

Norman Werther, Martin Gräfe,
Veronika Hofmann, Stefan Winter

**Untersuchungen zum
Brandverhalten von querkraft-
beanspruchten Verbindungen
bei Holzbaukonstruktionen,
Neuentwicklung und Optimierung
von Verbindungssystemen und
allgemeinen Konstruktionsregeln**

F 2938

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9470-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Untersuchungen zum Brandverhalten von querkraftbeanspruchten Verbindungen bei Holzbaukonstruktionen, Neuentwicklung und Optimierung von Verbindungssystemen und allgemeinen Konstruktionsregeln

Durchgeführt von:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. Martin Gräfe
Dipl. Ing. (BA) Veronika Hofmann M. Sc.

Projektleitung

Dipl.-Ing. Norman Werther

Laufzeit: Dezember 2012 bis Dezember 2014

gefördert durch:

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
52179 Bonn

Das Vorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-023 / SWD-10.08.18.7-12.45)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Kurzbeschreibung

Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit dem Brandverhalten und der Tragfähigkeit unter Brandeinwirkung von Haupt-Nebenträger-Anschlüssen im Holzbau. Untersucht werden insbesondere Verbindungen mit Balkenschuhen aus Stahlblech und Verbindungen mit Vollgewindeschrauben. Ziel der Untersuchungen ist es,

- Aussagen hinsichtlich einer zweckmäßigen Gestaltung solcher Verbindungen zur Erreichung bestimmter Feuerwiderstandsdauern zu treffen
- soweit erforderlich Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen abzuleiten
- Das Wissen um den Einfluss von stiftförmigen Verbindungsmitteln auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen zu erweitern,
- und somit auch Aussagen hinsichtlich des Verhaltens nicht explizit untersuchter Verbindertypen zu ermöglichen.

Hierzu werden zunächst unbelastete Brandversuche mit ausgewählten Verbindertypen durchgeführt, um deren Abbrandverhalten zu erfassen und typische Einflüsse durch die Verbindungsmittel zu bestimmen. Zudem werden durch Temperaturmessungen die Temperaturen des Holzes und der Verbindungsmittel unter Brandeinwirkung bestimmt.

Auf Basis dieser Versuche werden Verbindungskonfigurationen ausgewählt, die voraussichtlich zur Erreichung bestimmter Feuerwiderstandsdauern bei festgelegten Lasten geeignet sind. Diese Verbindungen werden anschließend unter Last einer Brandbeanspruchung ausgesetzt und durch Kraftmessung ihre Tragfähigkeit nach Ende der jeweils gewünschten Brandbeanspruchungsdauer bestimmt.

In der Auswertung wird die jeweils erreichte Brandtragfähigkeit der Kalttragfähigkeit gegenübergestellt. Aus diesen Daten und der Beurteilung der Versuchskörper werden Schlüsse gezogen, welche Geometrien und weitere Einflussfaktoren sich positiv oder negativ auf die Brandtragfähigkeit auswirken und somit für die Erzielung möglichst hoher Feuerwiderstandsdauern bzw. –tragfähigkeiten zweckmäßig anzuwenden sind.

Aus der Untersuchung verschiedener Schutzmaßnahmen in den Brandversuchen werden Empfehlungen abgeleitet, in welchen Fällen und in welcher Ausführungsart solche Maßnahmen sinnvoll sind. Die Forschungsergebnisse ermöglichen insbesondere die zielgerichtete Konzeption von Zulassungsprüfungen, welche durch die Hersteller spezifischer Verbindertypen zur Sicherstellung der baurechtlichen Verwendbarkeit durchgeführt werden können. Teile der Ergebnisse sind darüber hinaus geeignet, in zukünftige Überarbeitungen von Normen einzufließen. Die gewonnenen grundsätzlichen Aussagen zum Brandverhalten von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln können zudem dazu dienen, weitere oder neuartige Verbindertypen hinsichtlich ihres Brandverhaltens ingenieurmäßig zu beurteilen.

Abstract

This research project investigates the fire behavior and the fire resistance of primary beam – secondary beam connections in timber structures. The main objective concerns the fire-safe design of joist hangers and fully threaded screws. Aim of the investigations is to

- get predications for suitable designs of such connections for sufficient fire resistances
- give recommendations on protective measures (i. e. fire coating) if necessary
- extend the knowledge on the influence of dowel-type fasteners on the fire-loss of timber,
- and therefore facilitate predications on the behavior of similar connection types not specifically treated in this project.

As the first experimental step unloaded fire tests with selected types of connections are conducted to gather data and conceive the typical influences of fasteners on the charring behavior of the surrounding timber. The temperature distributions inside of the connections are measured by means of thermocouples mounted at crucial points like tips and heads of fasteners, metal surfaces and timber joints.

Based on that information, connection types expected to show sufficient fire resistance over the desired timespan of exposure are chosen. With these test specimens, loaded fire tests are performed. The load bearing capacity is measured at the end of the fire exposure, by increasing the initial load up to the failure load.

The failure load after the fire exposure is compared to the load bearing capacity at ambient conditions. By assessing that data and examining the remains of the test specimens, conclusions are drawn regarding influencing factors on the fire resistance. Outcome of these investigation are recommendations how to design the connections for a sufficient fire resistance.

Parallel to the loaded fire tests, several protective measures (like fire coating, covering of fasteners) are tested and assessed by temperature measurements. Recommendations on the specific type of protection measures are made and connection parameters requiring such protection determined.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau durchgeführt. Herzlich danken wir den Förderern für die Unterstützung und die Hilfe bei der Durchführung der Arbeiten.

Herzlicher Dank gilt:

- den Firmen Spax GmbH Co KG, G&H Baubeschläge GmbH, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., MERK Timber GmbH, Binderholz Deutschland GmbH für die Bereitstellung von Materialien im Rahmen der experimentellen Untersuchungen
- allen Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses für fachliche Diskussionsbeiträge, hilfreiche Anregungen und persönliches Engagement
- den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Brandversuchsstelle der MFPA Leipzig GmbH für die Mitwirkung bei der Vorbereitung und Durchführung der Brandversuche
- den studentischen Hilfskräften des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion für ihre Mitwirkung an den Forschungsarbeiten und der Erstellung dieses Schlussberichts.

