion ausgeführt. Es wird angenommen, dass die Gipskartonplatte aufgrund der geringen Oberfläche des Prüfkörpers während dem Versuch nicht vollständig abgefallen ist, sondern noch teilweise vor der Gewindestange lag, weswegen im Versuch ein niedrigerer Temperaturanstieg zu verzeichnen war.

Um Informationen über die Genauigkeit der Simulation zu erhalten, wurde das Verhältnis der Endtemperaturen (gemessen / simuliert) gebildet. Außerdem wurden die Kurvenintegrale über die Simulationszeit gebildet und ebenfalls in Relation zueinander gesetzt.

Im Mittel sind die Abweichungen für die Endtemperaturen nach 60 Minuten an den Bohrlochrändern um 1 % höher als bei den Versuchen. Größere Abweichungen von 4 % traten bei den direkt an der Gewindestange platzierten Messstellen auf. Insgesamt war die Standardabweichung für die Messstellen auf der dem Feuer zugewandten Seite deutlich höher. Der Grund dafür könnte der ungleichmäßige Abbrand von Holz sein, der einen größeren Einfluss hat, wenn der Messpunkt näher an der brandbeanspruchten Seite liegt. Da auf der brandabgewandten Seite bei fünf Versuchsanordnungen große Einbindelängen von 430 mm vorhanden waren und dort keine Temperaturerhöhungen auftraten, ergab sich eine bessere Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Ergebnissen.

Nach der Simulation wurden die simulierten Ergebnisse mit den Temperaturkurven aus den Tests verglichen. Die Zeit wird auf der x-Achse dargestellt, während die Temperaturen auf der vertikalen Achse abgebildet sind. Da einige der Thermoelemente am SP 211 während des Tests ausfielen, war eine Validierung dieser Ergebnisse schwierig.

Für Versuchsreihe 2.3 mit allseitiger Brandbelastung stimmen die Simulationsergebnisse gut mit den gemessenen Werten aus den Versuchen überein. In Abbildung 45 wird Prüfkörper 212 mit einem Querschnitt von 100 mm x 100 mm und einer M12 Gewindestange dargestellt. Es wurde die Temperatur am Bohrloch (B) sowie an der Gewindestange (S) durch das Simulationsmodell ausgegeben. Die Messpunkte A und B lagen an der Gewindestange in einem Abstand von 50 mm bzw. 120 mm vom Fugenstoß des Prüfkörpers. Im Bereich von 100 °C liegen die Temperaturen aus den Versuchen knapp über den Simulationsergebnissen. Bei den höheren Temperaturen geht die Simulation von einem schnelleren Temperaturanstieg aus. Insbesondere für den Bereich von 60 – 80 °C, in dem der Klebstoff stark an Festigkeit verliert, werden gute Übereinstimmungen mit den gewählten Materialparametern erzielt.



**Abbildung 45: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen und der Simulation für Prüfkörper 1 der Versuchsreihe 2.3**

Die Ergebnisse der einzelnen Testreihen haben gezeigt, dass der Klebstoff die Schwachstelle der Verbindung darstellt, wenn er durch Wärme belastet wird. Dieser sollte eine klebstoffabhängige kritische Temperaturgrenze nicht überschreiten. Aus diesem Grund wird eine Holzüberdeckung empfohlen. Die kritische Temperaturgrenze wurde aus der Versuchsreihe 3 abgeleitet. Mit Hilfe der Simulationsmodelle der Versuchsreihe 2.3 und Parameterstudien wurde überprüft, zu welchem Zeitpunkt diese kritische Temperatur überschritten wird. Auf dieser Grundlage wurden die Prüfkörper für die Versuchsreihe 4 geplant. Die Prüfkörper hatten den gleichen Aufbau wie in der Versuchsreihe 3. Sie wurden unter einer konstanten Zugbelastung allseitig einer Brandbelastung nach ETK ausgesetzt.

Für die nachfolgende Simulation der Brandversuche wurden Gewindestangen mit Durchmessern von 12 mm und 20 mm verwendet. Außerdem wurden die beiden vorhergehenden Klebstoffe verwendet. Für Klebstoff 1 wurde eine kritische Temperaturgrenze von 69 °C und für Klebstoff 2 eine Temperaturgrenze von 79 °C

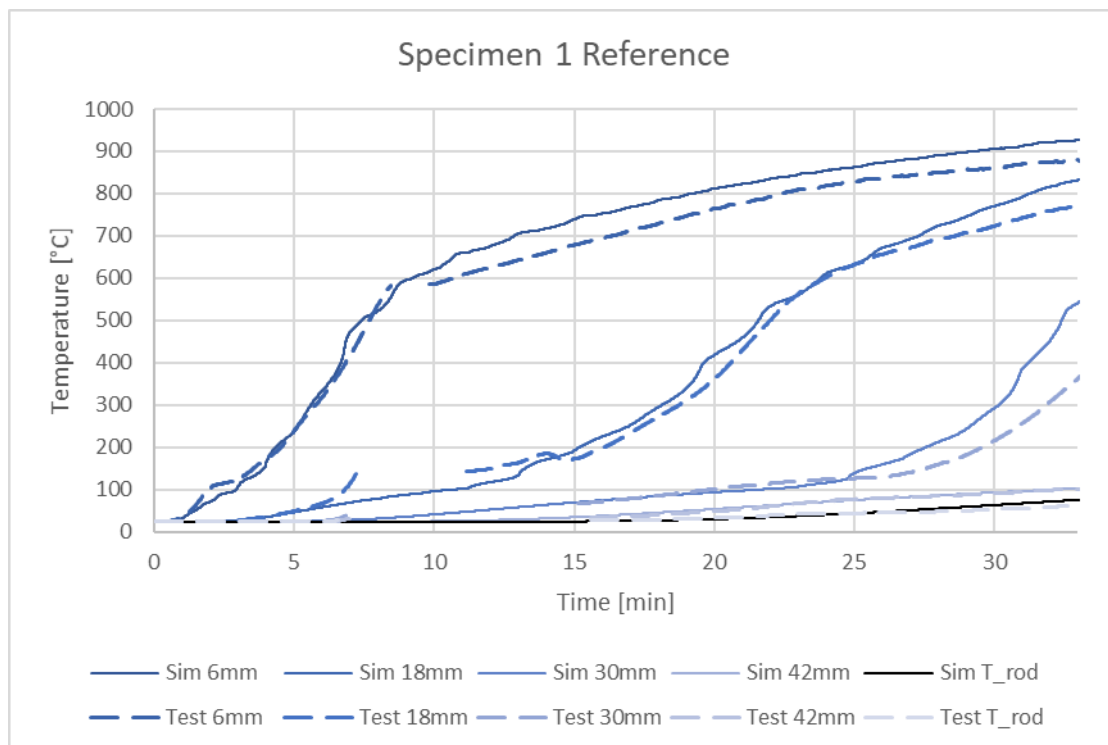


abgeleitet und festgelegt. Die Holzüberdeckung wurde für eine Brandbelastungsdauer von 30 Minuten festgelegt.

Die berechneten Querschnitte wurden für die geprüften Prüfkörper auf die nächsthöhere, in der Praxis verwendete Seitenlänge vergrößert, wodurch die simulierte Mindestholzüberdeckung überschritten wurde und eine Brandeinwirkungsdauer von mehr als 30 Minuten gewährleistet sein sollte.

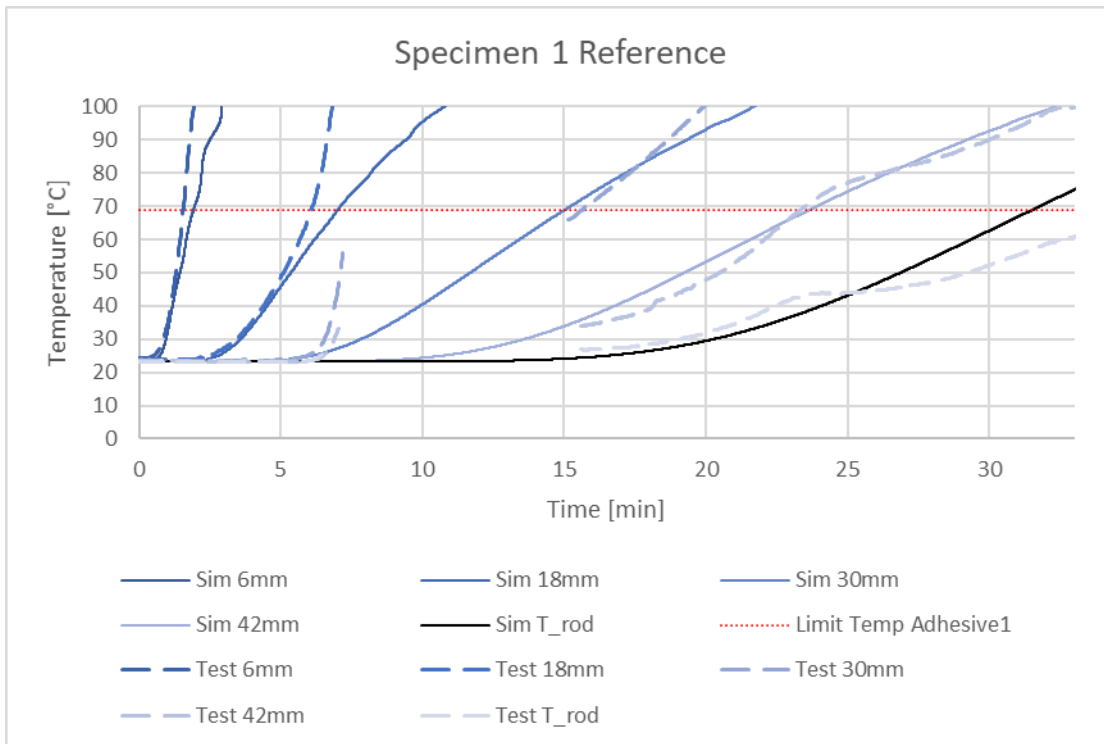
Um die Messergebnisse mit den Simulationen vergleichen zu können, wurden Mantelthermoelemente in der Nähe der Oberfläche des Prüfkörpers und des Referenzprobekörpers angebracht, um die Lufttemperatur zu messen. Diese Werte wurden in der numerischen Simulation als thermische Belastung verwendet, und das Temperaturprofil innerhalb des Prüfkörpers wurde berechnet.

Abbildung 46 zeigt den Temperaturverlauf für den Referenzprobekörper 1 (Referenzprüfkörper waren unbelastet und zusätzlich im Brandversuch integriert). Die gestrichelten Linien stellen die Messwerte aus den Versuchen dar. Die vollständigen Simulationen für alle Messtiefen sind im Anhang E.2 dargestellt. Für den Prüfkörper 1 wird eine gute Übereinstimmung im Temperaturprofil zwischen den Messwerten und der Simulation erreicht. Dabei liegen die Simulationen teilweise auf der sicheren Seite und zeigen größere Werte für die gewählten Eingangsparameter an. Auch bei den anderen Prüfkörpern erreicht die Simulation eine gute Übereinstimmung. Allerdings werden in einigen Fällen der Simulation auch niedrigere Temperaturen erzielt. Zu beachten ist auch, dass die Messwerte im Bereich von ca. 10 - 15 Minuten einen starken Temperaturanstieg aufweisen, der dann wieder auf das erwartete Temperaturniveau abfällt. Der Grund hierfür konnte nicht geklärt werden. Das Messgerät wurde überprüft und zeigte keine Fehler. Auch ein Wechsel der Messkanäle im Gerät brachte keine Verbesserung. Aus diesem Grund wurden die in dieser Zeitspanne aufgezeichneten Temperaturen aus der Darstellung entfernt, bis die Temperatur wieder anstieg.



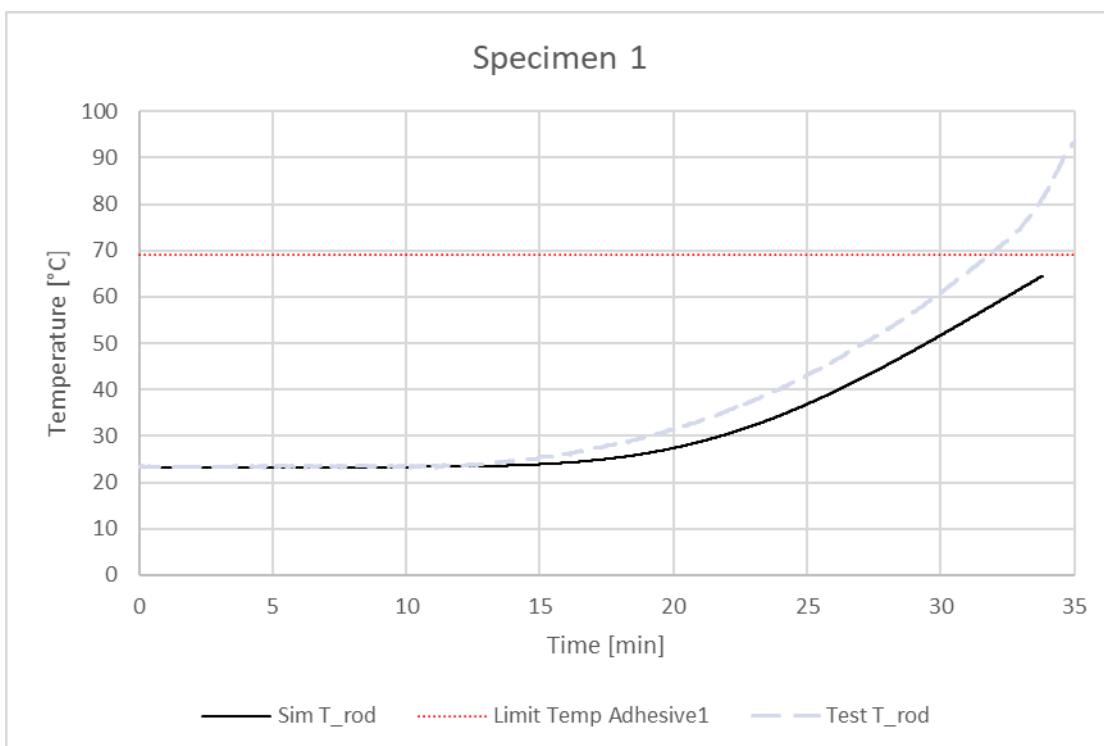
**Abbildung 46: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 1**

Im niedrigen Temperaturbereich der kritischen Klebstofftemperatur zwischen 60 °C und 80 °C sind die Kurven in Abbildung 47 nochmals dargestellt. Insbesondere für die Messpunkte mit größerer Tiefe wird eine gute Übereinstimmung erzielt. Im Bereich der Gewindestange wird durch die Simulation für die Referenzprüfung eine schnellere Wärmeentwicklung vorhergesagt als tatsächlich gemessen wurde. Die Simulation liegt also auf der sicheren Seite.



**Abbildung 47: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 1 im Temperaturbereich von 100 °C**

Für den Prüfkörper 1 zeigt die Messung, dass der kritische Temperaturbereich an der Gewindestange schneller erreicht als in der Simulation (s. Abbildung 48). Nach 30 Minuten liegen die Kurven nur etwa 8 °C auseinander. Die anderen Versuchsreihen haben gezeigt, dass nur wenige Grad Temperaturunterschied ausreichen, um die Klebstofftragfähigkeit stark zu reduzieren.



**Abbildung 48: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Prüfkörper 1 im Temperaturbereich von 100 °C**

Die Versuche haben gezeigt, dass die gewählten Simulationsparameter zu einer guten Korrelation der Temperaturentwicklung eines Prüfkörpers mit eingeklebter Gewindestange führen. Insbesondere bei Temperaturen im Bereich über 100 °C liegen die Simulationsergebnisse meist auf der sicheren Seite. Im Temperaturbereich unter 100 °C kommt es zu steileren Temperaturanstiegen im Realversuch, insbesondere

in den oberflächennahen Bereichen. Hier sind weitere Anpassungen der Materialparameter denkbar, um genauere Ergebnisse zu erzielen.

Im Bereich der Gewindestange wurden zum Teil unterschiedliche Ergebnisse in den Referenzversuchen und den Prüfkörpern im Vergleich zur Simulation erzielt. Die folgenden Temperaturabweichungen der Versuchsergebnisse im Vergleich zu den Simulationsergebnissen nach 30 Minuten sind in Tabelle 9 dargestellt

**Tabelle 9: Temperaturabweichung nach 30 Minuten ETK Brandbelastung zwischen Simulation und Versuchsergebnissen der einzelnen Gewindestangen (GW) in Versuchsreihe 4 (+: Temperatur Messergebnisse > Simulation, -: Temperatur Messergebnisse < Simulation)**

Prüfkörper (belastete Brandversuche)	GW 1	GW 2	GW 3	GW 4
SP1	+10			
SP2	+2			
Sp3	-20	-20	+20	-10
Sp4	0			
<b>Referenz (unbelastete Prüfkörper)</b>				
R1	-10			
R2	-15			
R3	-20	-26	-40	-40
R4	+20			

In den meisten Fällen liegt die Simulation auf der sicheren Seite. Allerdings findet der Festigkeitsverlust des Klebstoffs nur in einem kleinen Temperaturbereich statt. Da die Versuche gezeigt haben, dass die Temperaturentwicklung vor allem vom anisotropen Werkstoff Holz abhängt, sollten zusätzliche Sicherheitsfaktoren eingeplant werden, um ein Überschreiten der kritischen Klebstofftemperaturgrenze zu verhindern. Außerdem stellen die Temperaturmessungen in den Prüfkörpern nur einzelne Punkte dar. Die Temperatur in der Klebstoffuge kann aufgrund der Holzeigenschaften sowie von Ästen und anderen Holzfehlern über die gesamte Einbindelänge unterschiedlich sein. Daher können einige Teile der Verbindung bereits geschwächt sein, während andere Teile noch eine höhere Festigkeit aufweisen.

### Bemessungsmodell

Die Versuche unter mechanischer Belastung haben gezeigt, dass die verwendeten Klebstoffe entscheidend für das Versagen einer Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen unter Temperatureinwirkung sind. Aus diesem Grund sollte die kritische Grenztemperatur des Klebstoffs nicht überschritten werden, um die Tragfähigkeit für die geforderte Feuerwiderstandsdauer zu gewährleisten. Die Idee des analytischen Bemessungsmodells bietet die Möglichkeit, die Temperatur in der Klebstoffuge für verschiedene Bemessungsdauern unter Brandeinwirkung zu bestimmen. Dazu kann die Holzüberdeckung bestimmt werden, die erforderlich ist, um den Klebstoff vor dem Überschreiten der kritischen Temperaturgrenze zu schützen.

Zu diesem Zweck wurden die in [50–54] vorgestellten analytischen Ansätze zur zeitabhängigen Bestimmung der Temperatur in einem Holzbalkenquerschnitt untersucht.