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	I
Abstract	II
Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	9
1.1 Verbindungen im Ingenieurholzbau	9
1.2 Ausgangssituation	11
1.3 Ziele und Umsetzung	12
1.4 Stand der Forschung und Technik	14
1.4.1 Stand der Forschung	14
1.4.2 Stand der Technik	19
1.4.2.1 Balkenschuhe	19
1.4.2.2 Vollgewindeschrauben	23
1.5 Abgrenzung des Forschungsvorhabens	24
1.6 Hochtemperatureigenschaften von Holz und Stahl	25
2 Eigenschaften und Tragverhalten von Haupt-Nebenträger-Verbindungen.....	29
2.1 Balkenschuhe	29
2.1.1 Allgemeines	29
2.1.2 Eigenschaften von Balkenschuhen	29
2.1.3 Eigenschaften von Balkenschuhen aus geschweißten Blechen.....	30
2.1.4 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung im Kaltbemessungsfall	31
2.1.4.1 Tragverhalten	31
2.1.4.2 Bemessung	34
2.2 Vollgewindeschrauben	36
2.2.1 Allgemeines	36
2.2.2 Eigenschaften von Vollgewindeschrauben	36
2.2.3 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung	37
2.2.3.1 Tragverhalten unter Raumtemperatur.....	37
2.2.3.2 Bemessung unter Raumtemperatur	40
2.2.3.3 Bemessung von auf Herausziehen beanspruchte Schrauben unter Brandbeanspruchung.....	47
3 Versuche zur Prüfung der temperaturabhängigen Ausziehfestigkeit von Vollgewindeschrauben.....	49
3.1 Allgemeines	49
3.2 Notwendigkeit der Versuche	49
3.3 Versuchsaufbau.....	50
3.3.1 Prüfkörperaufbau	50
3.3.2 Aufbau des Versuchstandes	52

3.4	V Versuchsergebnisse	53
3.4.1	Allgemeines	53
3.4.2	Versuchsergebnisse	53
3.5	Auswertung	56
3.5.1	Auswertung der Versuchsergebnisse aus den Ausziehversuchen an Vollgewindeschrauben.....	56
3.5.2	Vergleich mit Versuchen an Holzbetonverbundschrauben.....	58
4	Unbelastete Brandversuche.....	62
4.1	Zweck der Versuche.....	62
4.2	Versuchsaufbau und -durchführung	62
4.2.1	Aufbau des Versuchstandes für die Prüfung	62
4.2.2	Allgemeiner Aufbau der Prüfkörper.....	64
4.2.2.1	Balkenschuhe	66
4.2.2.1	Vollgewindeschrauben.....	69
4.2.3	Versuchsdurchführung.....	73
4.3	V Versuchsergebnisse	76
4.3.1	Versuchsergebnisse der Balkenschuhe.....	76
4.3.1.1	Prüfkörper 2	76
4.3.1.2	Prüfkörper 5	77
4.3.1.3	Prüfkörper 6	78
4.3.1.4	Prüfkörper 8	79
4.3.1.5	Prüfkörper 1, 3, 4, 7	80
4.3.2	Versuchsergebnisse der Vollgewindeschrauben	83
4.3.2.1	Einfluss verschiedener Schraubenparameter.....	83
4.3.2.2	Einfluss verschiedener seitlicher Randabstände bei gekreuzten Vollgewindeschrauben	86
4.4	Auswertung	91
4.4.1	Schlussfolgerung und Empfehlungen aus Versuchsergebnissen für Balkenschuhe ..	91
4.4.2	Schlussfolgerung und Empfehlung aus Versuchsergebnissen für Vollgewindeschrauben	92
5	Belastete Brandversuche und zugehörige Ermittlung der Kaltrtragfähigkeit	94
5.1	Grundlagen.....	94
5.1.1	Allgemeiner Versuchsaufbau	94
5.1.2	Aufbau der Prüfkörper.....	97
5.1.2.1	Allgemeines.....	97
5.1.2.2	Holzfeuchten und Rohdichten	99
5.1.2.1	Erforderliche Tragfähigkeiten im Brandfall und bei Normaltemperatur.....	100
5.1.2.2	Balkenschuhe	102
5.1.2.3	Vollgewindeschrauben.....	103
5.2	Ermittlung der Tragfähigkeit im Kaltzustand	105
5.2.1	Zweck der Versuche	105
5.2.2	Ermittlung der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit aus Versuchen	106
5.2.3	Versuchsaufbau und -durchführung	107
5.2.3.1	Versuchsaufbau	107
5.2.3.2	Versuchsdurchführung.....	107

5.2.1	Versuchsergebnisse und Beobachtungen	108
5.2.1.1	Ergebnisse Balkenschuhe	108
5.2.1.1	Ergebnisse Vollgewindeschrauben.....	112
5.3	Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall.....	113
5.3.1	Versuchskonzept.....	113
5.3.1.1	Möglichkeiten der Lastaufbringung	113
5.3.1.2	Gewähltes Verfahren.....	115
5.3.2	Versuchsaufbau- und Versuchsdurchführung	115
5.3.2.1	Aufbau des Prüfofens	115
5.3.2.2	Eigenschaften der Prüfkörper	119
5.3.2.3	Anordnung der Temperaturmessstellen in den Prüfkörpern	120
5.3.2.4	Versuchsdurchführung.....	123
5.3.3	Versuchsergebnisse und Beobachtungen Balkenschuhe	124
5.3.3.1	Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten.....	124
5.3.3.2	Maximale Beanspruchbarkeiten	126
5.3.3.3	Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern.....	128
5.3.3.4	Temperaturmessungen	129
5.3.4	Versuchsergebnisse und Beobachtungen Vollgewindeschrauben	130
5.3.4.1	Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten.....	130
5.3.4.2	Maximale Beanspruchbarkeiten	133
5.3.4.3	Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern.....	135
5.3.4.4	Temperaturmessungen	138
6	Bewertung Schutzmaßnahmen	142
6.1	Balkenschuhe.....	142
6.1.1	Untersuchte Schutzmaßnahmen	142
6.1.2	Ergebnisse.....	143
6.2	Vollgewindeschrauben	144
6.2.1	Untersuchte Schutzmaßnahmen	144
6.2.2	Ergebnisse.....	146
7	Numerische Parameterstudien an Vollgewindeschrauben.....	149
7.1	Vorgehensweise	149
7.2	Verwendete Ausgangsparameter	149
7.2.1	Allgemeines	149
7.2.2	Rohdichte	149
7.2.3	Spezifische Wärmespeicherkapazität	150
7.2.4	Wärmeleitfähigkeit.....	151
7.2.5	Wärmeübertragung	152
7.2.6	Beanspruchung des Modells	152
7.3	Validierung des gewählten Simulationsmodells	153
7.3.1	Allgemeines	153
7.3.2	Vergleich der Schraubentemperaturen	153
7.3.3	Vergleich der Verkohlungstiefen	154
7.4	Parameterstudien	156
7.5	Schlussfolgerung aus den Parameterstudien	160
7.6	Abschätzung der Ausziehfestigkeiten	161

8	Bewertung und Schlussfolgerung	165
8.1	Balkenschuhe	165
8.1.1	Typisches Brandverhalten der Verbindungen	165
8.1.2	Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau	165
8.1.3	Bemessungsansätze	166
8.1.4	Beurteilung von Balkenschuhen aus dicken verschweißten Stahlblechen	167
8.1.5	Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen	168
8.2	Vollgewindeschrauben	169
8.2.1	Typisches Brandverhalten der Verbindungen	169
8.2.2	Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau	169
8.2.3	Bemessungsansätze	170
8.2.4	Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen	171
8.2.5	Schlussfolgerung	173
9	Zusammenfassung und Ausblick	177
10	Literaturverzeichnis	179
10.1	Zitierte Literatur	179
10.2	Normen und Regelwerke, Software	182
10.3	Prüfberichte zum Forschungsvorhaben	183
11	Anhang	184
11.1	Ausziehversuche an Vollgewindeschrauben	184
11.1.1	Maximale Ausziehfestigkeit	184
11.1.1.1	Maximale Ausziehfestigkeit senkrecht zur Faser	184
11.1.1.2	Maximale Ausziehfestigkeit parallel zur Faser	185
11.1.1.3	Maximale Ausziehfestigkeit unter 45° zur Faser	185
11.1.2	Auswertung	186
11.1.2.1	Senkrecht zur Faser	186
11.1.2.2	Parallel zur Faser	187
11.1.2.3	Unter 45° zur Faser	188
11.2	Temperaturmesswerte Balkenschuhe	189
11.2.1	Unbelastete Brandversuche	189
11.2.2	Belastete Brandversuche	192
11.3	Temperaturmesswerte Schrauben	195
11.3.1	Unbelastete Brandversuche	195
11.3.2	Belastete Brandversuche	204
11.4	Bilder Schnitte unbelastete Brandversuchskörper	208
11.4.1	Schraubenverbindung 6.1- 30 Minuten	208
11.4.2	Schraubenverbindung 6.3- 30 Minuten	209
11.4.3	Schraubenverbindung 6.5- 30 Minuten	209
11.4.4	Schraubenverbindung 12.1- 30 Minuten	210
11.4.5	Schraubenverbindung 12.3- 30 Minuten	211
11.4.6	Schraubenverbindung 12.5- 30 Minuten	212
11.4.7	Schraubenverbindung 6.1- 60 Minuten	213
11.4.8	Schraubenverbindung 6.2- 60 Minuten	213
11.4.9	Schraubenverbindung 6.3- 60 Minuten	214

11.4.10 Schraubenverbindung 6.4- 60 Minuten	215
11.4.11 Schraubenverbindung 6.5- 60 Minuten	216
11.4.12 Schraubenverbindung 12.1- 60 Minuten	217
11.4.13 Schraubenverbindung 12.3- 60 Minuten	218
11.4.14 Schraubenverbindung 12.4- 60 Minuten	219
11.4.15 Schraubenverbindung 12.5- 60 Minuten	220
11.5 Bilder Schnitte belastete Brandversuchskörper.....	221
11.5.1 Balkenschuhe.....	221
11.5.1.1 B1.....	221
11.5.1.2 B2.....	225
11.5.1.3 B3.....	228
11.5.1.4 B3a.....	232
11.5.1.5 B4.....	235
11.5.2 Schrauben	239
11.5.2.1 S1.....	239
11.5.2.2 S2.....	242
11.5.2.3 S3.....	245
11.5.2.4 S4.....	248
11.6 Lastdiagramme Prüfungen im Kaltzustand	252
11.6.1 Balkenschuhe.....	252
11.6.2 Schrauben	255
11.7 Lastdiagramme belastete Brandversuche	256
11.7.1 Balkenschuhe.....	256
11.7.2 Schrauben	258
11.8 Schutzmaßnahmen	260
11.8.1 Vollgewindeschrauben.....	260

1 Einleitung

1.1 Verbindungen im Ingenieurholzbau

Bauteilanschlüsse im Holzbau wurden traditionell mit zimmermannsmäßigen Verbindungen hergestellt. Diese beruhen im Wesentlichen auf der Übertragung von Druckkräften in formschlüssigen Fügungen und zeichnen sich dadurch aus, dass sie ohne Metallbauteile auskommen und sich mit Handwerkzeugen relativ leicht fertigen lassen (vgl. Abbildung 1-1). Nachteil dieser Verbindungstypen ist in der Regel eine mehr oder weniger große Schwächung der verbundenen Holzquerschnitte. Die Tragfähigkeit ist daher begrenzt, außerdem sind die Steifigkeiten oft verhältnismäßig gering.

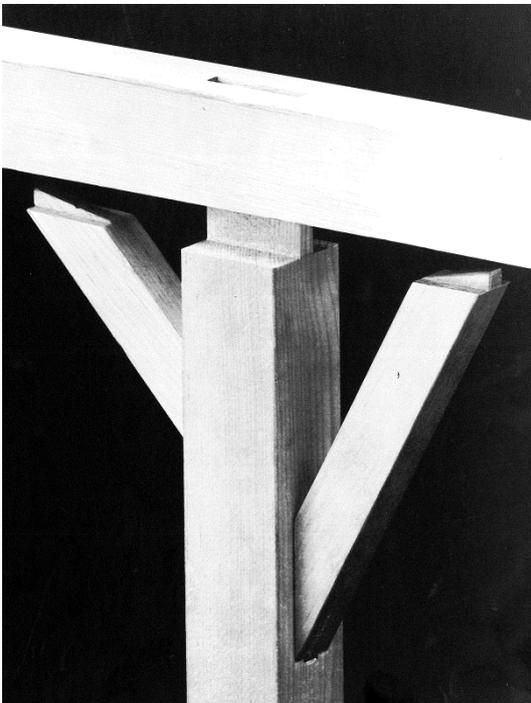


Abbildung 1-1 Traditionelle zimmermannsmäßige Holzverbindung (Kopfbandanschluss mit Zapfen), entnommen aus [16]

Im modernen Ingenieurholzbau kommen daher heute vorwiegend industriell gefertigte Bauteilverbinder aus Stahl- oder Aluminiumformteilen und zunehmend geschraubte Anschlüsse sowie über CNC Technik gefräste Holz-Holz Passverbindungen zur Anwendung. Diese ermöglichen eine Vielzahl von Anschlussgeometrien, die Übertragung sehr großer Kräfte, die Verringerung der Bauhöhen durch ebenengleiche Stöße sowie die Verkürzung des Bauablaufs, was zur Effizienzsteigerung und Kostenminimierung beiträgt.

Diese Bauteilanschlüsse kommen im Geschloßwohnungsbau aber auch bei gewerblich, industriell und öffentlich genutzten Ingenieurholzbauwerken mit großen Spannweiten zur An-

wendung. Unabhängig von der Nutzung können die eingesetzten Verbindungen zur planmäßigen Übertragung von Querkräften üblicherweise in

- Anschlüsse mit Balkenschuhen,
- Anschlüsse mit Balkenträgern
- geschraubte Anschlüsse
- Stabdübelverbindungen
- gefräste Holz-Holz Passverbindungen
- Schlitzblechverbindungen

unterschieden werden. (vgl. Abbildung 1-2).