Basierend auf der Validierung mit den Simulationsergebnissen und dem Optimierungsansatz wird die folgende analytische Formel zur Bestimmung der erforderlichen Bohrlochüberdeckung / Seitenlänge vorgeschlagen:

$$T(x) = 20 + (280 \cdot (\beta \cdot t)^\alpha) \cdot \left\{ \left(\frac{1}{x}\right)^\alpha + \left(\frac{1}{(b-x)}\right)^\alpha + \left(\frac{1}{y}\right)^\alpha + \left(\frac{1}{(h-y)}\right)^\alpha \right\} \quad (1)$$

Mit:  $\alpha = 0,4 \cdot t^{0,6}$

Abbrandrate  $\beta_n = 0,7 \left[ \frac{mm}{min} \right]$

Zeit  $t$  [min]

Querschnittsbreite  $b$  [mm]

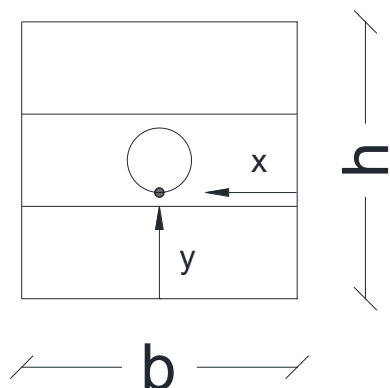
Querschnittshöhe  $h$  [mm]

*Tiefe gemessen von Ursprungsbreite  $x$  [mm]*

*Tiefe gemessen von Ursprungshöhe  $y$  [mm]*

Die Abmessungsvariablen sind in Abbildung 49 dargestellt. Das vorgeschlagene Bemessungsmodell ist für nachfolgende Randbedingungen anwendbar:

- Nadelholz
- Keine freiliegenden Stahlbauteile
- Dicht gestoßene Verbindungsfuge

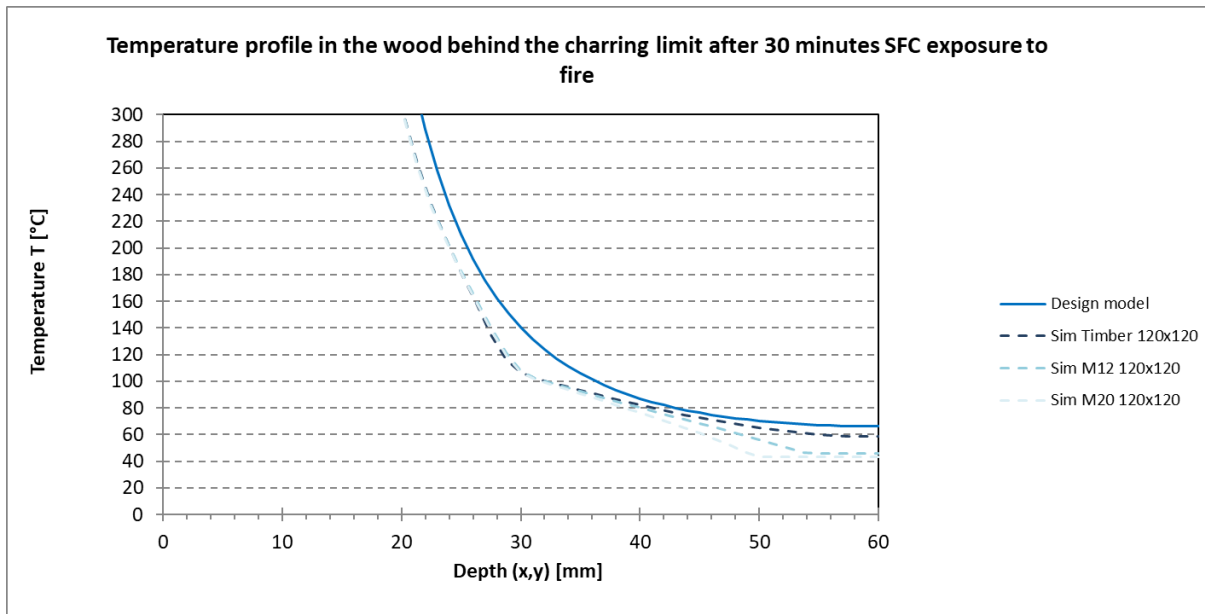


**Abbildung 49: Skizze für das Bemessungsmodell mitallseitiger Brandbelastung**

Mit diesem Berechnungsansatz ist es möglich, die Holzüberdeckung im Verbindungsbereich an die kritische Klebstofftemperaturgrenze anzupassen. Es ist zu beachten, dass die in den Versuchen ermittelte kritische Temperaturgrenze für die verwendeten Klebstoffe nicht allgemein gültig ist. Für andere Klebstoffe wird daher vorerst eine kritische Temperatur von 60°C entsprechend den Anwendungsgrenzen in EN 1995-1-1 empfohlen. [20]

Das nachfolgende Diagramm zeigt einen Vergleich der nach Gleichung (1) berechneten Temperatur und der simulierten Temperatur in einem Bauteil mit entsprechendem quadratischem Querschnitt. Zu Vergleichszwecken wurde eine Simulation für einen Vollholzquerschnitt und mit je einer M12- und M20-Gewindestange durchgeführt. Die Klebstofffugendicke beträgt jeweils 1 mm.

Die Prüfkörper mit einer Seitenlänge von je 120 mm wurden mit einer 30-minütigen ETK beansprucht. Die Temperaturen sind auf der vertikalen Achse aufgetragen (siehe Abbildung 50). Eine Tiefe von 60 mm entspricht genau der Mitte des Querschnitts und zeigt somit die niedrigsten Temperaturen. Die Abbrandgrenze von 300 °C liegt bei einer Tiefe von ca. 24 mm. Das vorgeschlagene Bemessungsmodell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen für einen Vollholzquerschnitt. Die Werte der analytischen Methode sind immer höher als die simulierten Temperaturkurven und liefern etwas konservativere Ergebnisse. In den Versuchen lag die kritische Klebstofftemperaturgrenze zwischen 69 °C und 79 °C. Für diesen Bereich liefert die analytische Berechnung sehr gute Näherungswerte. Bei der Simulation mit eingeklebten Gewindestangen sind im Bereich der Gewindestange Absenkungen des Temperaturniveaus zu erkennen. Diese Unterschiede sind auf die kühlende Wirkung des Stahlstabes in der Simulation zurückzuführen, die jedoch in den Versuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Es wird vermutet, dass der Einfluss der Holzabdeckung einen deutlich höheren Einfluss auf die Klebstofftemperatur hat, weshalb dieser positive Effekt im analytischen Bemessungsansatz auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt wird.



**Abbildung 50: Vergleich der Temperaturentwicklung nach 30 Minuten ETK Beanspruchung für das Bemessungsmodell und das Simulationsmodell**

Tabelle 10 zeigt einen Vergleich der Temperatur der Versuchsergebnisse aus der Versuchsreihe 4 mit den berechneten Ergebnissen aus dem Bemessungsmodell und aus der numerischen Simulation jeweils zum Versagenszeitpunkt. Die entsprechenden Temperaturen stammen von den Messpunkten an der Gewindestange der Einzelversuche und der Referenzversuche.

Für die numerischen Simulationen wurden die Eingangsgrößen variiert. Zusätzlich zur ETK wurden die gemessenen Lufttemperaturen sowohl des Prüfkörpers als thermische Belastung verwendet. Es fällt auf, dass die Temperaturen bei Verwendung der ETK deutlich unter den Versuchsergebnissen liegen. Der Grund dafür ist einerseits das träge Verhalten der Thermoplates sowie die Ofensteuerung, die in den ersten zehn Minuten die Einheits-Temperaturzeitkurve überschreitet. Mit Ausnahme von Gewindestange 3 für Prüfkörper 3 liefert das vorgeschlagene Bemessungsmodell Ergebnisse auf der sicheren Seite. Auch der Prüfkörper 1 überschreitet die berechnete Temperatur um nur 0,1 °C.

Im Vergleich dazu liegen die Berechnungen mit der numerischen Simulation häufiger unter den Versagenstemperaturen im Versuch oder in einem annähernd gleichen Bereich.

**Tabelle 10: Vergleich der Versagenstemperaturen im Versuch mit den Ergebnissen aus dem Bemessungsmodell sowie den numerischen Simulationsergebnissen**

	Zeit		Test		Bemessungsmodell	FEM	
	Versagen	Prüfkörper	Referenz	ETK		Prüfkörper	Referenz
	[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
<b>SP1</b>	33	74,9	60,8	74,8	58,5	61,8	74,9
<b>SP2</b>	34,2	106,9	101,3	130,8	93,3	99,3	103
<b>SP3</b>	32,1	63,5	56,5	100,3*	58,5*	88,9*	90**
		61,7	59,8				
		109	70,9				97,9**
		75,4	59,1				
<b>SP4</b>	30,1	68,2	85,1	74,7	46,1	67,3	66,7

\* Durch die gleiche Holzüberdeckung bei allen vier Gewindestangen des Prüfkörpers 3 ergibt sich für die FEM und die analytische Berechnung nur eine Temperatur

\*\* Die Gewindestangen 3 und 4 des Referenzprüfkörpers 3 hatten aufgrund der höheren kritischen Temperaturgrenze von Klebstoff 2 eine kleinere Holzüberdeckung.

Zur leichteren Beurteilung wurden Nomogramme erstellt, die eine Mindestseitenlänge für quadratische Querschnitte für Branddauern von 30, 60 und 90 Minuten vorschlagen (siehe Abbildung 51, Abbildung 52 und

Abbildung 53). Ein großes Bohrloch benötigt dementsprechend einen größeren Querschnitt bzw. eine größere Seitenlänge des Holzquerschnitts für die gleiche Überdeckung.

Die kritische Klebstofftemperaturgrenze kann dabei frei gewählt werden. Die Versuche ergaben eine Grenztemperatur von 69 °C für Kleber 1 und 79 °C für Kleber 2. Ist die Temperaturgrenze des Klebstoffs nicht bekannt, wird eine Temperatur von 60 °C empfohlen, die sich an den Anwendungsgrenzen der EN 1995-1-1 orientiert. Die Diagramme gelten für eine zentral eingebrachte Gewindestange.

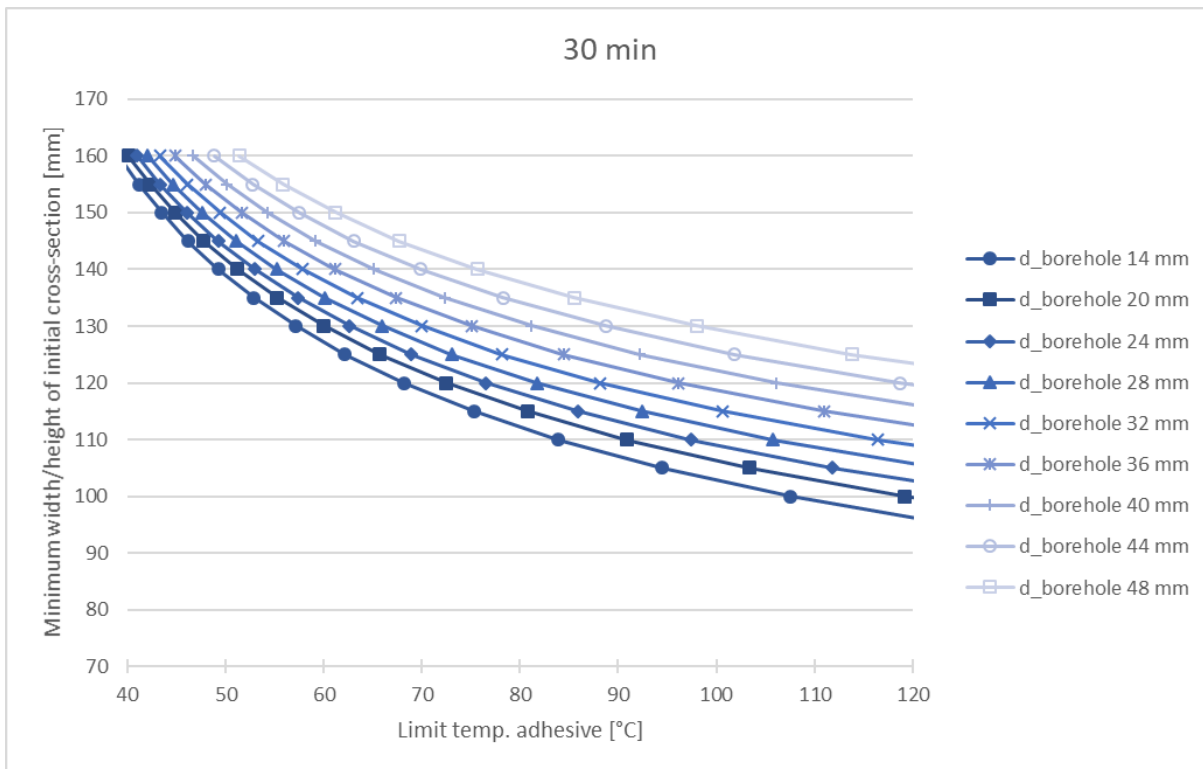


Abbildung 51: Nomogramm für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten basierend auf dem vorgeschlagenen Bemessungsmodell

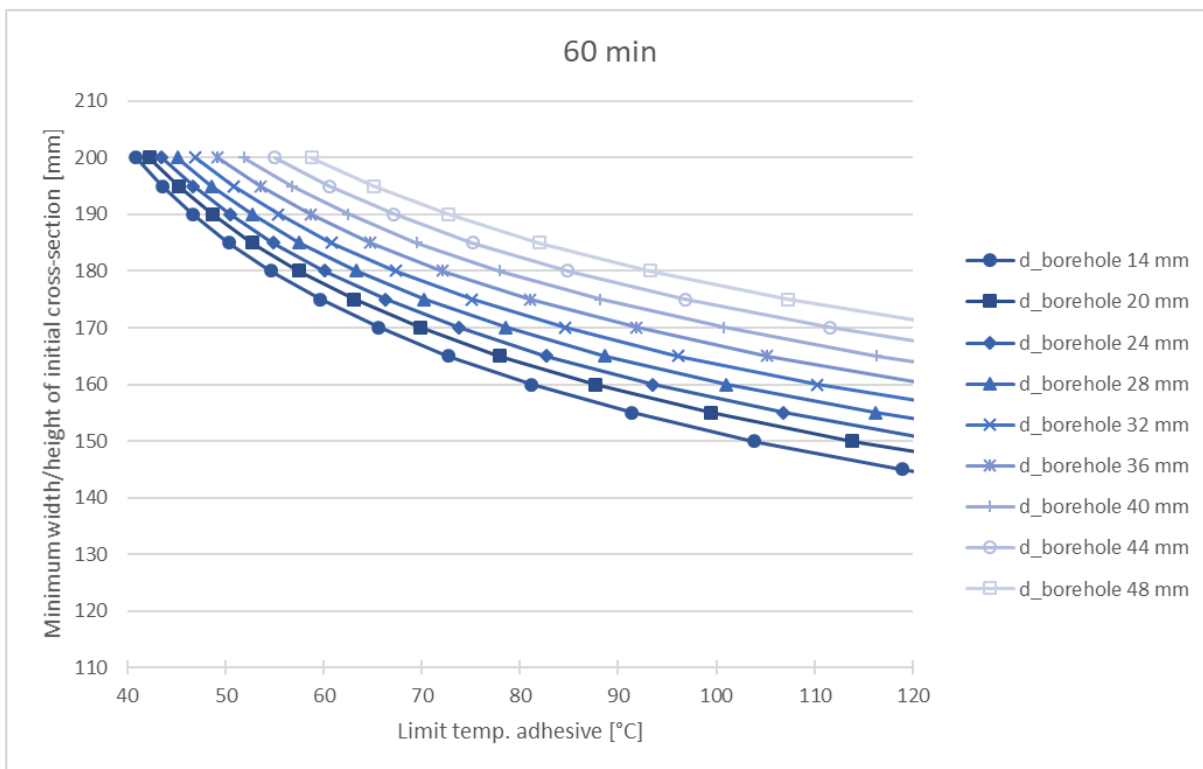
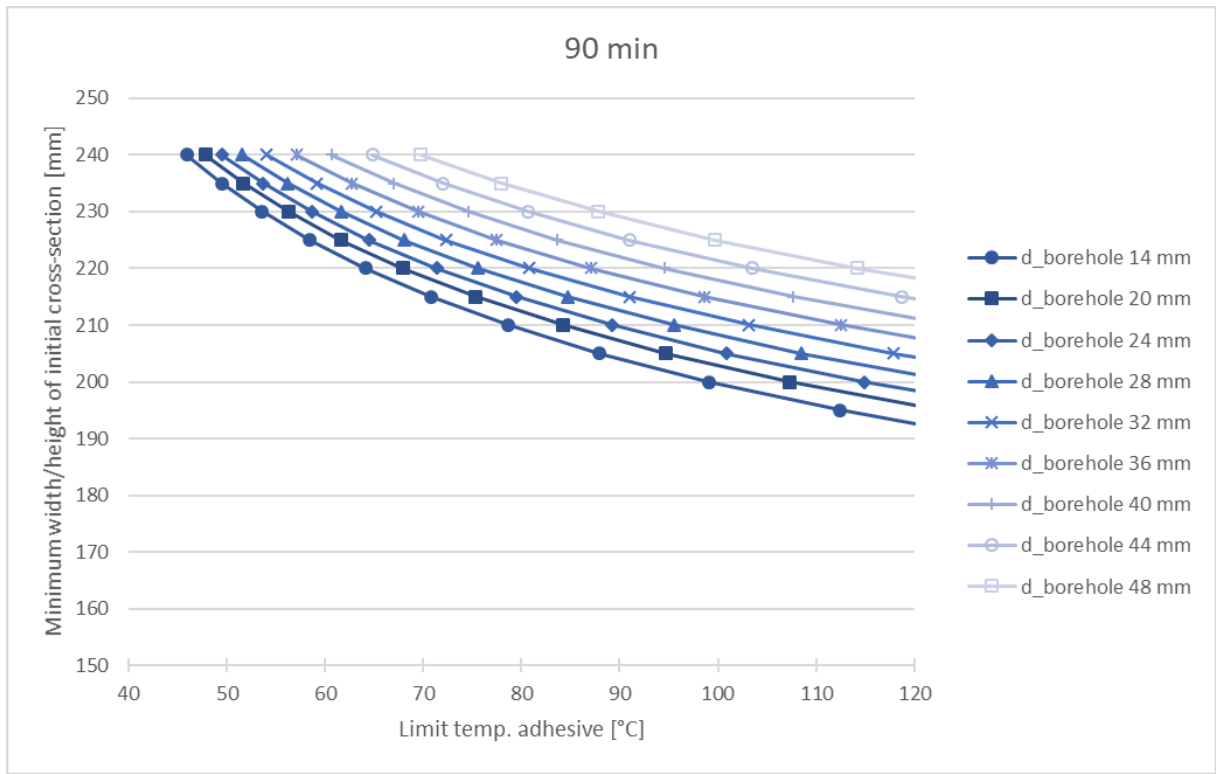


Abbildung 52: Nomogramm für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten basierend auf dem vorgeschlagenen Bemessungsmodell



**Abbildung 53: Nomogramm für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten basierend auf dem vorgeschlagenen Bemessungsmodell**



## **Arbeitspaket 4: Dissemination & Kommunikation**

Die Teil- und Endergebnisse von FIRENWOOD wurden in Konferenzen und Workshops für Vertreter aus Wissenschaft, Planung, Industrie, Rettungsdiensten und Behörden vorgestellt. Die hieraus entstandenen Diskussionen sind notwendig, um ein gemeinsames Verständnis über das Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen im Brandfall und die Notwendigkeit von Änderungen in den Bemessungsmodellen und der Bewertung von Klebstoffen zu schaffen.