Balkenschuhe

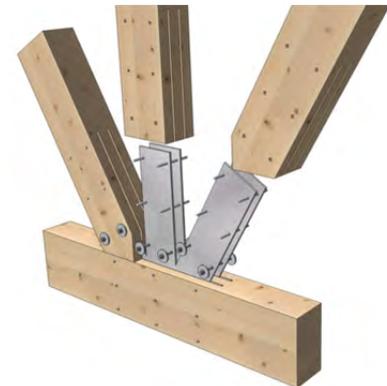
Balkenträger

Geschraubte Verbindungen



Stabdübelverbindung

Schwalbenschwanz



Schlitzblechverbindung

Abbildung 1-2: Haupt-Nebenträger-Verbindungen

Die Wirkung der ersten vier Verbindungstypen beruht auf der Kraftübertragung durch stiftförmige Verbindungsmittel, welche auf Abscheren und Herausziehen beansprucht werden. Bei Balkenschuhen und Balkenträgern werden zusätzlich zu den stiftförmigen Verbindungsmitteln weitere Metallbauteile zur Kraftübertragung verwendet. Gefräste Schwalbenschwanzverbindungen stellen einen Sonderfall dar, da sie ohne zusätzliche Verbindungsmittel auskommen. Es handelt sich insoweit um eine zimmermannsmäßige Verbindung, mit dem Unterschied, dass die Herstellung einer exakten Geometrievorgabe folgt und daher auf Basis von Bemessungsformeln ingenieurmäßig berechnet werden kann.

Ingenieurmäßige Holzverbindungen erreichen Tragfähigkeiten im Bereich der Beanspruchbarkeit der angeschlossenen Holzquerschnitte. Die Auswahl eines Verbinders für den jeweiligen Anwendungsfall wird in der Regel durch wirtschaftliche und gestalterische Gesichtspunkte sowie durch Aspekte der Tragfähigkeit und Montage bestimmt.

1.2 Ausgangssituation

Aktuell ist festzustellen, dass seitens öffentlicher und privater Bauherren sowie Architekten Holzbauweisen verstärkt nachgefragt werden. Im Wohnungsbau, aber vor allem auch in repräsentativen Veranstaltungs-, Zweck- und Industriebauen sollen dabei gleichzeitig die optischen und haptischen Vorzüge von Holz, z.B. über sichtbare Tragwerke genutzt werden. Hierbei sind wie bei jedem Baustoff die sicherheitstechnischen Aspekte des Brandschutzes zu beachten. Über nationale und europäische Bemessungsnormen, wie DIN 4102-4 bzw. -22 und EN 1995-1-2 (Eurocode 5 Teil 1-2) können geschützte und ungeschützte Holzbauteile in Bezug auf ihre notwendige Feuerwiderstandsdauer bemessen werden. Allgemeine normative Aussagen über das Brandverhalten von Bauteilanschlüssen, die im Brandfall einen erheblichen Einfluss auf das Versagensverhalten des Bauteils und vor allem der Gesamtkonstruktion aufweisen sowie baurechtliche Verwendbarkeitsnachweise liegen aktuell jedoch nur in sehr begrenztem Umfang vor.

Eine brandschutztechnische Bewertung von Bauteilanschlüssen zur planmäßigen Übertragung von Querkräften, welche eindeutig den größten Teil der Bauteilverbindungen und -anschlüsse im Holzbau ausmachen, ist somit häufig nur versuchstechnisch und damit mit hohem Kostenaufwand möglich und wird bei der Planung und Ausführung meist nicht bzw. nur sehr ungenügend berücksichtigt. Erfolgt eine Berücksichtigung dieser brandschutztechnischen Anforderungen, führt dies dann zu konstruktiv äußerst aufwändigen Anschlüssen bzw. im Einzelfall zum Ausschluss der Holzbauweise infolge dieses zusätzlichen Aufwandes. Allgemeine Aussagen zu Einflussgrößen, den möglichen Versagensmechanismen, kompensatorischen Maßnahmen, allgemeine Bemessungsansätze, brandschutztechnische Konstruktionsdetails und damit Angaben zum Feuerwiderstand von Haupt-Nebenträger und Stützen-Träger-Verbindungen bei Holzbaukonstruktionen liegen derzeit nur sehr begrenzt und unzureichend vor. Zudem muss die sicherheitsrelevante Tragfähigkeit im Brandfall bei einigen bisher ausgeführten Konstruktionen ebenfalls hinterfragt werden.

Werden an die Anschlüsse der damit realisierbaren räumlichen Holztragwerke brandschutztechnische Anforderungen gestellt, können diese jedoch über die zugehörigen brandschutztechnischen Bemessungsnormen (DIN 4102-22 und EN 1995-1-2) nicht oder nur für eine geringe Anzahl von Einzelfällen nachgewiesen werden. Die möglichen Nachweise beschränken sich damit auf symmetrisch aufgebaute Anschlüsse mit eingeschlitzten Blechen, wie

Balkenträgern, für einen Feuerwiderstand von bis zu 60 Minuten. Für alle anderen Anschlüsse, mit außenliegenden Formteilen (Balkenschuhe), geschraubte Verbindungen und verdeckt liegende Balkenträger, die in Bereichen an den Holzbauteile anliegen, in diese eingreifen bzw. von diesen überdeckt sind, liegen keine allgemeinen Bemessungsregeln vor. Für diese Mehrzahl der Ausführungen kommen zur brandschutztechnischen Beurteilung gutachterliche Stellungnahmen für jedes spezifische Bauvorhaben mit aufwändigen Ertüchtigungsvorschlägen und zugehöriger Zustimmungen im Einzelfall zur Anwendung. Wissenschaftlich abgesicherte Hintergründe zum Tragverhalten dieser Anschlussdetails unter Brandbeanspruchung liegen jedoch auch diesen Beurteilungen oftmals nicht zu Grunde, wodurch die Vergleichbarkeit der bestehenden Anschlüsse im Niveau des Feuerwiderstandes kritisch hinterfragt werden muss.

Für Holzbaukonstruktionen mit hohem Vorfertigungsgrad, die im Vergleich zu anderen Bauweisen neben dem ökologischen Aspekt mit geringem Primärenergieverbrauch und dauerhafter CO₂-Speicherung auch einen höheren ästhetischen Anspruch aufweisen sowie eine kostengünstige Fertigung und Bauablauf ermöglichen, entstehen infolge der nicht geregelt nachweisbaren Feuerwiderstandsdauer deutliche Nachteile. Die Vorteile der wirtschaftlichen Vorfertigung sowie kurzen Bauzeit derartiger Holzkonstruktionen werden durch den Mehraufwand in der Genehmigungsphase aufgehoben und führen zu Wettbewerbsnachteilen von klein- und mittelständischen Holzbauunternehmen (kmU) sowie einer verringerten Anwendung der Holzbauweise.

1.3 Ziele und Umsetzung

Zur Wahrung des bauaufsichtlichen brandschutztechnischen Sicherheitsstandards wurden in den letzten Jahren nationale und europäische Bemessungsregeln erarbeitet und weiterentwickelt, die eine erweiterte brandschutztechnische Klassifikation von Bauteilen ermöglichen. Für Holzbauteile liegt hierbei der Fokus besonders auf der Bestimmung des Abbrand- und Tragverhaltens stabförmiger Holzbauteile, wie Träger und Stützen. Aussagen zur brandschutztechnisch sicheren Ausbildung von Bauteilanschlüssen bei Tragwerken in Holzbauweise liegen dagegen nur unvollständig vor.