Die möglichst schnelle und praktische Umsetzung der Projektergebnisse wurde mit Interessenvertretern (vor allem der Holzwerkstoff- und Klebstoffindustrie) außerhalb des Projektteams diskutiert.

Zusätzlich wurden die Ergebnisse von FIRENWOOD den Normungsgremien „CEN TC193 SC1 Klebstoffe für Holz und Holzwerkstoffe, WG13 – Brandverhalten“ sowie „CEN TC250 SC5 Structural Eurocodes – Eurocode 5: Design of Timber Structures, WG4 – Fire“ vorgelegt.

Die Ergebnisse von FIRENWOOD werden nach Veröffentlichung der entsprechenden wissenschaftlichen Arbeiten in Fachzeitschriften der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Neue Erkenntnisse über das Verhalten von Holzwerkstoffkonstruktionen, die im Rahmen von FIRENWOOD gewonnen wurden, sollen in die Ausbildung von Studenten und praktizierenden Ingenieuren aufgenommen werden.

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Während des Projekts wurden keine Patente für neuartige Entwicklungen angemeldet.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

- Durch die vergleichsweise geringen Querschnitte bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Kraftübertragung und der optischen Vorteile bildet diese Konstruktionsweise Vorteile im Konstruieren von Holzbauanschlüssen.
- Durch das Teilvorhaben wurden vorhandene Wissenslücken zum Brandverhalten von Konstruktionen mit eingeklebten metallischen Verbindungsmitteln reduziert.
- Der Abbau von Unsicherheiten in Bezug auf die Tragfähigkeit im Brandfall solcher Konstruktionen trägt zu breiteren Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten bei.
- Das vorgeschlagene Bemessungsmodell ermöglicht die Festlegung der benötigten Querschnitte bzw. Holzüberdeckungen einer Verbindung für die angestrebte/vorgeschriebene Feuerwiderstandsdauer.
- Durch die zur Verfügung gestellten Nomogramme ist eine erste, einfache Vorabschätzung durch den Planer möglich ohne auf analytische Verfahren zurückgreifen zu müssen.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

- Durch die Mitarbeit der Projektpartner in der Normung wurden die Ergebnisse den Normungsgremien CEN TC193 SC1 Klebstoffe für Holz und Holzwerkstoffe, WG13 – Brandverhalten sowie CEN TC250 SC5 Structural Eurocodes - Eurocode 5:Design of Timber Structures, WG4 – Fire vorgelegt.
- Das Bemessungsmodell soll Einzug in die neue EN 1995-1-2 zur Heißbemessung von Holzbauwerken finden.
- Durch die transnationale Zusammenarbeit werden neue Erkenntnisse über das Verhalten von Holzkonstruktionen, die im Rahmen von FIRENWOOD gewonnen wurden in die Ausbildung von Studenten und praktizierenden Ingenieuren aufgenommen.
- Durch Erkenntnisgewinne zur Holzüberdeckung wird angestrebt Kapitel 8.2.1 in DIN 4102-4 abzuändern, da die hier angegebene Überdeckung als zu niedrig erachtet wird.
- Weiterverwendung vorhandener Materialparameter bei numerischen Simulationen für die Kopplung von den Baustoffen Stahl und Holz zur Prognose der Wärmeentwicklung und der gegenseitigen Beeinflussbarkeit.

#### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

- Untersuchungen von weiteren Klebstofftypen bzw. anderen Herstellern um die Anwendbarkeit zu erhöhen.
- Untersuchung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Spannungszustände innerhalb der Konstruktion
- Zusätzliche Versuche zur Untersuchung von anderen Holzarten oder Holzprodukten (BSP, FSH)
- Bestimmung des Einflusses des Kühleffekts von metallischen Verbindungsmitteln und deren Skalierbarkeit
- Untersuchung der Festigkeitsentwicklung nach Wiederabkühlen der thermisch belasteten Prüfkörper A
- Andere Holzarten als das in den FIREWOOD-Tests getestete Nadelholz sollten auf ihre spezifischen Auswirkungen weiteruntersucht werden.

#### **3. Erkenntnisse von Dritten**

Es herrscht keine Kenntnis über neue Erkenntnisse in diesem Bereich während der Projektlaufzeit.

#### **4. Veröffentlichungen**

- D1.1 Obstacles and possibilities in implementation and use of engineered wood systems in construction
- Sub report D3.4 – Test series 1 – Lap shear tests at elevated temperatures
- Beitrag Braunschweiger Brandschutztag 2022
- Veröffentlichung Teilberichte zu den Arbeitspaketen ForestValue (geplant)
- Dissertation (geplant)
- Zeitschriftenartikel in „Bautechnik“ (geplant)
- Zeitschriftenartikel in „Fire safety journal“ (geplant)

## Literaturverzeichnis

- [1] KREMER, Paul ; SYMMONS, Mark: *Overcoming Psychological Barriers to Widespread Acceptance of Mass Timber Construction in Australia* (2016)
- [2] CASTALDO, Sandro ; PERRINI, Francesco ; MISANI, Nicola ; TENCATI, Antonio: *The Missing Link Between Corporate Social Responsibility and Consumer Trust: The Case of Fair Trade Products*. 2009 (1)
- [3] HURMEKOSKI, Elias ; JONSSON, Ragnar ; NORD, Tomas: *Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe*. 2015
- [4] BYSHEIM, K. ; NYRUD, A.: *Architects' perceptions of structural timber in urban construction*. Delft, 2008 (Conference COST E53)
- [5] LEONARD, Clayton T. ; GAEDICKE, Cristián ; CASTRONOVO, Fadi: *Mass Timber Construction: Perceptions of an Emerging Methodology among San Francisco Bay Area construction professionals*. 2019 (Associated Schools of Construction Proceedings of the 55th Annual International Conference)
- [6] JANUZI-CANA, Arta: *The Role and Perception of Architects and Engineers on Timber-Based Architecture – Case of Kosovo*. Vol. 4 No. 1 (2017). 2017 (The New Arch)
- [7] DENIZOU, Karine ; HVEEM, Sigurd ; TIME, Berit: *Tre i by – Hvilke mekanismer styrer materialvalget for større urbane byggverk, KMB-forprosjekt (NFR) "Fellessatsing Tre"*. 2009
- [8] ARORA, Sanjay K. ; FOLEY, Rider W. ; YOUTIE, Jan ; SHAPIRA, Philip ; WIEK, Arnim: *Drivers of technology adoption — the case of nanomaterials in building construction*. 2014
- [9] GIESEKAM, Jannik ; BARRETT, John ; TAYLOR, Peter ; OWEN, Anne: *The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction*. 2014
- [10] GOSSELIN, Annie ; BLANCHET, Pierre ; LEHOUX, Nadia ; CIMON, Yan: *Main Motivations and Barriers for Using Wood in Multi-Story and Non-Residential Construction Projects*. 2016 (1)
- [11] RUUSKA, Antti ; HÄKKINEN, Tarja: *Efficiency in the Delivery of Multi-story Timber Buildings*. 2016
- [12] ÖSTMAN, Birgit ; KÄLLSNER, Bo: *National building regulations in relation to multi-storey wooden buildings in Europe*. Sweden, 2011
- [13] HYNYNEN, Ari: *Future in Wood? Timber Construction in Boosting Local Development*. 2016 (1)
- [14] BENGTTSSON, Charlotte: *Challenges in timber construction*. 2009 (15. Internationales Holzbau-Forum 09)
- [15] FRANZINI, Florencia ; TOIVONEN, Ritva ; TOPPINEN, Anne: *Why Not Wood? Benefits and Barriers of Wood as a Multistory Construction Material: Perceptions of Municipal Civil Servants from Finland*. 2018 (11)
- [16] SARDÉN, Ylva: *Complexity and learning in timber frame housing: the case of a solid wood pilot project*. 2005
- [17] TEISCHINGER, A.: *Opportunities and limits of timber in construction*. Vienna, 2016 (World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016))
- [18] O'CONNOR, J.: *Ontario Non-residential Construction Market Assessment : Project No. 5418*. Vancouver, 2006
- [19] WOLSKI, Armin ; DEMBSEY, Nicholas A. ; MEACHAM, Brian J.: *Accommodating perceptions of risk in performance-based building fire safety code development* (3)
- [20] SHERIDAN, L. ; VISSCHER, H. J. ; MEIJER, F. M.: *Building regulations in Europe Part II: A comparison of technical requirements in eight European countries*. Delft, 2003 (Housing and urban policy Studies 24)
- [21] ÖSTMAN, Birgit: *National fire regulations in relation to the use of wood in European and some other countries 2002*. 2002
- [22] HANSEN, Eric ; NYBAKK, Erlend ; PANWAR, Rajat: *Innovation Insights from North American Forest Sector Research: A Literature Review*. 2014 (6)
- [23] WINTER, S.: *Wood Is Good ?! – Worldwide Threats and Consequent Opportunities for Building with Wood*. Vienna, 2016
- [24] KAROL, Sikora ; JIANLI, Hao ; ISAAC, Galobardes ; WEIQI, Xing ; SUBO, Wei ; ZITONG, Chen: *Feasibility study on further utilization of timber in China*. 2018
- [25] HURMEKOSKI, Elias ; HETEMÄKI, Lauri ; LINDEN, Mika: *Factors affecting sawnwood consumption in Europe*. 2014

- [26] DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE: *Future Qualification and Skills Needs in the Construction Sector*. 2009 (Policy and Business Analysis Ref. Ares(2014)1128104 - 10/04/2014)
- [27] MAHAPATRA, Krushna ; GUSTAVSSON, Leif: *Cost-effectiveness of using wood frames in the production of multi-storey buildings in Sweden*. Växjö, Sweden, 2009
- [28] JONSSON, Ragnar Klas Henrik: *Prospects for timber frame in multi-storey house building in England, France, Germany, Ireland, the Netherlands and Sweden*. 2009
- [29] HAFNER, Annette ; RÜTER, Sebastian ; EBERT, Samuel ; SCHÄFER, Sabrina ; KÖNIG, Holger ; CRISTOFARO, Lisa de ; DIEDERICHS, Stefan K. ; KLEINHENZ, Miriam ; KRECHEL, Marco: *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)*. Bochum : Ruhr-Universität Bochum Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Ressourceneffizientes Bauen, 2017
- [30] *DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode\_5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeines\_ - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1995-1-1:2004\_ + AC:2006\_ + A1:2008*
- [31] *DIN EN 301:2018-01, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile\_ - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN\_301:2017*
- [32] *DIN EN 1995-1-2:2010-12, Eurocode\_5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten\_ - Teil\_1-2: Allgemeine Regeln\_ - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN\_1995-1-2:2004\_ + AC:2009*
- [33] SOUSA, M.L., DIMOVA, S. ATHANASOPOULOU, A., IANNACCONE, S. MARKOVA, J.: *State of harmonised use of the Eurocodes*. Luxembourg, 2019
- [34] ABEND, Kerstin: *Die Regulierung von Bauprodukten zum Einbau in Bauwerke durch die EU. : Plädoyer für eine loyale Zusammenarbeit*. 2018 (DiBt-Newsletter Spezialausgabe)
- [35] COSTA BRANCO DE OLIVEIRA PEDRO, J.A., MEIJER, F.M. ; VISSCHER, H. J.: *Technical building regulations in EU countries: A comparison of their organization and formulation*. Salford, 2010 (CIB World Congress 2010)
- [36] ÖSTMAN, Birgit ; BRANDON, Daniel ; FRANTZICH, Håkan: *Fire safety engineering in timber buildings*. 2017
- [37] FOLIENTE, Greg C.: *Developments in performance-based building codes and standards*. 2010 (Forest Products Journal 50(7):12-21)
- [38] MAHAPATRA, Krushna ; GUSTAVSSON, Leif ; HEMSTRÖM, Kerstin: *Multi-storey wood-frame buildings in Germany, Sweden and the UK*. 2012 (1)
- [39] SHMUELLY-KAGAMI, Tzofit ; MATSUMURA, Shuichi: *Progress of timber multi-storey apartment building in Europe and Japan*. USA, 2008 (10th World Conference on Timber Engineering 2008 21-28)
- [40] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME: *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*. 2009
- [41] SAHOO, Kamalakanta ; BERGMAN, Richard ; ALANYA-ROSENBAUM, Sevda ; GU, Hongmei ; LIANG, Shaobo: *Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review*. 2019 (17)
- [42] *DIN EN 302-1:2013-06, Klebstoffe für tragende Holzbauteile\_ - Prüfverfahren\_ - Teil\_1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung EN\_302-1:2013*
- [43] *DIN 1052-10:2012-05, Herstellung und Ausführung von Holzbauwerken\_ - Teil\_10: Ergänzende Bestimmungen*
- [44] *DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke\_ - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz\_ - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN\_408:2010+A1:2012*. Berlin
- [45] *DIN EN 13183-1:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz\_ - Teil\_1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN\_13183-1:2002*
- [46] DORBATH, Tilman: *Warmkriechversuche - Verhalten von eingeklebten GEwindestangen unter Temperaturbeanspruchung*. München, TUM. Masters Thesis. 2022
- [47] *DIN EN 1363-1:2020-05, Feuerwiderstandsprüfungen\_ - Teil\_1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN\_1363-1:2020*

- [48] SCHLEIFER, Vanessa; FONTANA, Mario (Mitarb.); KÖNIG, Jürgen (Mitarb.): *Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*. 2009
- [49] *DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode\_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten\_- Teil\_1-2: Allgemeine Regeln\_- Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN\_1993-1-2:2005\_+ AC:2009*
- [50] FRANGI A., FONTANA, M: *Brandverhalten von Holz-Beton- Verbunddecken*. 2001 (IBK Report No. 269)
- [51] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR HOLZFORSCHUNG: *Holz-brandschutz-handbuch*. 3. Aufl. Berlin : John Wiley & Son Ltd, 2009 (Informationsdienst Holz)
- [52] JANSSENS, Marc L. ; WHITE, Robert H.: *Short communication: Temperature profiles in wood members exposed to fire*. 1994 (4)
- [53] KÖNIG, J.: *Die Bemessung von Holzbauten für den Brandfall nach ENV 1995-1-1*. Düsseldorf, 1995
- [54] RÖLL, H.: *Untersuchungen über das Abbrandverhalten von Fichten- und Eichenholz in Abhängigkeit von Rohdichte Jahrringsorientierung und Zeit*. 1984

## A Versuchsreihe 1 Versagensmodi

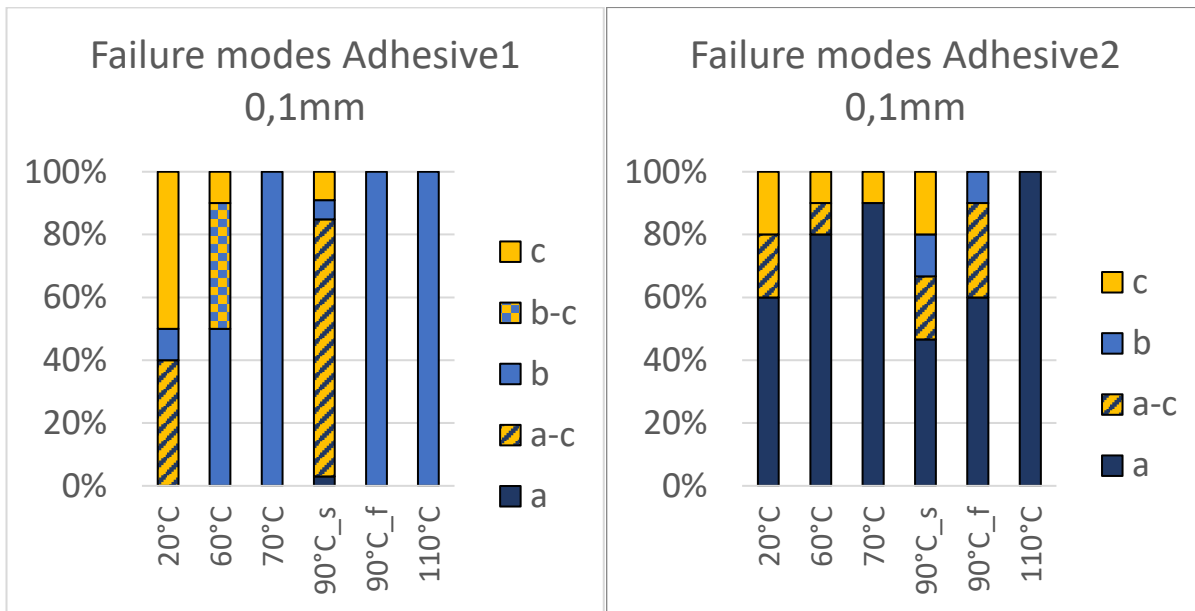


Abbildung 54: Versagensart der beiden Klebstoffe mit 0,1 mm Klebstofffugendicke (a: Adhäsion, b: Kohäsion, c: Holz)

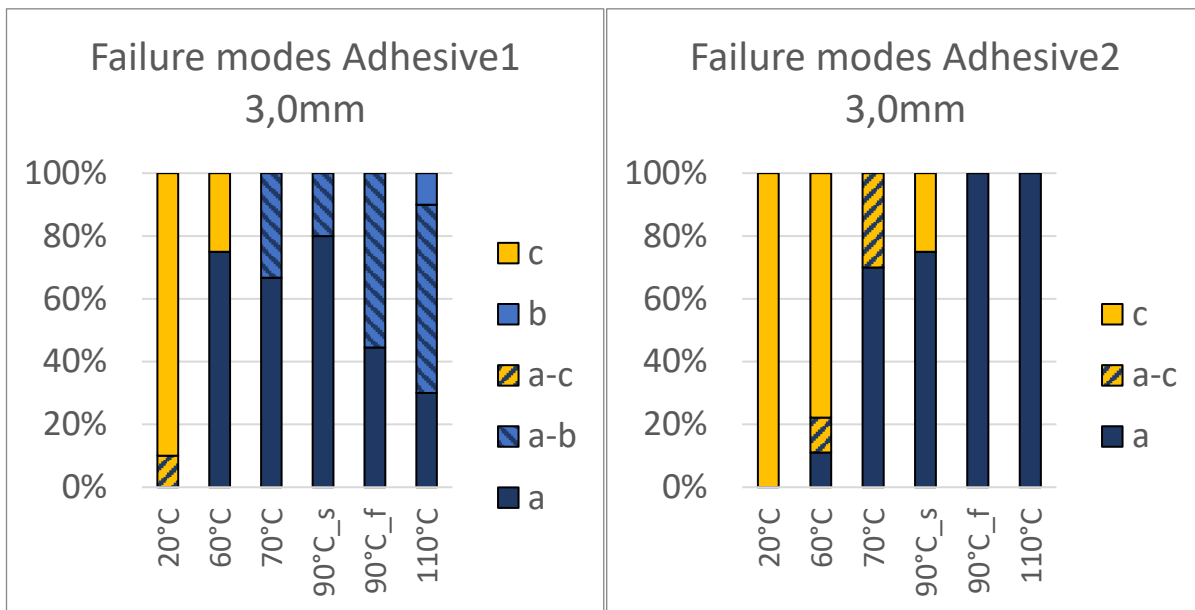


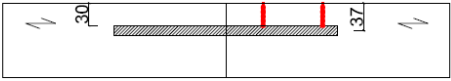
Abbildung 55: Versagensart der beiden Klebstoffe mit 3,0 mm Klebstofffugendicke (a: Adhäsion, b: Kohäsion, c: Holz)