Ziel der nachstehenden Untersuchungen ist es daher, die thermomechanischen Eigenschaften stabförmiger Holzbauteile im Bereich querkraftbeanspruchter Anschlüsse unter Brandbeanspruchung besser zu erfassen und daraus entsprechende, schutzzielorientierte brandsichere Bauteilanschlüsse für Haupt-Nebenträger-Verbindungen und Stützen-Träger-Anschlüsse zu entwickeln. Hierbei werden bestehende Systeme von Balkenschuhen und geschraubten Anschlüssen (Balkenträger) untersucht, bewertet und optimiert sowie in einigen Fällen notwendige bzw. sinnvolle Ertüchtigungsmaßnahmen entwickelt. Auf Basis dieser

Forschungsergebnisse wird eine geregelte Anwendung dieser Verbindungstypen bei Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer möglich.

Für die Bearbeitung wird das Vorhaben in die folgenden Hauptabschnitte gegliedert:

- Erfassung der praktischen Randbedingungen, typischen Anwendungsfälle, typischen Lasten und Abmessungen der Verbinder
- Auswahl konkreter und für die Gesamtheit möglichst repräsentativer, im weiteren Verlauf zu untersuchender Verbindungstypen
- Konzeption, Planung und Durchführung unbelasteter Brandversuche an den ausgewählten Verbindern zur Bestimmung von Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung und voraussichtliche Brandtragfähigkeit
- Auf Basis dieser Versuche: Festlegung von Verbindungstypen für belastete Brandversuche, die den gestellten Anforderungen voraussichtlich entsprechen
- Planung Durchführung und Auswertung belasteter Brandversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit ausgewählter Verbindungstypen nach 30 bzw. 60 Minuten Brandeinwirkung
- Formulierung von Empfehlungen für die zweckmäßige Gestaltung der untersuchten Verbindungstypen
- Auswahl und Empfehlung von Schutzmaßnahmen zur Verbesserung der Feuerwiderstandsfähigkeit

Als Leitlinie bei der Bearbeitung des Vorhabens wurden die folgenden Fragestellungen identifiziert:

- Welche Temperaturbeanspruchung und damit welches Abbrandverhalten treten im Bauteilanschluss unter Brandbeanspruchung auf?
- Bei welchen Randbedingungen kann für geschützt liegende Bauteilanschlüsse, wie Vollgewindeschrauben und verdeckte Balkenträger unter Berücksichtigung der Holzüberdeckung und des Abbrandverhaltens von Holz ohne weitere Maßnahmen eine ausreichende Schutzwirkung erzielt werden?
- Welchen Einfluss haben freiliegende Bauteilverbinder und metallische Verbindungsmittel, wie Balkenschuhe, Schrauben, Nägel und Stabdübel auf das Abbrandverhalten von Holz im Anschlussbereich und das Trag- und Verformungsverhalten?
- Unter welchen Randbedingungen werden konstruktive Schutzmaßnahmen notwendig?

- Welche Schutzmaßnahmen können ggf. unter Beachtung konstruktiver und wirtschaftlicher Aspekte zur Anwendung kommen?

1.4 Stand der Forschung und Technik

1.4.1 Stand der Forschung

Nachfolgende Arbeiten zeigen wesentliche Erkenntnisse zu brandbeanspruchten Holzbauelementverbindungen und stellen eine wichtige Grundlage für dieses Forschungsprojekt dar.

Frangi, 2001 [11]

Frangi untersuchte das Brandverhalten von belasteten Holz-Beton-Verbunddecken und entwickelte dafür experimentell abgesicherten Tragmodelle zum Brandverhalten von Verbundmitteln für Holz-Beton-Verbunddecken. In einem Teil der Arbeit (Kapitel 3) wurde das Brandverhalten der Verbindung zwischen Beton und Holz mit Verbundschrauben untersucht.

In Versuchen wurde das Verbundelement VB-48-7.5x100 der Firma SFS AG aus Heerbrugg verwendet. Es handelt sich dabei um eine selbstschneidende Holzbetonverbundschraube, die direkt ohne Vorbohrung durch die Schalung in das Holz geschraubt wird. In den Untersuchungen wurde das Brandverhalten der Verbindung bei Zug- und Scherbeanspruchung geprüft. Die Auszieh- und Scherwiderstände wurden in Versuchen unter konstanter Temperatur (Aufwärmung der Prüfkörper im Ofen auf bestimmte Temperaturen und anschließende mechanische Beanspruchung) bzw. unter ISO-Normbrandeinwirkung im Brandofen ermittelt. Beim Vergleich der Versuchsergebnisse zeigte sich, dass die temperaturbedingte Festigkeitsabnahme der Verbindung bei Versuchen unter ISO-Normbrandbedingungen deutlich grösser ist, als bei Versuchen bei konstanter Temperatureinwirkung. Bei einer Temperatur von ca. 105°C beträgt die Festigkeit bei konstanter Temperatureinwirkung 75% der Festigkeit bei Raumtemperatur, bei instationärer Temperatureinwirkung nur noch etwa 45%. Ein möglicher Grund für die festgestellten großen Unterschiede könnte die Wirkung der Austrocknung auf die Holzeigenschaften sein, und zwar in der Art, dass die Kohäsion des Holzes und damit auch die Steifigkeit und Festigkeit des Holzes mit fortschreitender Austrocknung zunimmt.

Im Weiteren wurde ein Berechnungsmodell zur Ermittlung der Tragfähigkeit entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells wurde der rechnerische Tragwiderstand der Verbindung für alle durchgeführten Brandversuche berechnet. Im nächsten Schritt wurde das Modell mit den Versuchswerten aus den Brandversuchen verglichen. Da mit Hilfe von vereinfachten linearen Stoffgesetzen keine befriedigende Übereinstimmung zwischen Modellberechnungen und Versuchsergebnissen erzielt wurde, untersuchte er in einem zweiten Schritt ein vereinfachtes bilineares Stoffgesetz. Das bilineare Stoffgesetz mit einem Knickpunkt bei 100°C zeigte eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Modellberechnungen und Versuchsergebnissen.

Aus diesen Ergebnissen leitete er Gleichungen zur Ermittlung des Tragwiderstandes von Holzbetonverbundschrauben unter Brandbeanspruchung ab.

Povel, 2002 [28]

Povel untersuchte das Tragverhalten stiftförmiger Verbindungsmittel im Brandfall und entwickelte auf Basis theoretischer Überlegungen ein Rechenmodell zur Beurteilung der Tragfähigkeit zweischnittiger Stabdübelverbindungen unter Beanspruchung in Stabachse.

Hierfür wurden FE-Simulationen zur Temperaturverteilung entlang der Verbindungsmittel erstellt. Mit Hilfe der in der Simulation gewonnenen Temperaturverläufe wurde unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte das Johansen-Modell erweitert.

Vergleichsberechnungen aus entwickelten Algorithmen zur Bestimmung der Tragfähigkeit stimmten sehr gut mit Versuchsergebnissen überein.

In dieser Arbeit wurden unter anderem Stabdübel mit verschiedenen Längen und Durchmessern für Branddauern von 30 und 60 Minuten und der Einfluss der seitlichen Holzüberdeckung untersucht.