# B Versuchsreihe 2

## B.1 Prüfkörperaufbauten

Specimen-Nr. 111

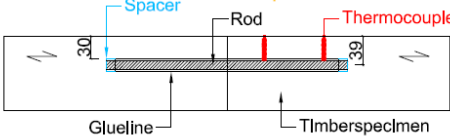
Fire exposed side



- 50\_6
- 50\_12
- 50\_16
- 50\_24
- 50\_30
- 130\_6
- 130\_12
- 130\_18
- 130\_24
- 130\_30

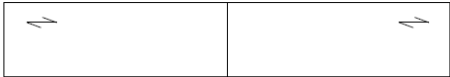
121

Fire exposed side



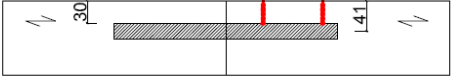
101

Fire exposed side



131

Fire exposed side



141

Fire exposed side

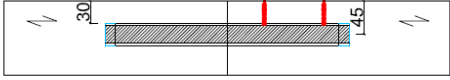
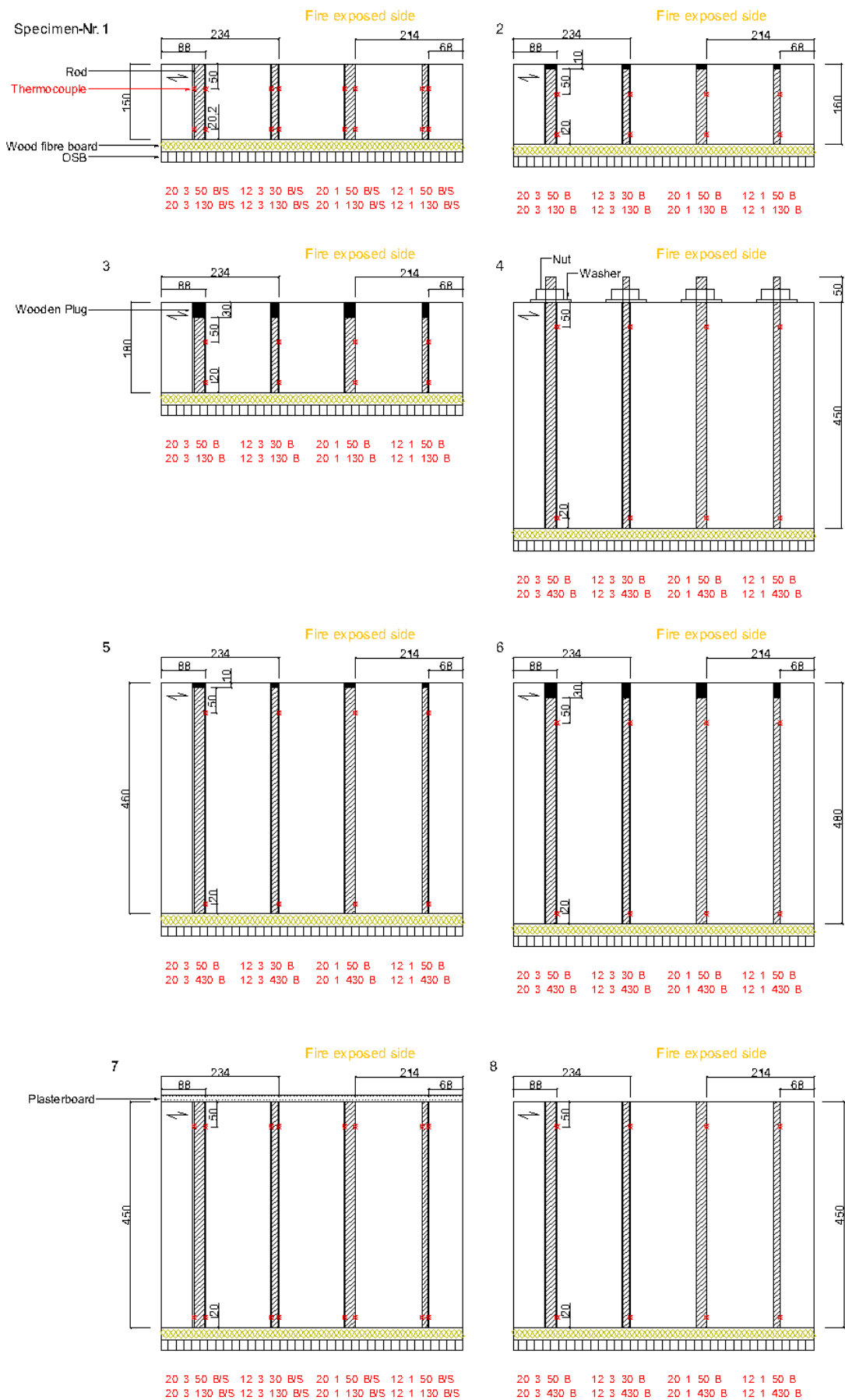


Abbildung 56: Längsschnitt Prüfkörper Versuchsreihe 2.1 (rot: Thermoelemente, blau: Abstandhalter)





**Abbildung 57: Längsschnitt Prüfkörper Versuchsreihe 2.2 (rot: Thermoelemente; Benennung 1. Stelle GW-Durchmesser, 2. Stelle Klebstoffugendicke, 3. Stelle Messtiefe, 4. Stelle Messstelle Bohrlochrand B oder Stahl S)**

Specimen-Nr.

211

212

231

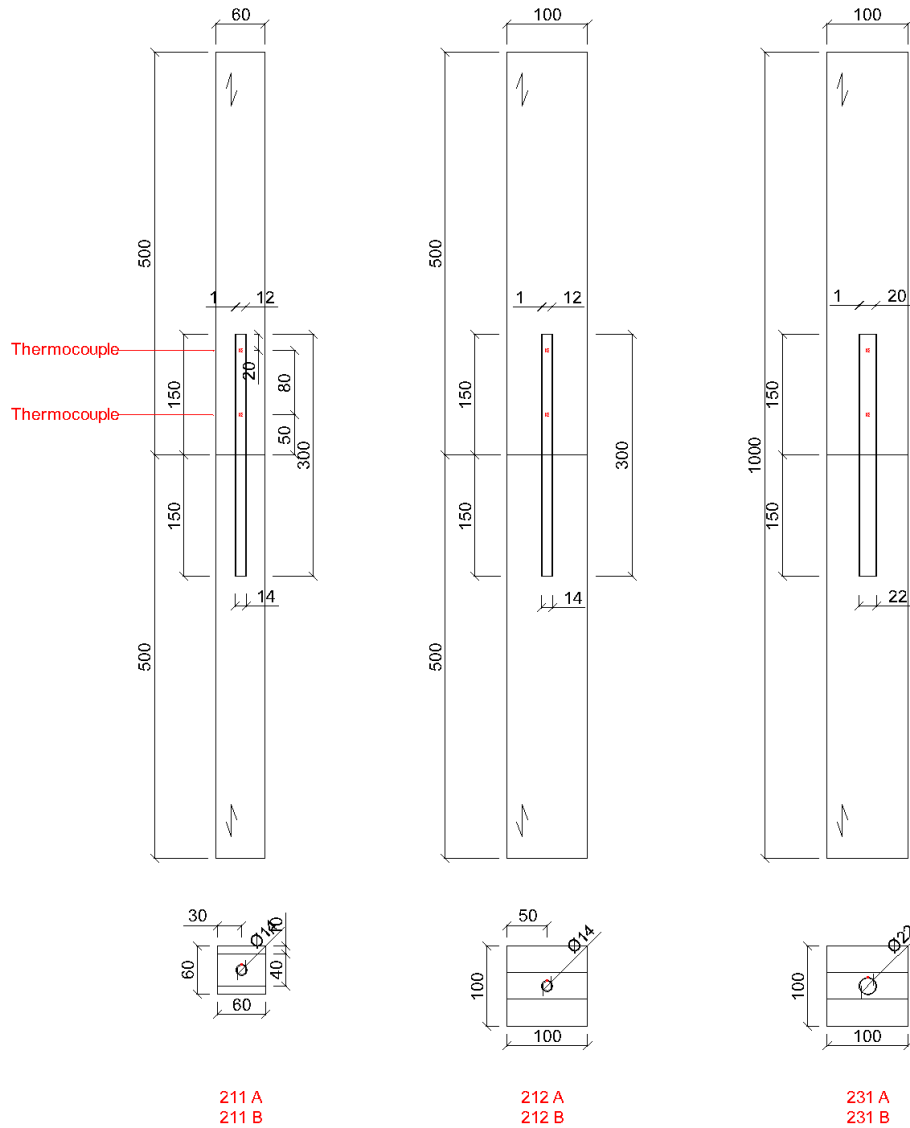


Abbildung 58: Längs- und Querschnitt Prüfkörper Versuchsreihe 2.3 (rot: Thermoelemente)

## B.2 Temperaturkurven V2.1

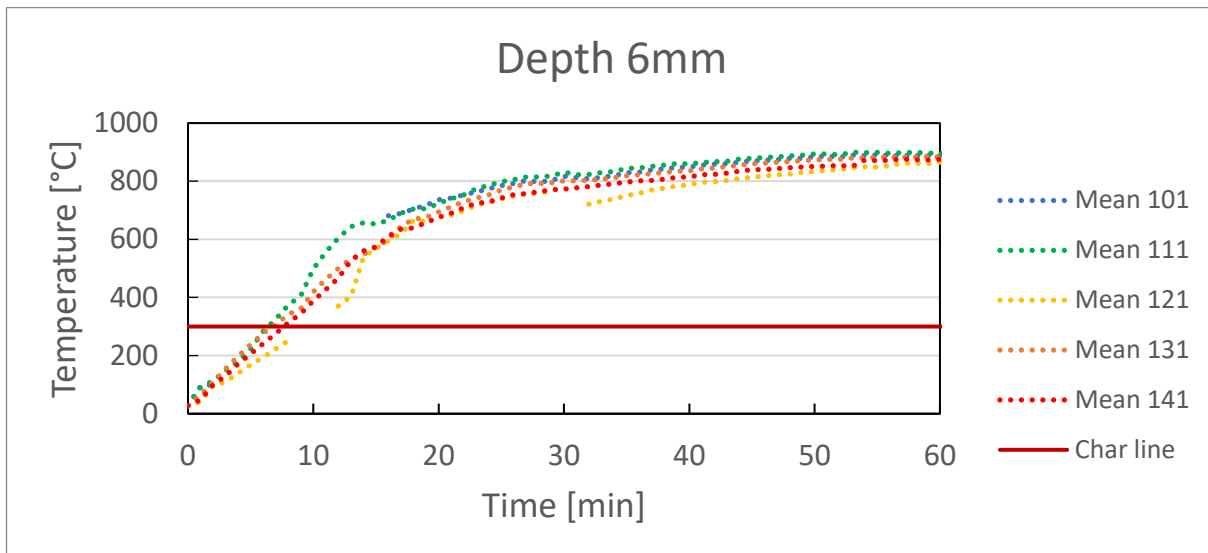


Abbildung 59: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 6 mm

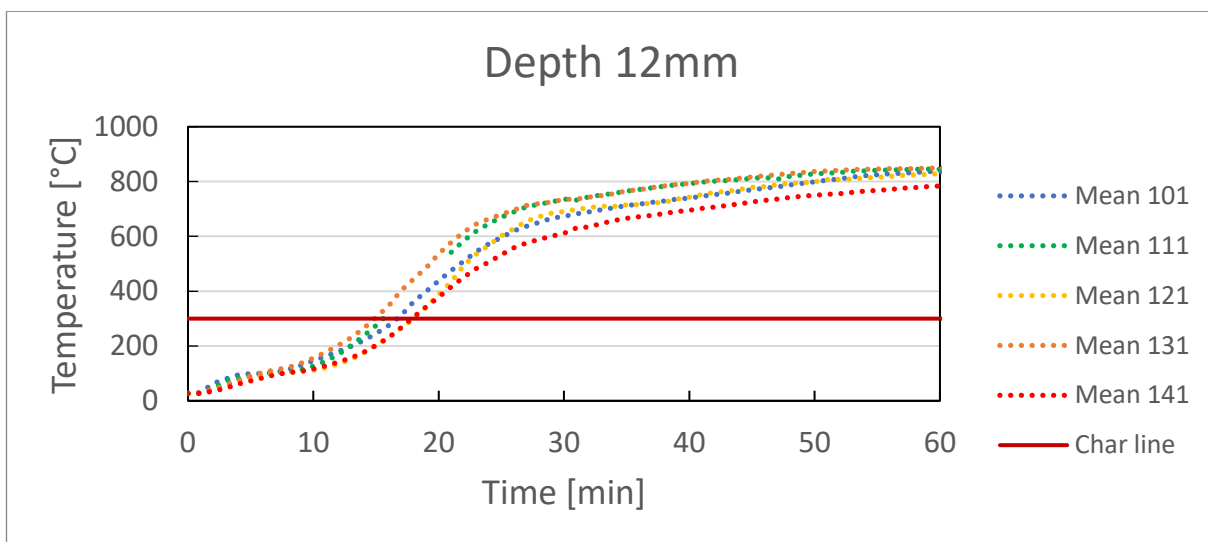


Abbildung 60: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 12 mm

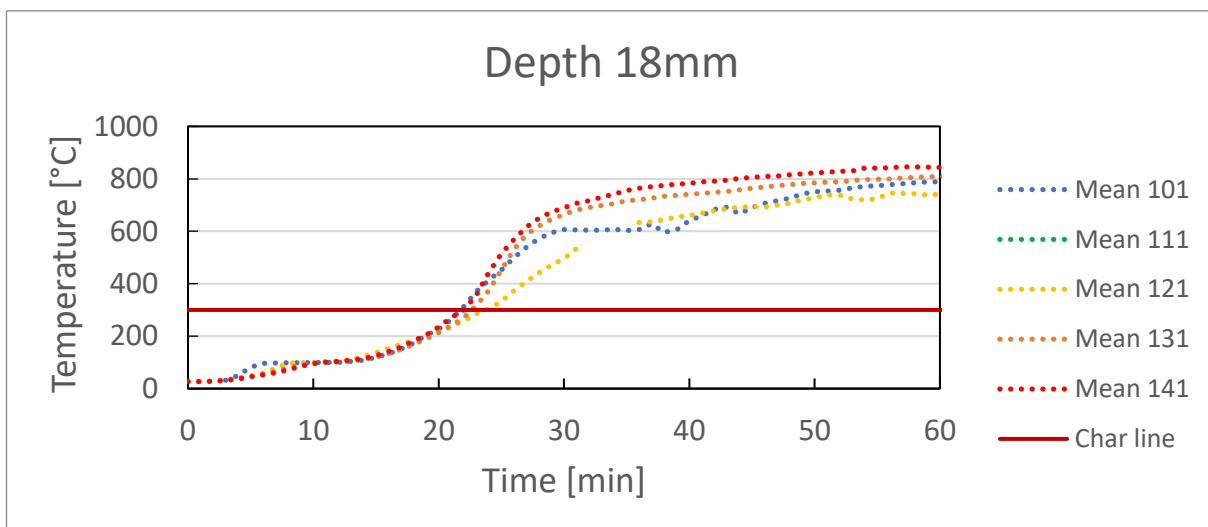


Abbildung 61: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 18 mm

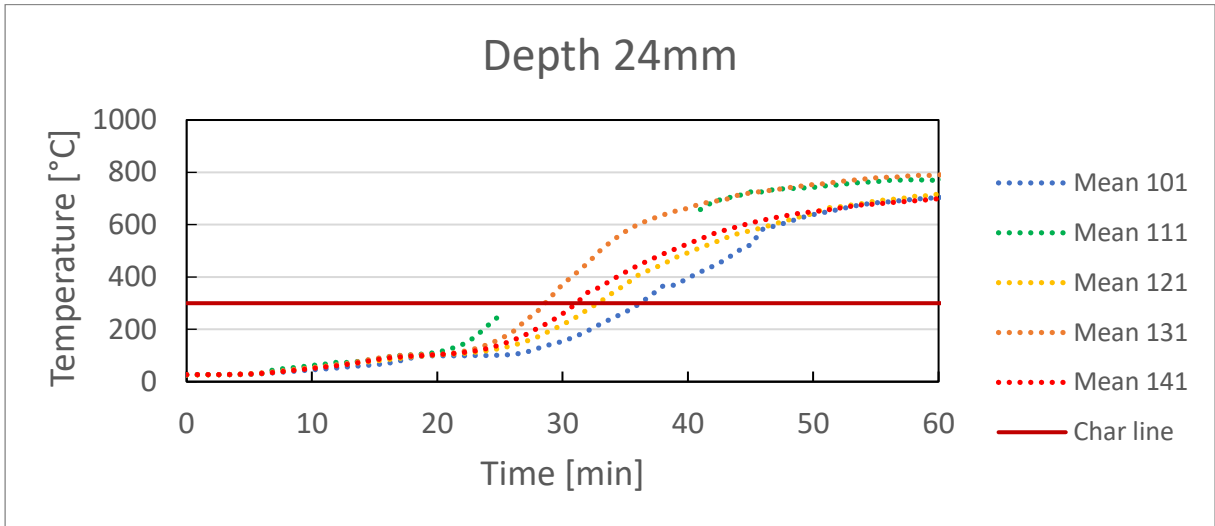


Abbildung 62: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 24 mm

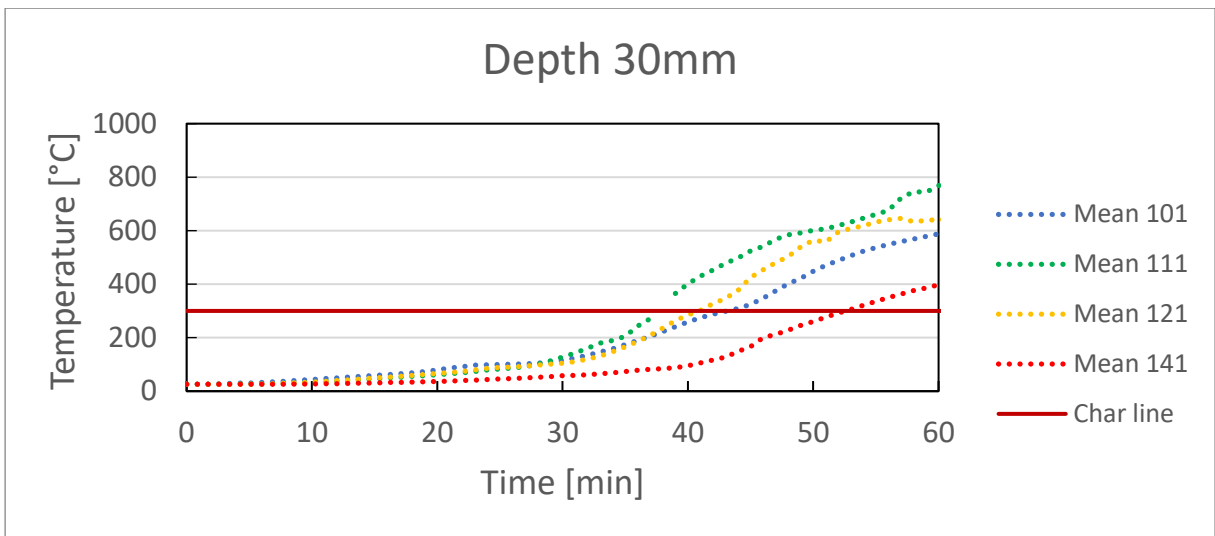


Abbildung 63: Mittlere Temperaturkurven für die Messtiefen von 30 mm

## B.3 Temperaturkurven V2.2

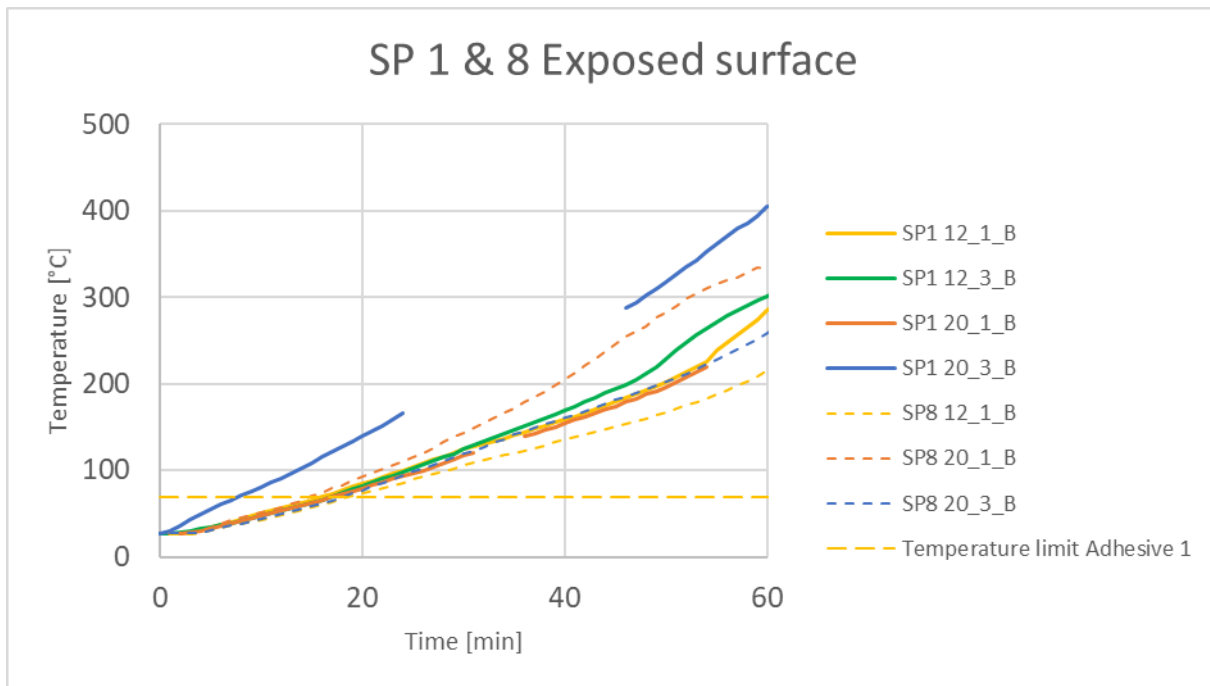


Abbildung 64: Temperaturkurven für Prüfkörper 1 & 8 auf der brandzugewandten Seite

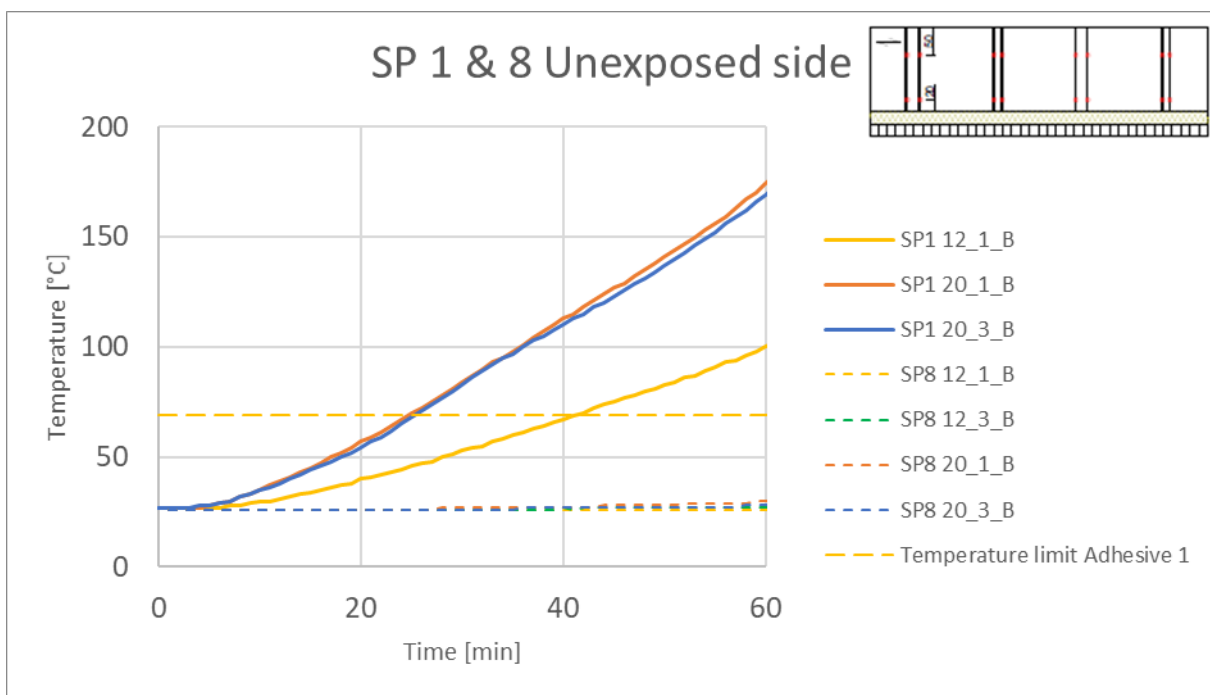
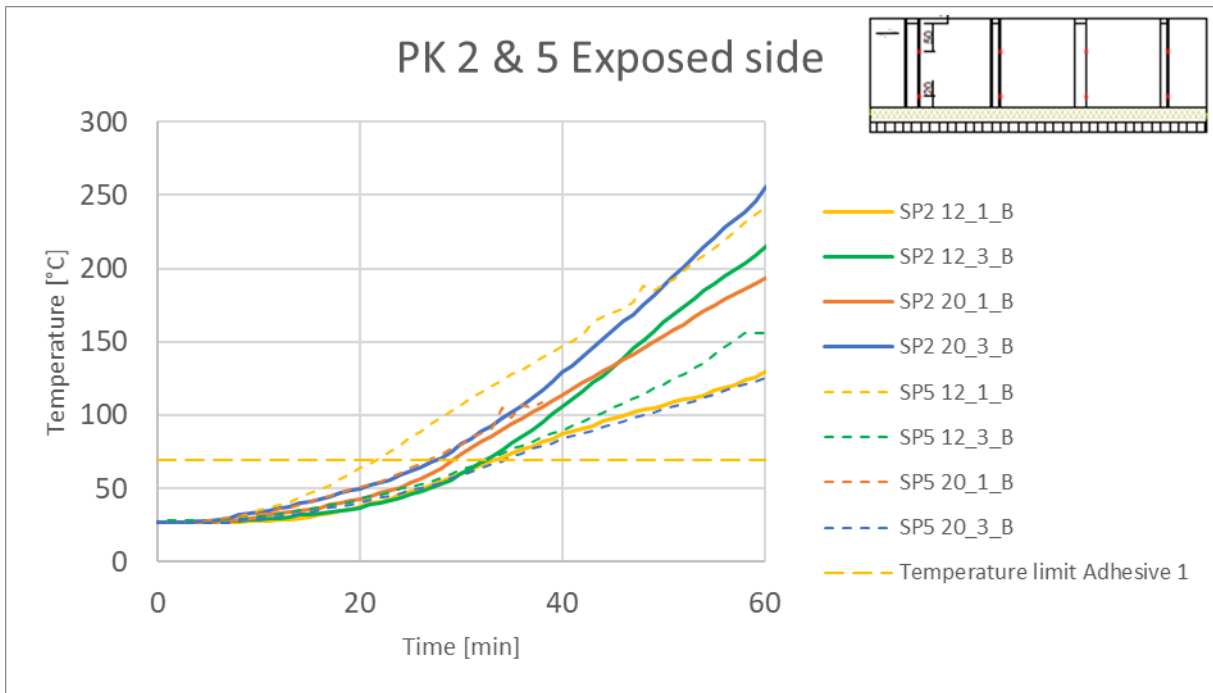
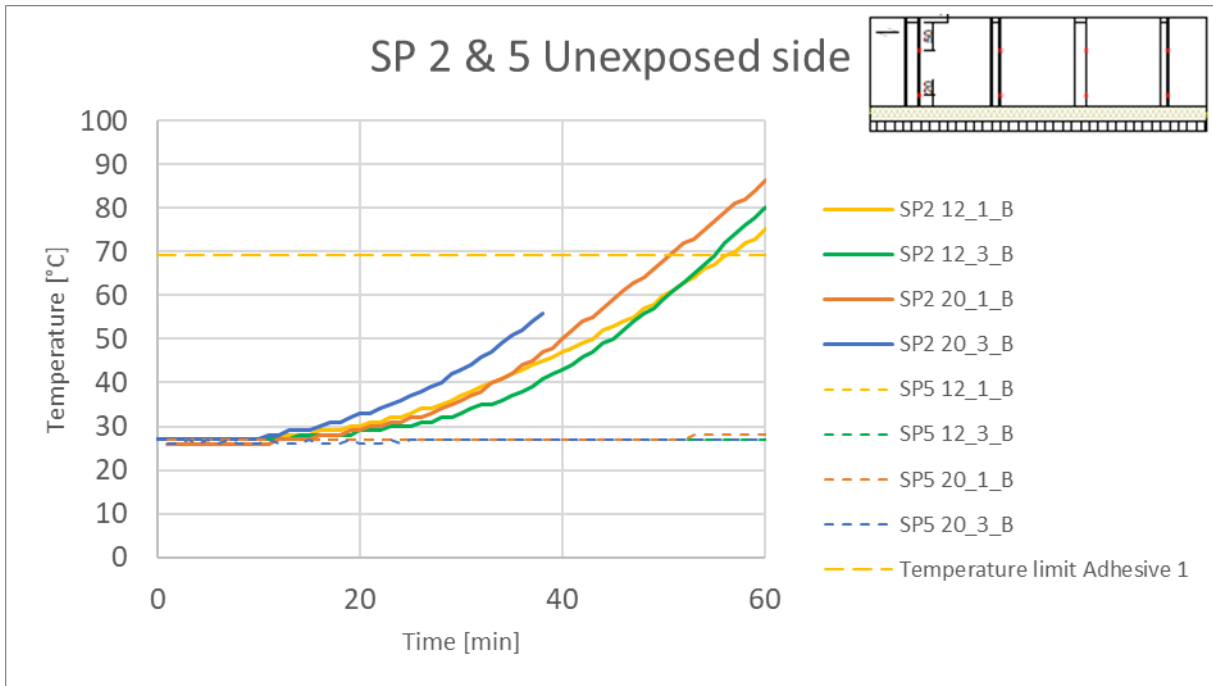


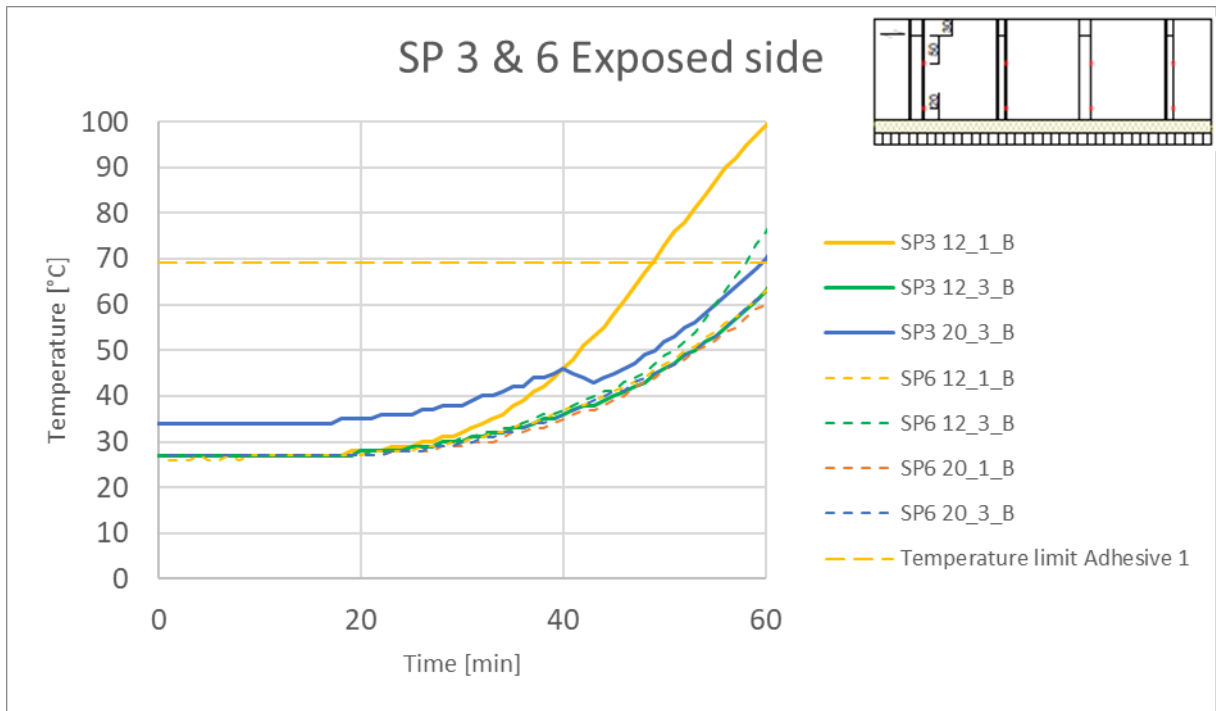
Abbildung 65: Temperaturkurven für Prüfkörper 1 & 8 auf der brandabgewandten Seite



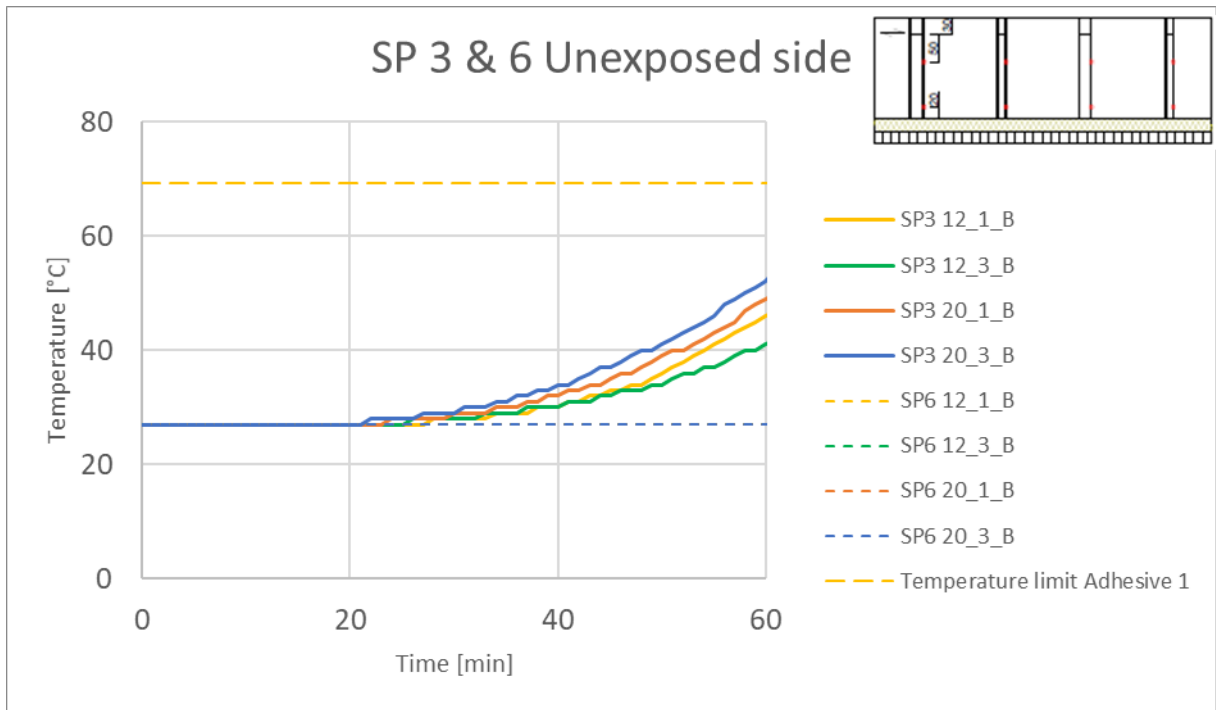
**Abbildung 66: Temperaturkurven für Prüfkörper 2 & 5 auf der brandzugewandten Seite**