Der Einfluss des Durchmessers und der Verbindungsmittellänge wurde folgendermaßen beschrieben:

- Bei größeren Durchmessern findet ein größerer Wärmeausgleich über das Verbindungsmittel statt, so dass im Inneren höhere und außen geringere Temperaturen als bei kleinen Durchmessern festgestellt werden können.
- Bei kürzeren Stabdübeln sind überproportional höhere Temperaturen als bei längeren festzustellen. Dies ist auf die gegenseitige Beeinflussung der brandbeanspruchten Enden des Stabdübels zurückzuführen.
- Der Einflussbereich des einzelnen Stabdübels auf die Holztemperaturen ist nahezu unabhängig vom Durchmesser.

Fornather, 2003 [13]

In der Dissertation von Herrn Jochen Fornather wird der Einfluss von stiftförmigen Verbindungsmitteln und Stahlblechen in Holz untersucht. Geprüft wurden verschiedene Aufbauten mit einer Branddauer von 30, 60 und 90 Minuten. Hier wird ebenfalls eine Abhängigkeit des Abbrandes von der thermischen Speicherfähigkeit der verbauten Stahlteile und zusätzlich eine Abhängigkeit des Abbrandes von der Branddauer festgestellt. Zu den Prüfungen mit Stabdübeln unterschiedlichen Durchmessers und Schlitzblechen mit verschiedenen Dicken schreibt er: „Mit steigender Blechstärke beziehungsweise Stabdübeldurchmesser und mit längerer Branddauer nimmt generell der Abbrand zu. Insbesondere die Branddauer ist sehr wesentlich, was die Auswertung für Bleche zeigt: Hier konnte bei 30 min ein geringerer Ab-

brand bei größerer Blechdicke gemessen werden. Mit längerer Branddauer kehrt sich dieser Trend aber wieder um.“

Bauer, 2010 [2]

Bauer untersuchte in Brandprüfungen schwalbenschwanzförmige Verbinder aus Aluminium [2]. Mit Hilfe dieser Versuche sollten Grundlagen erarbeitet werden, um zukünftig eine mögliche Einordnung in die Feuerwiderstandsklasse F30 für diese Verbinder zu ermöglichen. Mit den kleinsten Schwalbenschwanzverbinder des Verbindungstyps G der Firma Pitzl und des größten Verbindungstyps Typ F wurden insgesamt 4 Brandversuche durchgeführt, bei welchen die Probekörper jeweils 30 beziehungsweise 60 Minuten durch die Einheitstemperaturkurve gemäß DIN EN 1363-1 [46] beansprucht wurden. Die Versuche unterschieden sich zusätzlich in den Dimensionen der verbauten Nebenträger.

Für die schwalbenschwanzförmigen Aluminiumverbinder wurden folgende Empfehlungen ausgearbeitet:

- Eine Mindestholzüberdeckung des Verbinders von 30 mm für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten und von 38 mm für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ist zu allen Seiten hin einzuhalten.
- Der Hauptträger muss mindestens die Höhe des Nebenträgers aufweisen.
- Die Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger darf nicht breiter als 1 mm sein.
- Bei Stützenanschlüssen muss die Stütze mindestens so breit wie der Nebenträger sein.

Ferner untersuchte er in 30 und 60-minütigen Brandversuchen ungeschützte Verbindungsmittel, die eine Stahlplatte mit einem Holzbauteil verbinden. Hierbei verwendete er verschiedene Blechdicken, um den Einfluss der Blechdicke auf das Abbrand- und Durchwärmungsverhalten von darunterliegenden Holzbauteilen zu untersuchen. Als Verbindungsmittel wurden Nägel und Gewindebolzen eingesetzt. Zur Untersuchung der Auswirkung weiterer Schutzmaßnahmen wurde im Versuch mit 60 Minuten Brandbeanspruchung eine der Stahlplatten mit einem intumeszierenden Anstrich versehen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass sich die Wahl eines größeren Querschnittes der Verbindungsmittel bei kurzer Brandbeanspruchung günstig auf die Temperatur des Verbindungsmittels auswirkt, bei längerer Temperaturbeanspruchung sind jedoch Verbindungsmittel mit kleinerem Querschnitt von Vorteil. Außerdem sind große Einbindelängen im Holz aus brandschutztechnischer Sicht zu empfehlen.

Stahlplatten sollten möglichst dick gewählt werden, um eine zusätzliche Schutzwirkung für das dahinter liegende Holz zu erhalten.

Die Verwendung von schaubildenden Brandschutzanstrichen auf den Stahlteilen eines Hauptnebenträgerverbinders ist ebenfalls zu empfehlen. Durch die entstehende Schaumschicht ergibt sich nicht nur eine Schutzwirkung für das dahinter liegende Holz, auch der Temperatureintrag durch Verbindungsmittel in das Holz, welche nicht beschichtet wurden, verringert sich. Zudem wird die Entfestigung der Verbindungsmittel durch hohe Temperaturen verzögert.

Im Weiteren wurden Versuche mit Branddauern von 30 und 60 Minuten zur Untersuchung von verdeckten Verbindungsmittel durchgeführt. Diese kommen beispielsweise bei Balkenschuhen mit innenliegenden Laschen zum Einsatz. In den Versuchen wurden geschweißte Stahlteile eingesetzt, die einen Balkenschuh mit innenliegenden Laschen nachbilden sollten. Diese wurden zum Teil mit einem schaubildenden Anstrich versehen.

Durch das verdeckte Anbringen der Verbindungsmittel werden diese vor direkter Brandbeanspruchung geschützt, was zu geringeren Temperaturen und einer geringeren Entfestigung des Stahls führt. Der Balkenschuh aus Stahl leitet zwar thermische Energie in diesen geschützt liegenden Bereich, doch wird die Temperaturerhöhung durch die spezifische Wärmespeicherkapazität des Stahls verzögert. Durch einen schaubildenden Brandschutzanstrich kann die Temperaturerhöhung des hinter dem Stahl liegenden Holzes und der verdeckten Verbindungsmittel noch weiter verzögert werden

Da nur unbelastete Brandversuche durchgeführt wurden, kann ein Versagen des Anschlusses durch Schiefstellen des Balkenschuhs und daraus entstehenden Kräften auf die Verbindungsmittel sowie daraus resultierender zusätzlicher Temperatureintrag nicht ausgeschlossen werden. Zwar ist der verdeckt liegende Bereich des Hauptträgers bei der beschichteten Variante weitestgehend intakt, wodurch der Anschluss formstabil bleiben würde, jedoch ist dies stark von den Abmessungen des Balkenschuhs abhängig. Hier sind weitere Untersuchungen empfehlenswert, um Mindestabmessungen für den verdeckten Teil des Hauptträgers zu bestimmen.