**Abbildung 67: Temperaturkurven für Prüfkörper 2 & 5 auf der brandabgewandten Seite**



**Abbildung 68: Temperaturkurven für Prüfkörper 3 & 6 auf der brandzugewandten Seite**



**Abbildung 69: Temperaturkurven für Prüfkörper 3 & 6 auf der brandabgewandten Seite**



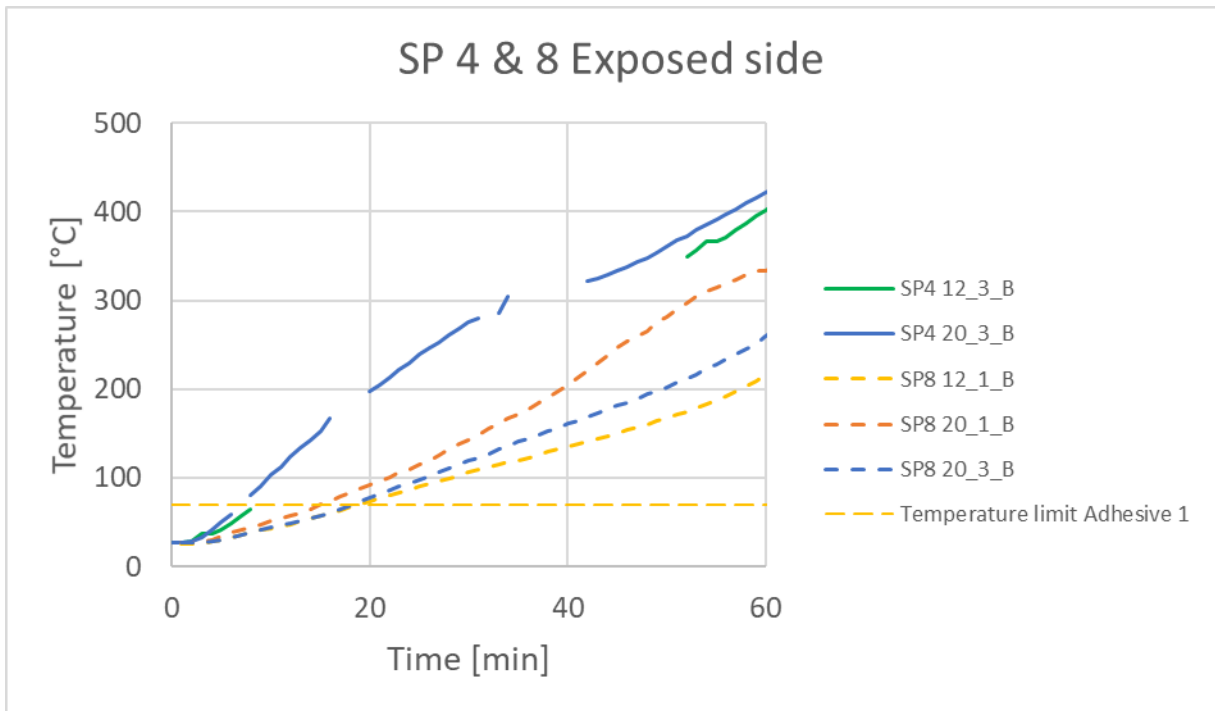


Abbildung 70: Temperaturkurven für Prüfkörper 4 & 8 auf der brandzugewandten Seite

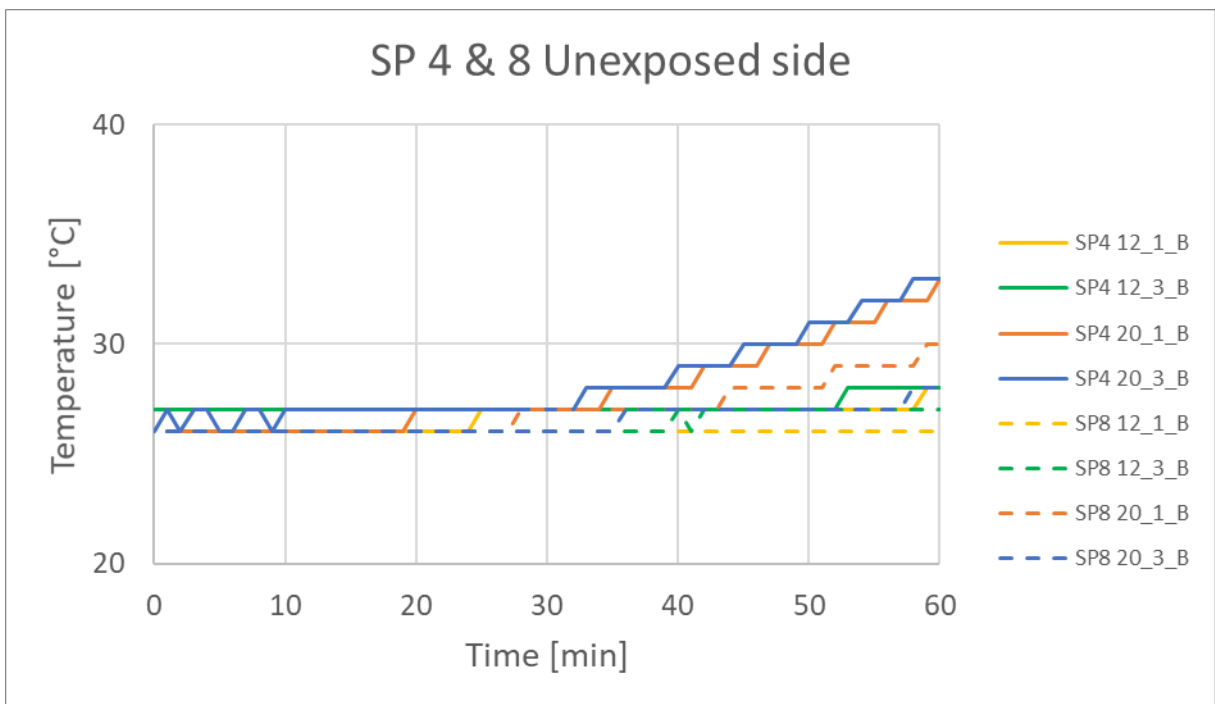


Abbildung 71: Temperaturkurven für Prüfkörper 4 & 8 auf der brandabgewandten Seite

## C Versuchsreihe 3 Versagenstemperaturen

**Tabelle 11: Gemessene Versagenstemperaturen in Versuchsreihe 3 (All: Ergebnisse aller Prüfkörper, 0,4 F: Prüfkörper mit 40 % der Referenzlast als mechanischer Belastung, 0,6 F: Prüfkörper mit 60 % der Referenzlast als mechanischer Belastung)**

		Adhesive 1																	
		All						60x60						100x100					
		All		0,4F		0,6F		All		0,4F		0,6F		All		0,4F		0,6F	
		T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$
<b>Adhesive failure only</b>	Mean	70,78	0,09	71,88	0,09	63,10	0,00	64,78	0,06	64,78	0,06	-	-	72,78	0,09	74,72	0,07	63,10	0,00
	5%-Quantil	61,57		63,17		63,10		61,15		61,15		-		65,05		71,02		63,10	
	20%-Quantil	65,38		69,22		63,10		62,36		62,36		-		70,90		71,38		63,10	
<b>All</b>	Mean	69,92	0,08	71,48	0,08	65,22	0,03	67,05	0,05	67,44	0,06	66,28	0,03	72,78	0,09	74,72	0,07	63,10	0,00
	5%-Quantil	62,04		63,97		63,21		61,61		61,96		64,41		65,05		71,02		63,10	
	20%-Quantil	65,03		69,13		63,54		64,20		65,58		65,03		70,90		71,38		63,10	

		Adhesive 2																	
		All						60x60						100x100					
		All		0,4F		0,6F		All		0,4F		0,6F		All		0,4F		0,6F	
		T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$	T [°C]	$\sigma$
<b>Adhesive failure only</b>	Mean	81,68	0,08	83,30	0,06	67,05	0,00	82,30	0,10	86,11	0,05	67,05	0,00	81,05	0,05	81,05	0,05	-	-
	5%-Quantil	69,91		75,88		67,05		69,56		80,49		67,05		74,77		74,77		-	
	20%-Quantil	78,36		79,99		67,05		77,09		83,14		67,05		78,88		78,88		-	
<b>All</b>	Mean	81,60	0,08	84,01	0,08	75,20	0,03	82,30	0,05	86,11	0,06	67,05	0,03	81,03	0,09	81,90	0,07	79,28	0,00
	5%-Quantil	70,23		79,83		67,69		69,56		80,49		67,05		75,11		80,35		73,99	
	20%-Quantil	79,60		80,51		69,59		77,09		83,14		67,05		80,25		80,64		75,75	

# D Versuchsreihe 4

## D.1 Skizzen

Top View

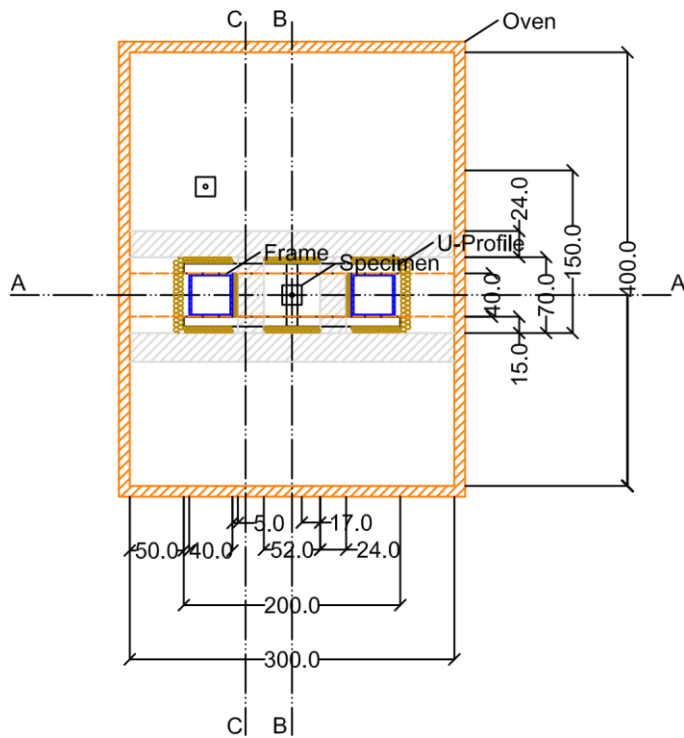


Abbildung 72: Draufsicht Aufbau Prüfofen Versuchsreihe 4

Section A

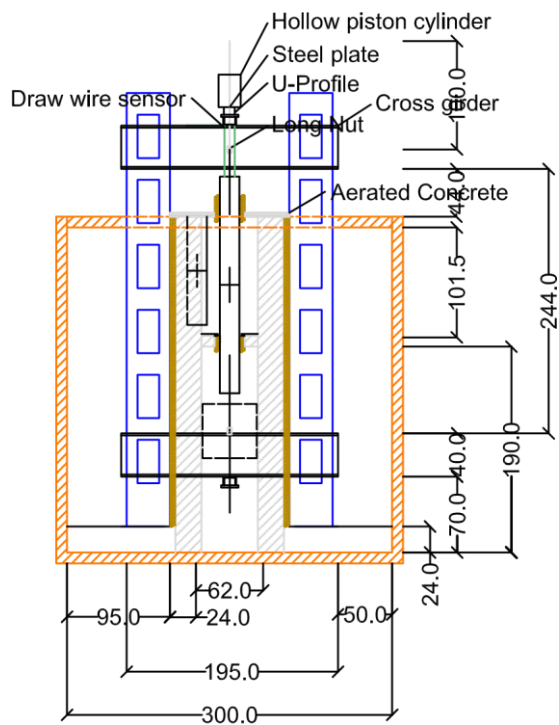


Abbildung 73: Schnitt A Aufbau Prüfofen Versuchsreihe 4

Section B

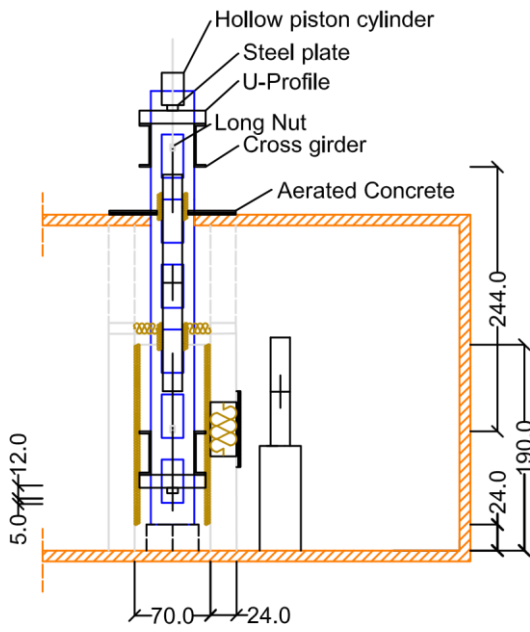


Abbildung 74: Schnitt B Aufbau Prüfen Versuchsreihe 4

Section C

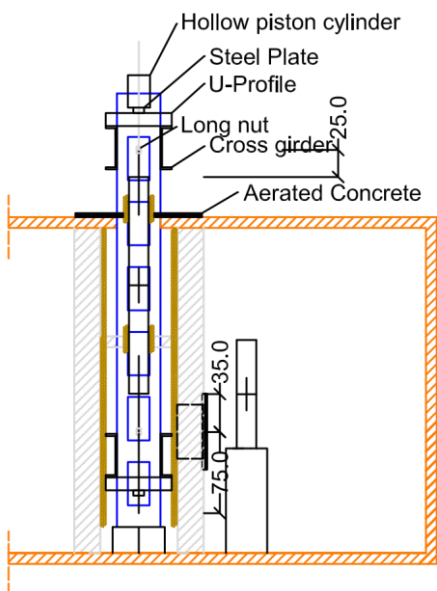


Abbildung 75: Schnitt C Aufbau Prüfen Versuchsreihe 4

## D.2 Lufttemperatur

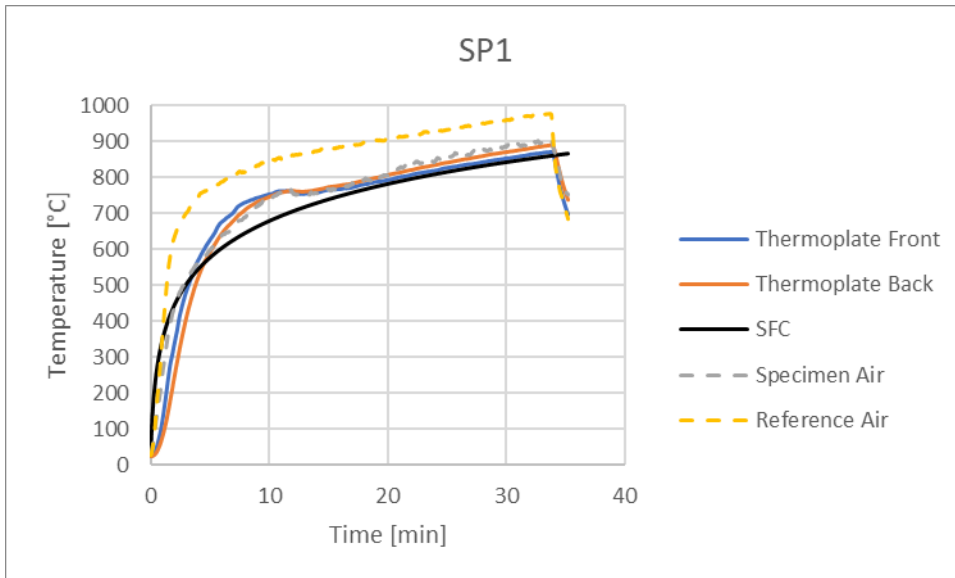


Abbildung 76: Lufttemperatur im Brandversuch für Prüfkörper 1

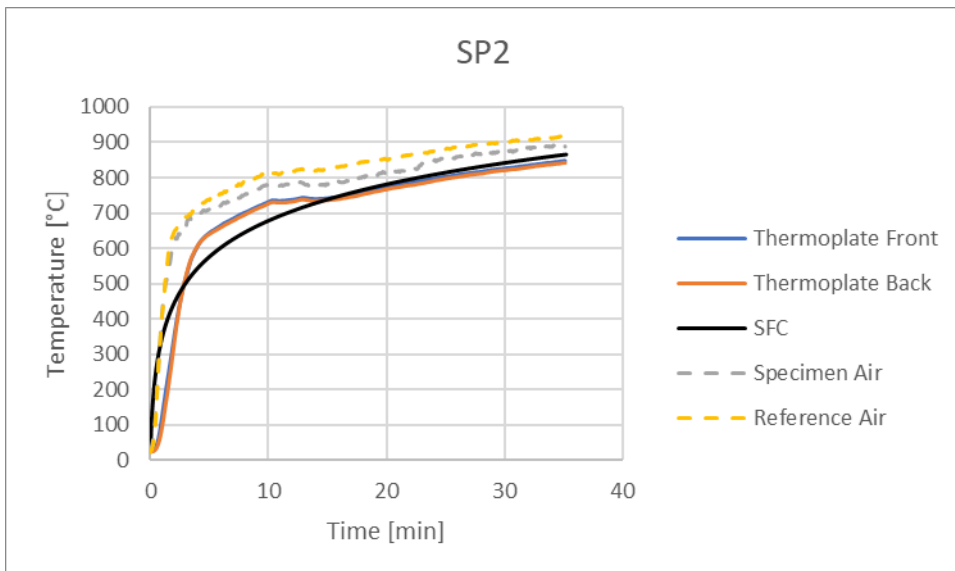


Abbildung 77: Lufttemperatur im Brandversuch für Prüfkörper 2

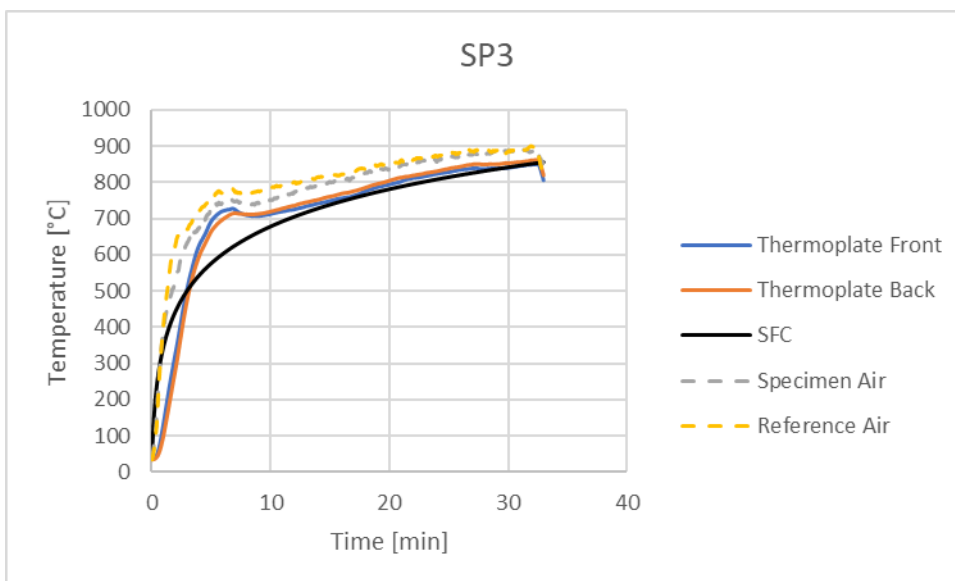
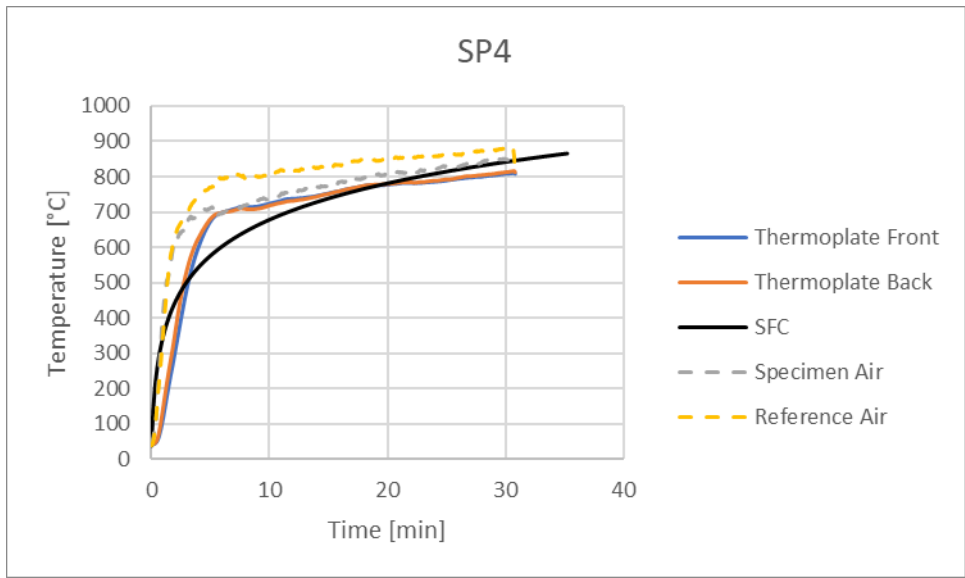


Abbildung 78: Lufttemperatur im Brandversuch für Prüfkörper 3



**Abbildung 79: Lufttemperatur im Brandversuch für Prüfkörper 4**

### D.3 Versagenstemperatur

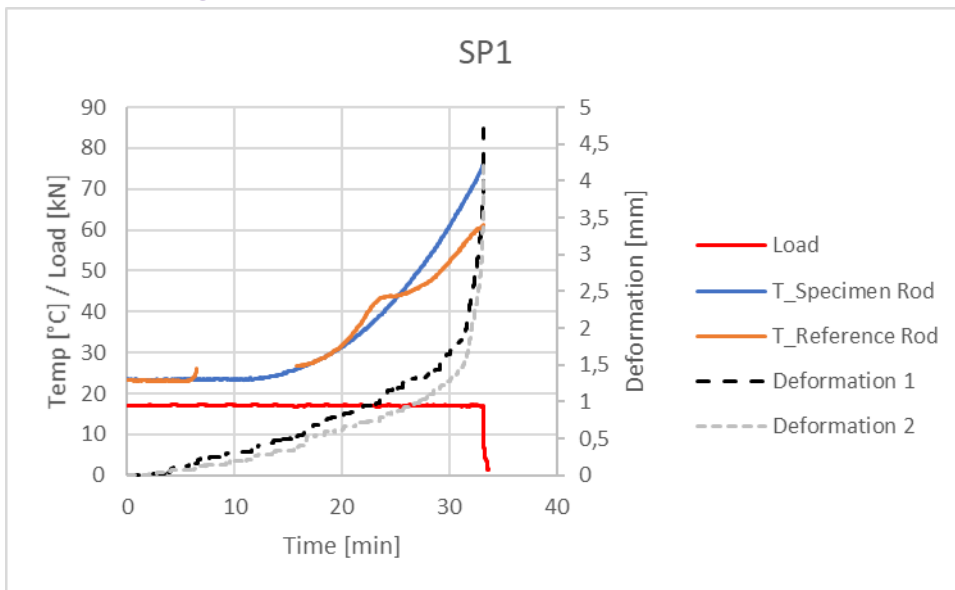


Abbildung 80: Last- / Temperatur- / Verformungskurven für Prüfkörper 1

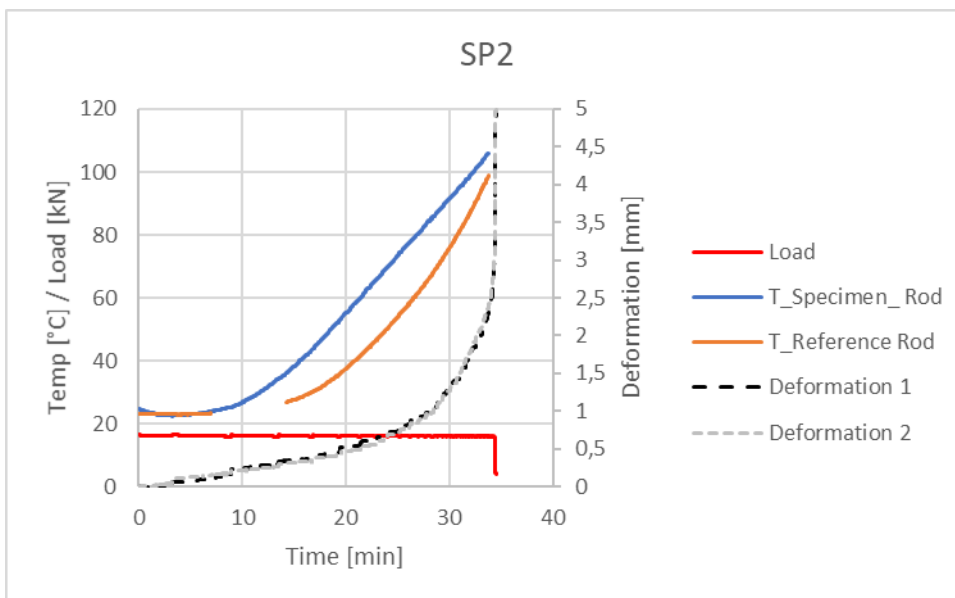


Abbildung 81: Last- / Temperatur- / Verformungskurven für Prüfkörper 2

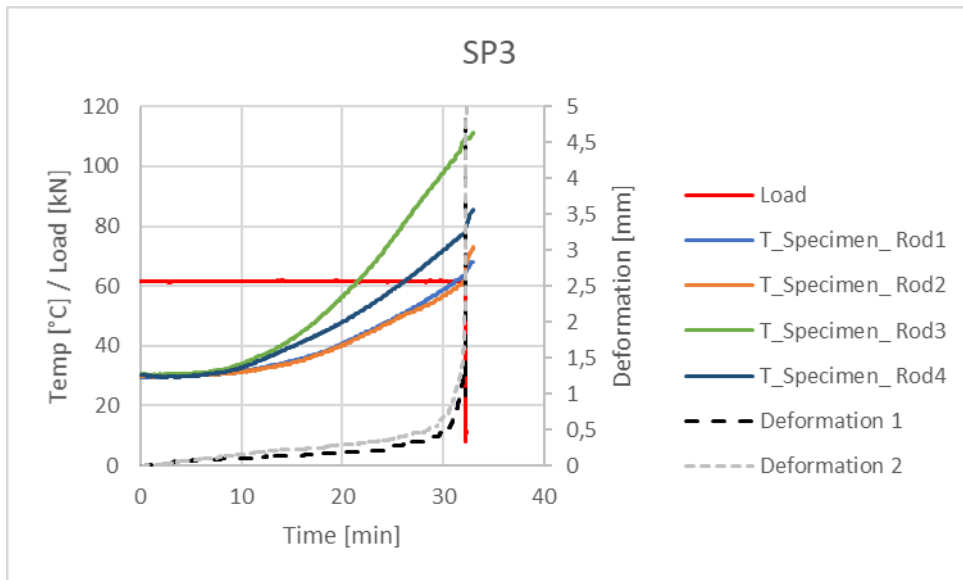


Abbildung 82 Last- / Temperatur- / Verformungskurven für Prüfkörper 3

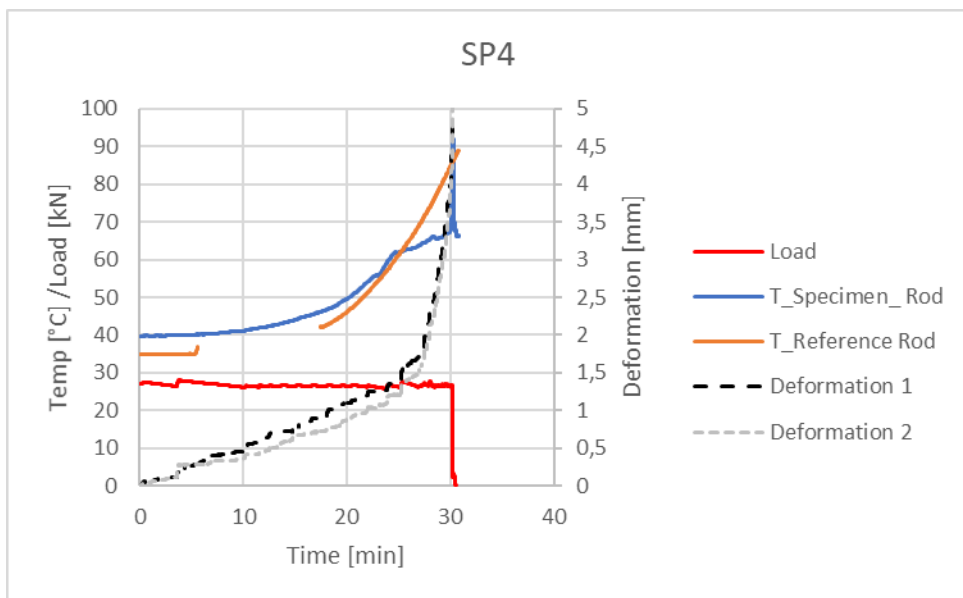


Abbildung 83: Last- / Temperatur- / Verformungskurven für Prüfkörper 4



# E Numerische Simulation

## E.1 Temperaturkurven V2.1

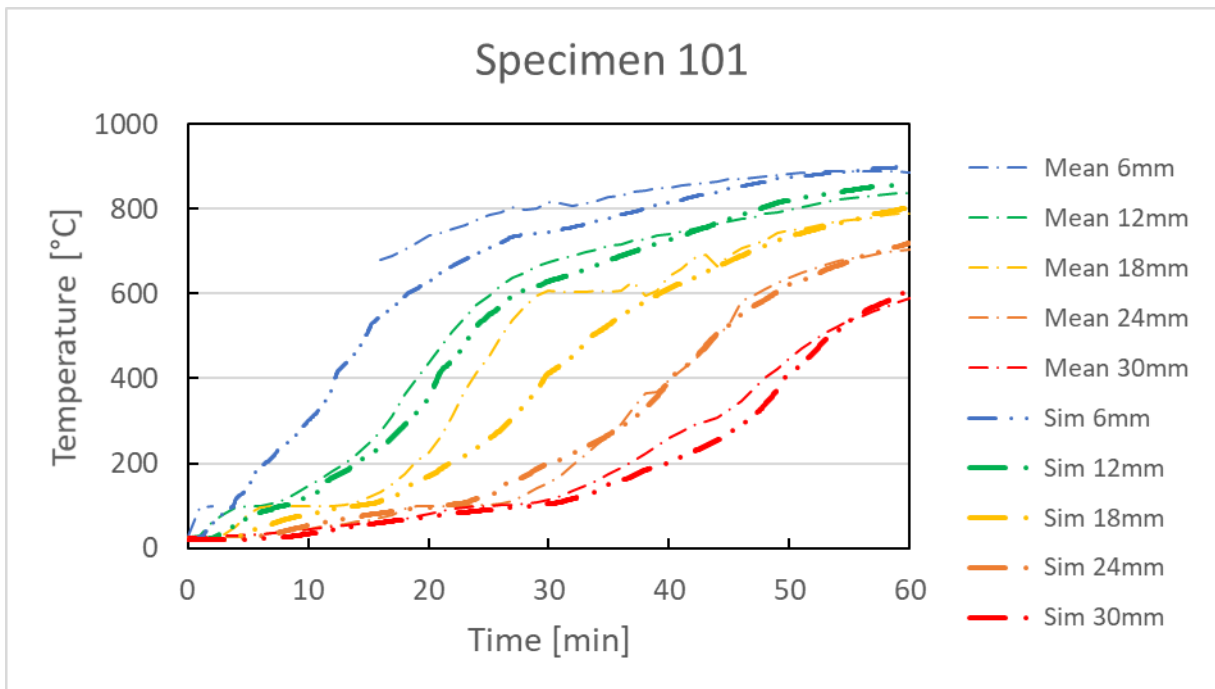


Abbildung 84: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 101 der Versuchsreihe 2.1

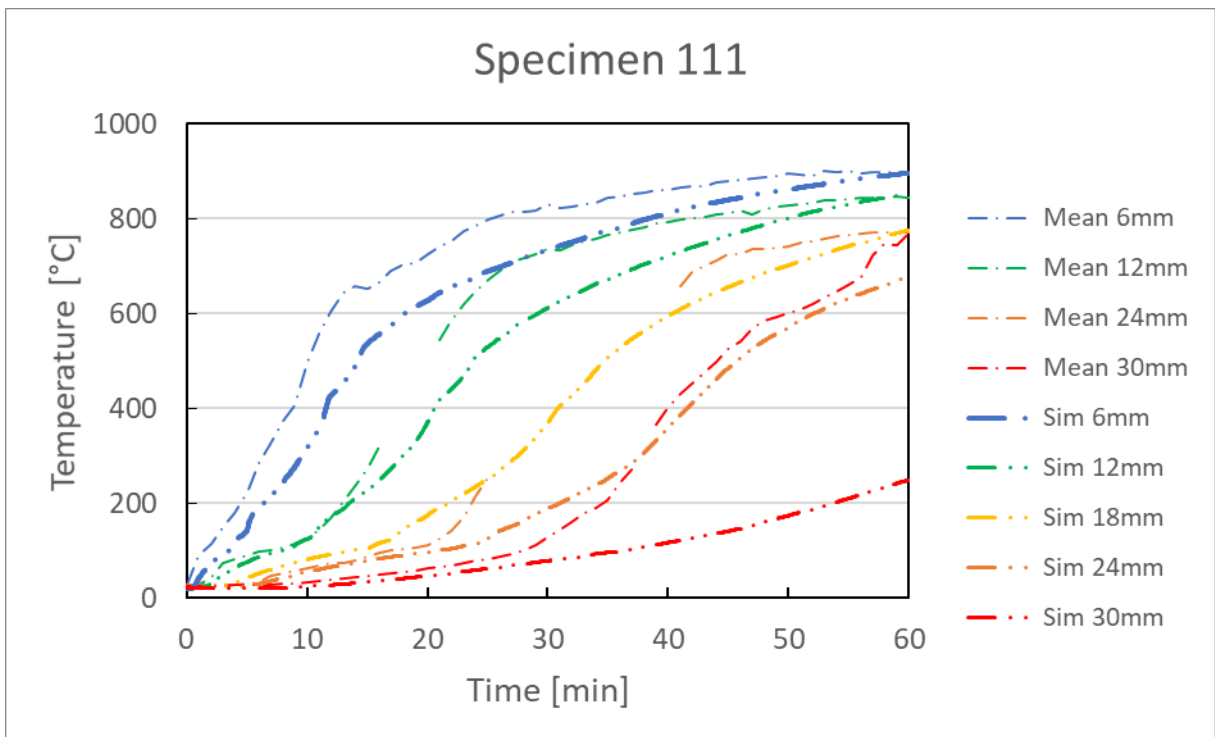
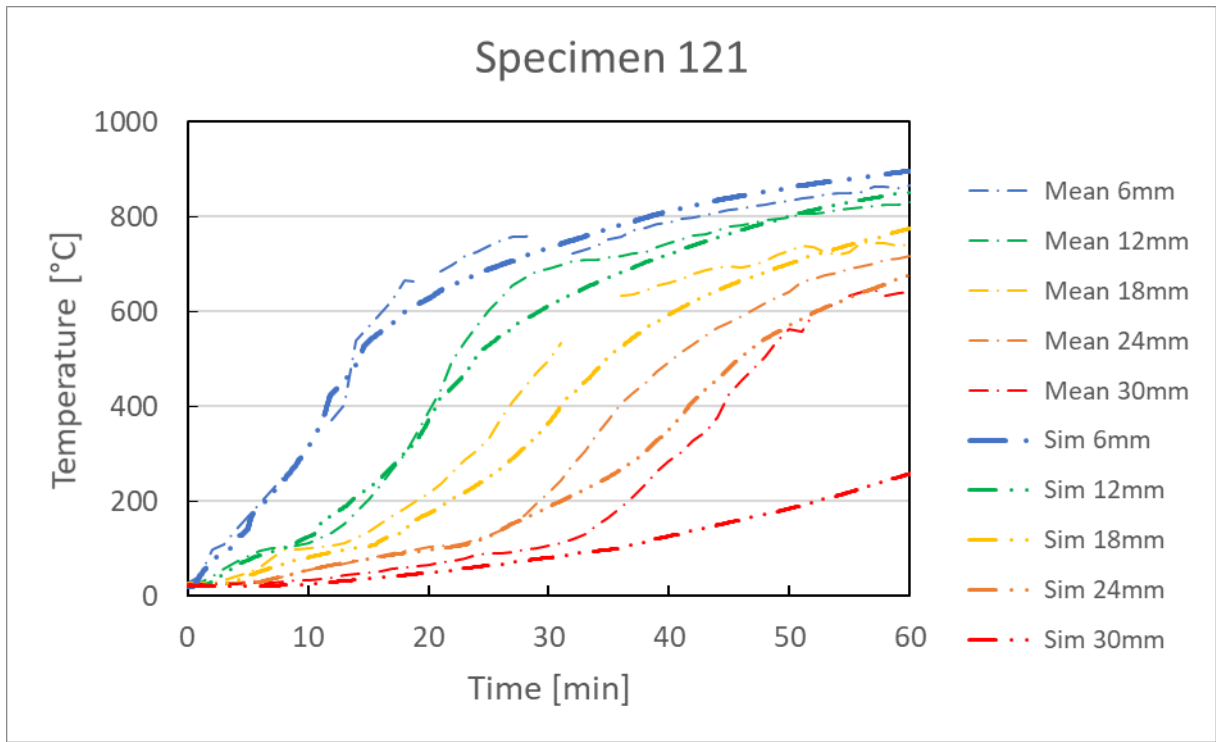
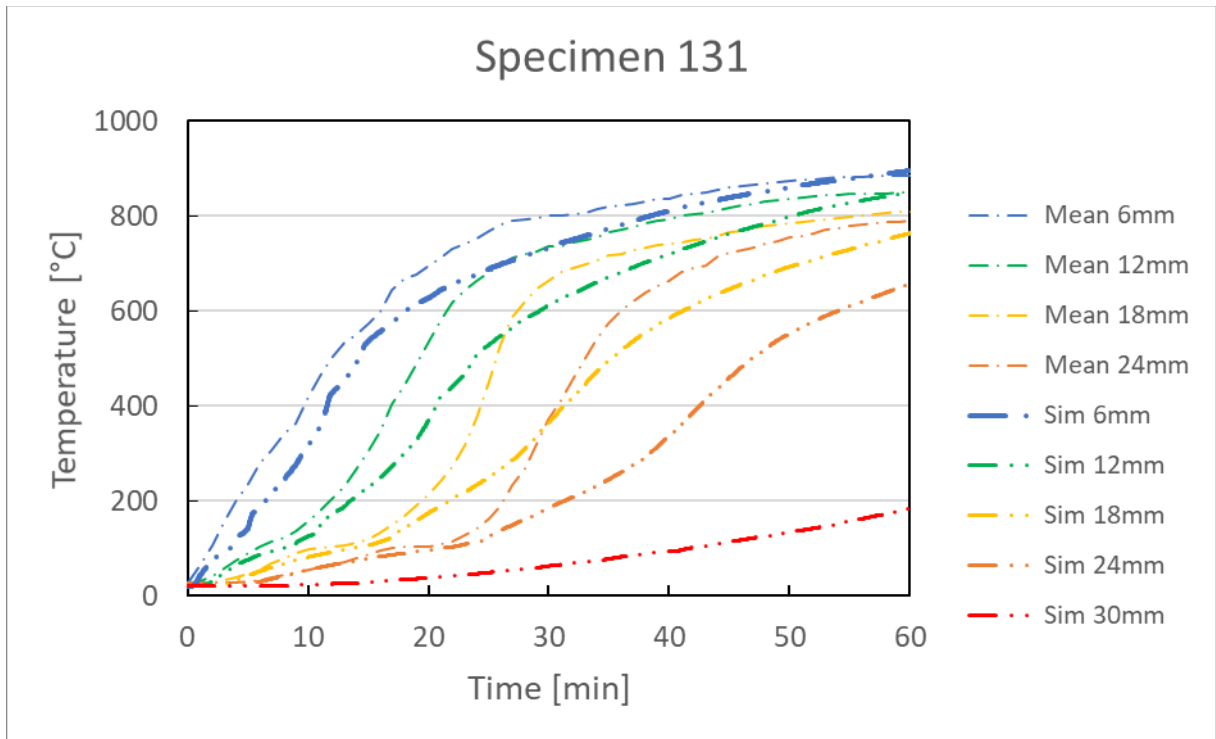