Stöckl, 2013 [35]

Stöckl untersuchte in Brandprüfungen verschiedene Anschlussvarianten von Schwalbenschwanz-Steckverbindern aus Aluminium. In Variante A wurde die Steckverbindung an eine Brettsperrholzplatte aufgeschraubt und mit dem Nebenträger mit Hilfe von Holzschrauben verbunden. Es resultierte eine Fuge in der Breite des Verbinders zwischen der Oberfläche der Brettsperrholzplatte und dem Hirnholz des Nebenträgers. In die Fuge wurde um die Steckverbindung herum ein 2,5 mm dicker Streifen Brandschutzlaminat angebracht. In Vari-

ante B wurde der Verbinder zum Teil in den Nebenträger gefräst. Die verbleibende Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger von ca. 3 mm wurde mit einem Streifen Brandschutzlaminat um die Verbindung herum nahezu ausgefüllt. In Variante C wurde der Verbinder zur Gänze in den Nebenträger eingefräst. Mit Hilfe von Thermoelementen an der Verbindung konnten Rückschlüsse auf die Wirkungsweise der einzelnen Anschlussvarianten getroffen werden. Die Anschlussvariante ohne Fuge führte zu den geringsten Temperaturen an der Verbindung, wird jedoch auf Grund der üblichen Montagetoleranzen nur selten ausgeführt. Die Temperaturen in der Verbindung von Anschlüssen mit Fuge und Brandschutzlaminat liefern bei 30 minütiger Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve im Mittel nur etwa 60 - 90°C höhere Temperaturen.

Palma, 2014 [27]

In [27] wird das Brandverhalten von Haupt-Nebenträgeranschlüssen mit Stabdübel- und verdeckten Schwalbenschwanzverbindern über 30 Minuten und 60 Minuten Beanspruchungsdauer unter Belastung und Branduntersucht. Variiert wurden Holzüberdeckungen und weitere Geometrieparameter der Verbindungen. Es wurde jeweils die Tragfähigkeit im Kaltzustand versuchstechnisch bestimmt und anschließend ein belasteter Brandversuch mit einer identischen Verbindung durchgeführt. Hierbei wurden eine Last in Höhe von $0,3 \cdot R_{\text{mean}, 20^\circ\text{C}}$ aufgebracht und die Verbindung bis zum Versagen einer Brandbeanspruchung gemäß ETK ausgesetzt.

Es wurde festgestellt, dass der Spalt zwischen Haupt- und Nebenträger einen erheblichen Einfluss auf die Brandtragfähigkeit ausübt und daher möglichst klein gewählt werden sollte. Negativ wirken sich auch zusätzlich eingebrachte Querkzugverstärkungen mit Vollgewindschrauben oder zu enge Abstände zwischen den Stabdübeln aus, da diese infolge ihres zusätzlichen Temperatureintrags den Abbrand im Verbindungsbereich beschleunigen.

Stabdübelverbindungen lassen sich generell gut für Brandbeanspruchungen von bis zu 60 Minuten optimieren, da die Stahlbauteile durch entsprechende Holzüberdeckungen vor Temperatureinwirkung geschützt werden können.

Die untersuchten Schwalbenschwanzverbinder aus Aluminium erreichten eine Feuerwiderstandsdauer von über 30 Minuten. Versagen trat in diesem Fall durch die Entfestigung des Aluminiums auf. Die wichtigste Einflussgröße auf die Erwärmung der Verbindung ist bei dieser Ausführung die Spaltbreite zwischen Haupt- und Nebenträger. In der untersuchten Variante betrug die Spaltbreite 18 mm, was der Dicke des Verbinders entspricht, es wurde also keine Einfräsung in die Stirnfläche des Nebenträgers verwendet. Für höhere Brandbeanspruchungsdauern kann abgeleitet werden, dass der Spalt möglichst klein gewählt werden sollte, oder zusätzliche Schutzmaßnahmen, z. B. in Form von intumeszierenden Materialien im Fugenspalt, erforderlich sind.

Racher, 2014 [30]

In [30] wird eine Reihe von Brandversuchen an Verbindungen mit Balkenschuhen und verdeckten Schlitzblechverbindern aus Stahlblech beschrieben. Verwendet wurden Balkenschuhe mit Breiten von 80 mm und 84 mm und Höhen von 142 bzw. 220 mm. Es wurden jeweils die maximalen Tragfähigkeiten von Raumtemperatur bestimmt und anschließend bestimmte Bruchteile dieser Last im Brandversuch aufgebracht und die Dauer bis zum Versagen bestimmt. Hierbei wurde ein Versuchsaufbau gewählt, bei dem eine Längsverschiebung der Nebenträger verhindert war (vgl. Abschnitt 5.1.1). Ein Balkenschuhtyp mit einem Nebenträgerquerschnitt von 84 mm x 220 mm und einer Verbindung mit Nägeln erreichte bei einem Lastniveau von 10 % der Tragfähigkeit im Kaltzustand eine Feuerwiderstandsdauer von 31 Minuten. Kleinere Nebenträgerquerschnitte und höhere Lastniveaus ergaben Feuerwiderstandsdauern von 25 oder 20,5 Minuten.

1.4.2 Stand der Technik

1.4.2.1 Balkenschuhe

Balkenschuhe aus dünnen kaltverformten Stahlblechen sind preisgünstige, hoch leistungsfähige und einfach zu verarbeitende Verbindungsbauteile für querkraftbeanspruchte Verbindungen im Ingenieurholzbau. Sie werden in zahlreichen Ausformungen und Detailgestaltungen von verschiedenen Herstellern produziert und häufig in Holzbaukonstruktionen angewendet. Die Formteile werden dabei mit stiftförmigen Verbindungsmitteln an die zu verbindenden Holzbauteile angeschlossen.

Der baurechtliche Verwendbarkeitsnachweis als auch die Bemessung wird über die entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) oder Europäisch Technischen Bewertungen (ETA) (z. B. [50]) sichergestellt. Zur Bemessung sind in den Zulassungen auf Basis von Versuchen entwickelte Bemessungsformeln enthalten, in die die Verbindungsgeometrien und die Rohdichten der verbundenen Hölzer eingehen. Entscheidend für die Tragfähigkeit sind hierbei die Verbindungsmittel, welche auf Abscheren oder gleichzeitig auf Abscheren und Herausziehen beansprucht werden. Die Stahlbleche werden bei allen zugelassenen Fabrikanten so gewählt, dass Versagen nicht zuerst im Blech auftritt.

Diese Bemessungsregeln beschränken sich in den meisten aktuell gültigen Zulassungen auf den Kaltbemessungsfall. Bemessungsregeln für den Brandfall sind in den Zulassungen oft nicht enthalten und auch nicht ohne weiteres aus normativen Angaben abzuleiten. Es existiert zum Stand der Erstellung dieses Schlussberichts eine ETA eines Herstellers [51], die Tragfähigkeiten von Balkenschuhen für den Brandfall angibt.

Die Prüfung der Verbindungen zur Erstellung einer ETA muss in Übereinstimmung mit ETAG 015 erfolgen. Dort werden grundlegende Prüfbedingungen definiert. Hinsichtlich der Geometrie des Prüfaufbaus sind allerdings keine konkreten Angaben enthalten, es ist lediglich definiert, dass der Prüfaufbau der üblichen Anwendungsart entsprechen soll.