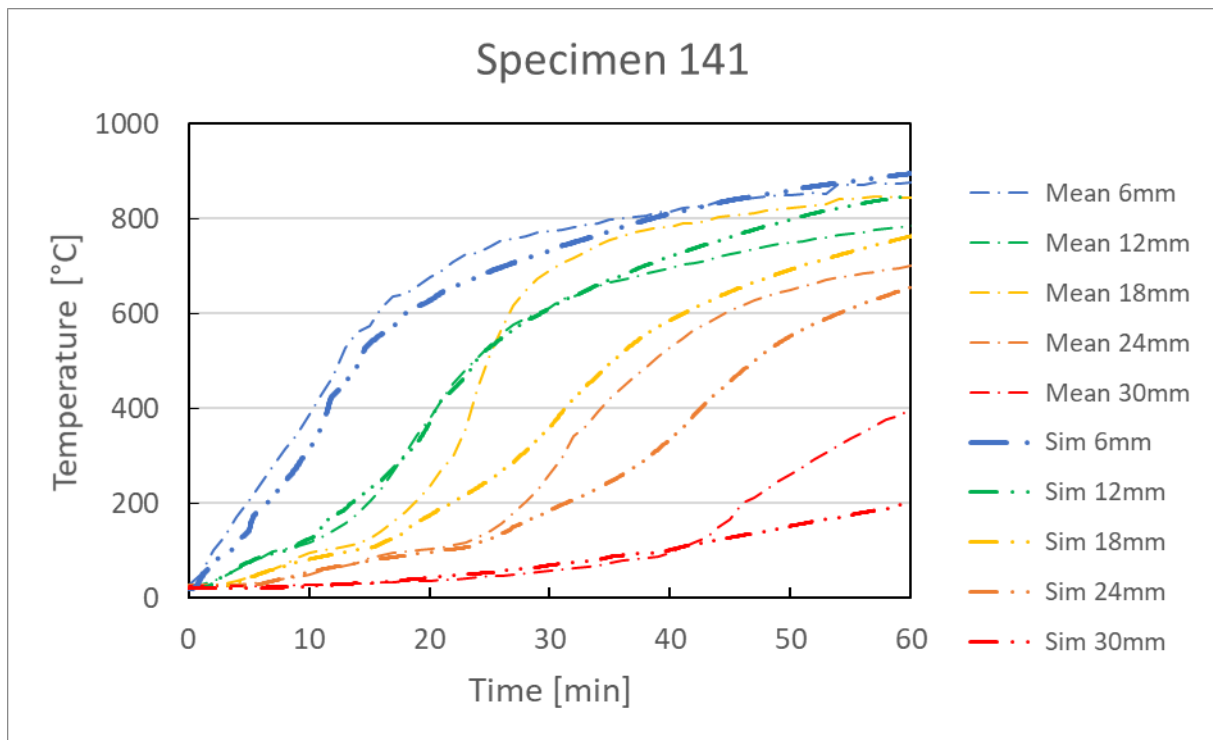
Abbildung 85: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 111 der Versuchsreihe 2.1



**Abbildung 86: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 121 der Versuchsreihe 2.1**



**Abbildung 87: Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 131 der Versuchsreihe 2.1**



**Abbildung 88:** Vergleich der Temperaturkurven aus den Messergebnissen (Mittelwerte) und der Simulation für Prüfkörper 141 der Versuchsreihe 2.1

## E.2 Temperaturkurven V4

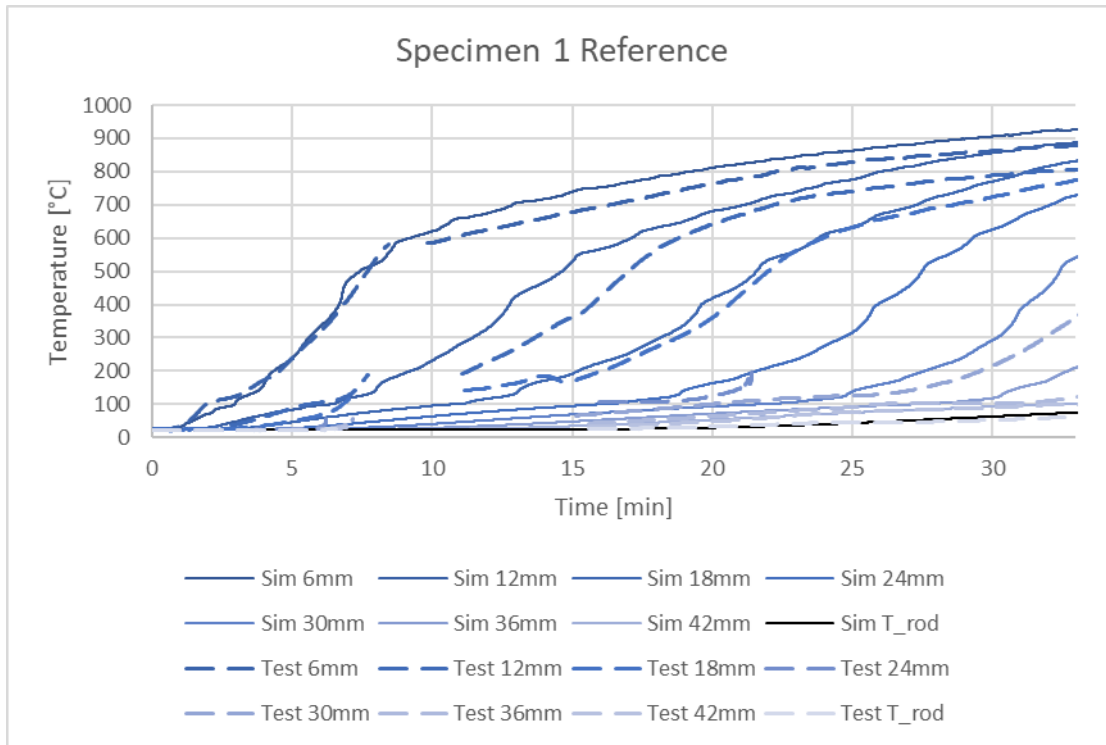


Abbildung 89: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 1

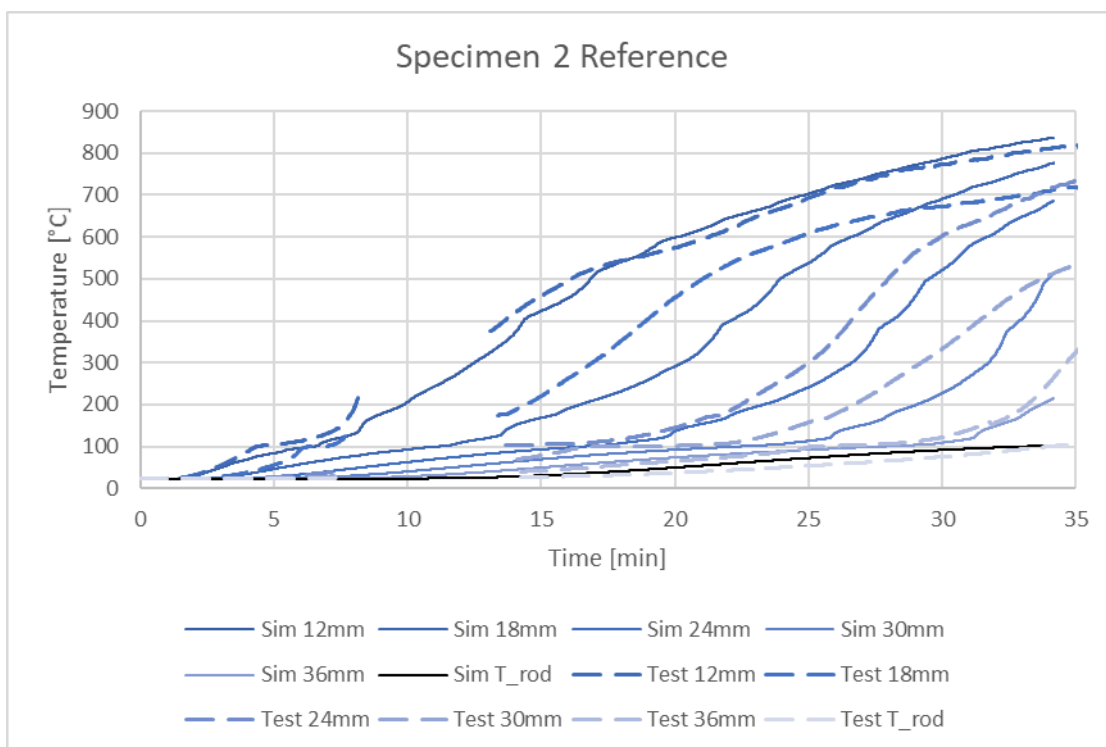
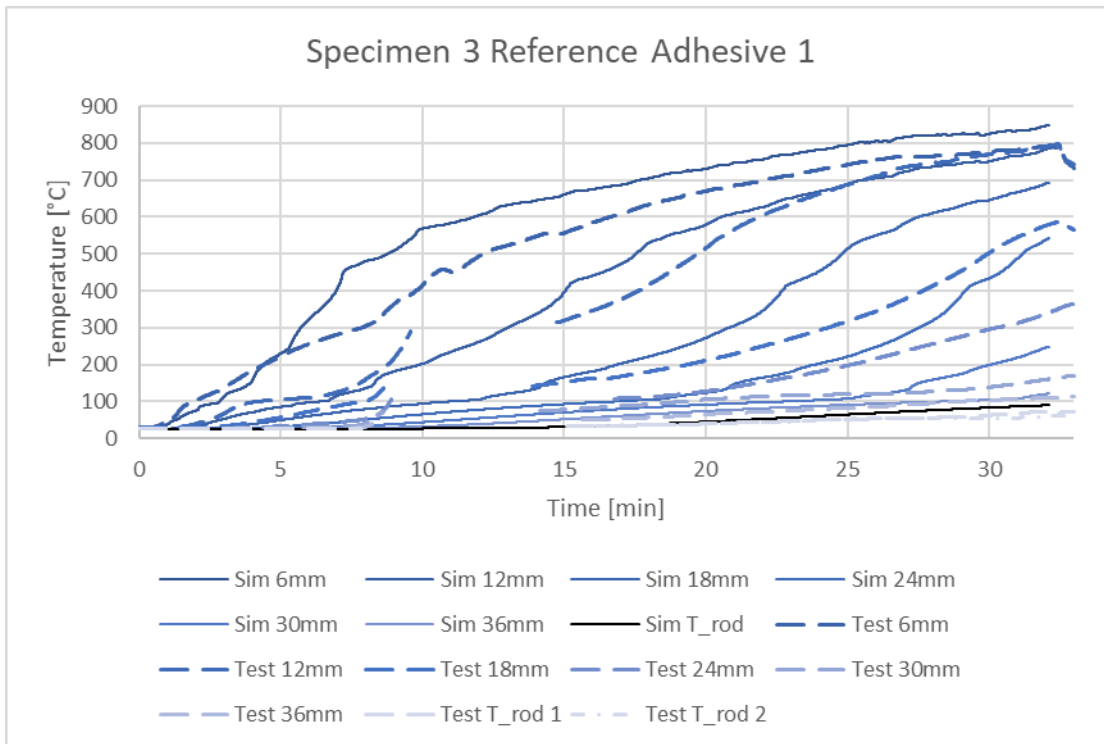
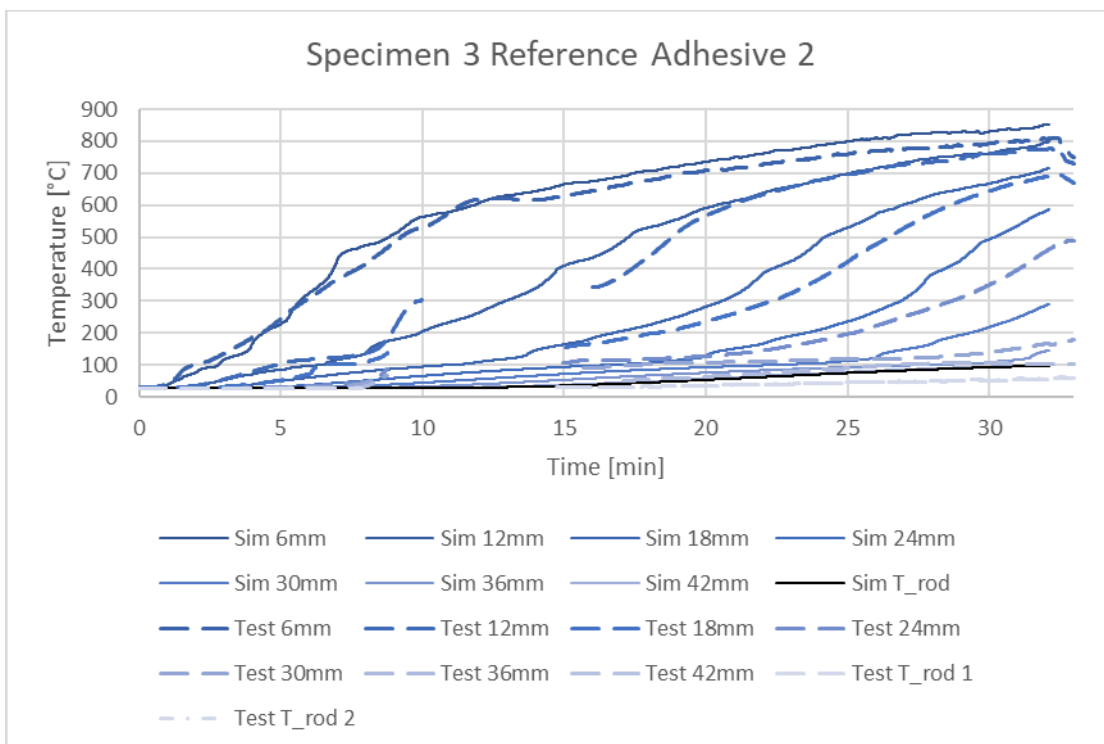


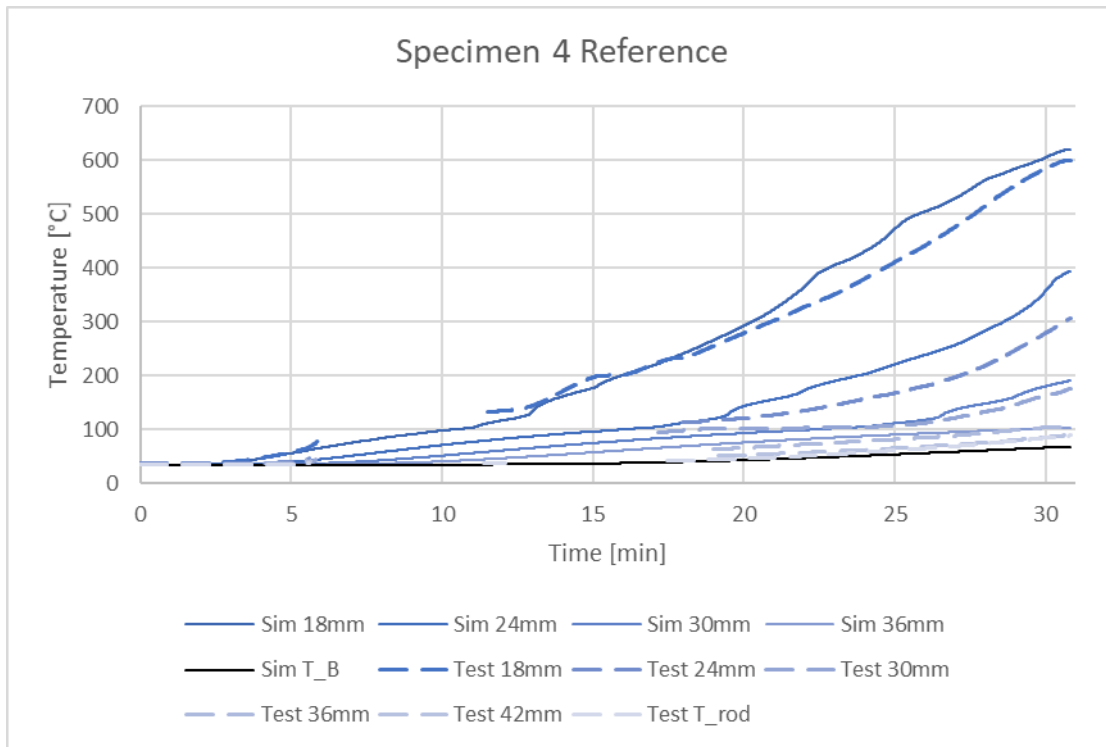
Abbildung 90: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 2



**Abbildung 91: Temperaturkurven fürsimulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 3 mit Klebstoff 1**



**Abbildung 92: Temperaturkurven fürsimulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 3 mit Klebstoff 2**



**Abbildung 93: Temperaturkurven für simulierte und gemessene Ergebnisse für Referenzprüfkörper 4**