In älteren Prüfungen (z. B. [18], [19]) wurde der Feuerwiderstand von Balkenschuhverbindungen untersucht, entsprechende Konstruktionsregeln und Bemessungsempfehlungen daraus wurden z. B. in [24] abgeleitet und aufgenommen.

Die Empfehlungen (vgl. Abbildung 1-3 und Abbildung 1-5) enthalten Angaben zu

- Mindestquerschnitten der Holzbauteile, insbesondere der Nebenträger
- Mindestabmessungen der Verbindungsmittel
- maximalen Traglastniveaus in Abhängigkeit der Verbindungsgeometrien.

Bild E.142 Bilo-Balkenschuhe und Bilo-Kamm-Nägel zur Verbindung von Balken mit Balken

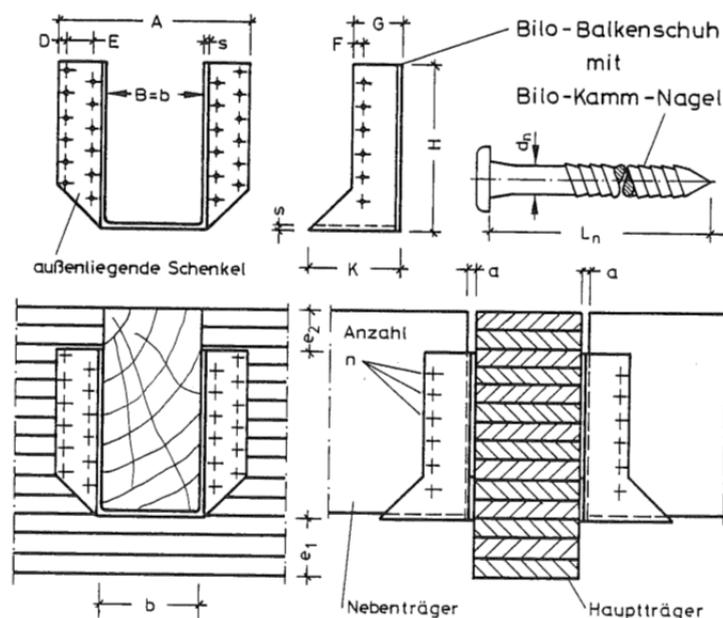


Tabelle E.41 Randbedingungen für Balkenschuh-Verbindungen zum Anschluß von Balken an Balken gemäß Bild E.142 mit Bilo-Balkenschuhen und Bilo-Kamm-Nägeln für F 30

Die Randbedingungen gelten sinngemäß auch für
 – BMF-Balkenschuhe und BMF-Ankernägel sowie für
 – GH-Balkenschuhe und H-Rillennägel

Zeile	Brandschutztechnisch wichtige Kennwerte		Anschluß	Sonstige Kennwerte siehe	Randbedingungen für F 30	
	Balkenschuh	Kamm-Nägel			Variante 1	Variante 2
1	A				≧ 200 mm	≧ 170 mm
2	B = b			Zulassungsbescheid Nr. Z 9.1-80 des IfBt	≧ 120 mm	≧ 100 mm
3	G				≧ 44 mm	≧ 40 mm
4	K				≧ 85 mm	≧ 75 mm
5	s				≧ 2 mm	≧ 2 mm
6		d_N			Zulassungsbescheid Nr. Z 9.1-61 des IfBt	= 4 mm
7		L_N		≧ 75 mm		≧ 75 mm
8		$N_{\text{Abscheren}}$		≧ 0,75 zul N ¹⁾		≧ 0,33 zul N ¹⁾
9			b		≧ 120 mm	≧ 100 mm
10			$n_{\text{Nebentr.}}$		≧ 2 · 7	≧ 2 · 6
11			$n_{\text{Haupttr.}}$	[153]	≧ 2 · 13	≧ 2 · 12
12			a	[154]	≧ 3 mm	≧ 3 mm
13			e_1	[155]	≧ 100 mm	≧ 50 mm
14			e_2		≧ 30 mm	≧ 20 mm

¹⁾ zul N = 0,75 kN pro Nagel

Abbildung 1-3 Tabelle zur Gestaltung von Balkenschuhanschlüssen zur Erreichung bestimmter Feuerwiderstandsdauern, entnommen aus [24].

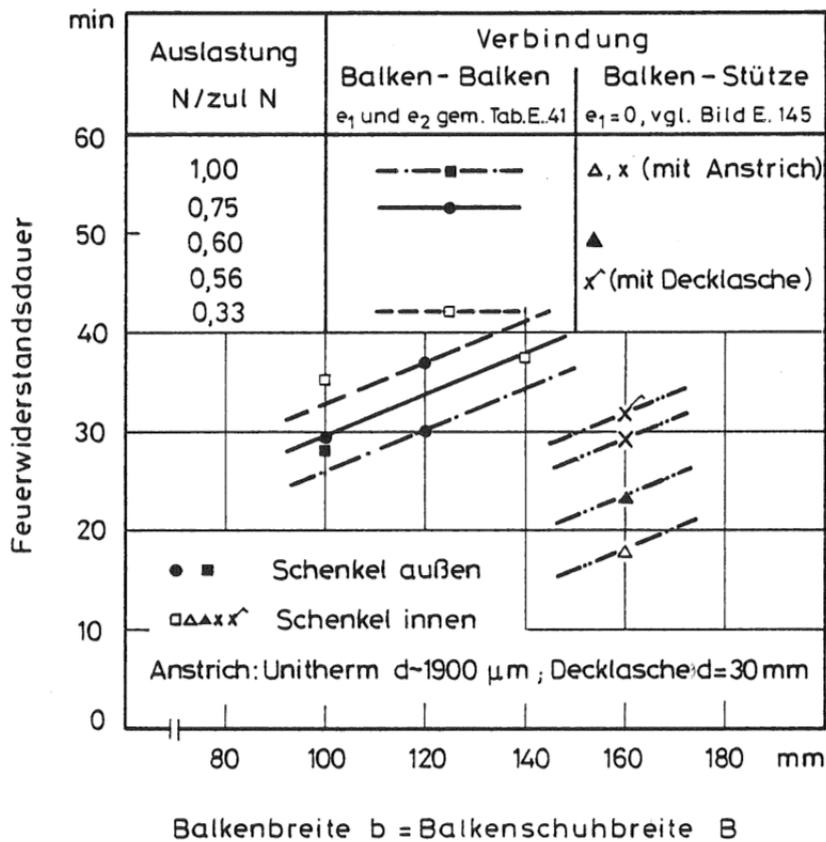


Abbildung 1-4 Feuerwiderstandsdauer von Balkenschuh-Verbindungen in Abhängigkeit verschiedener Parameter, entnommen aus [24].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass verschiedene ältere, Einzeluntersuchungen zum Tragverhalten der Verbindungen im Brandfall vorliegen, allerdings normativ gesicherte Bemessungsvorschriften und einfach anwendbare Regelungen in den aktuellen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweisen nicht vorhanden sind.

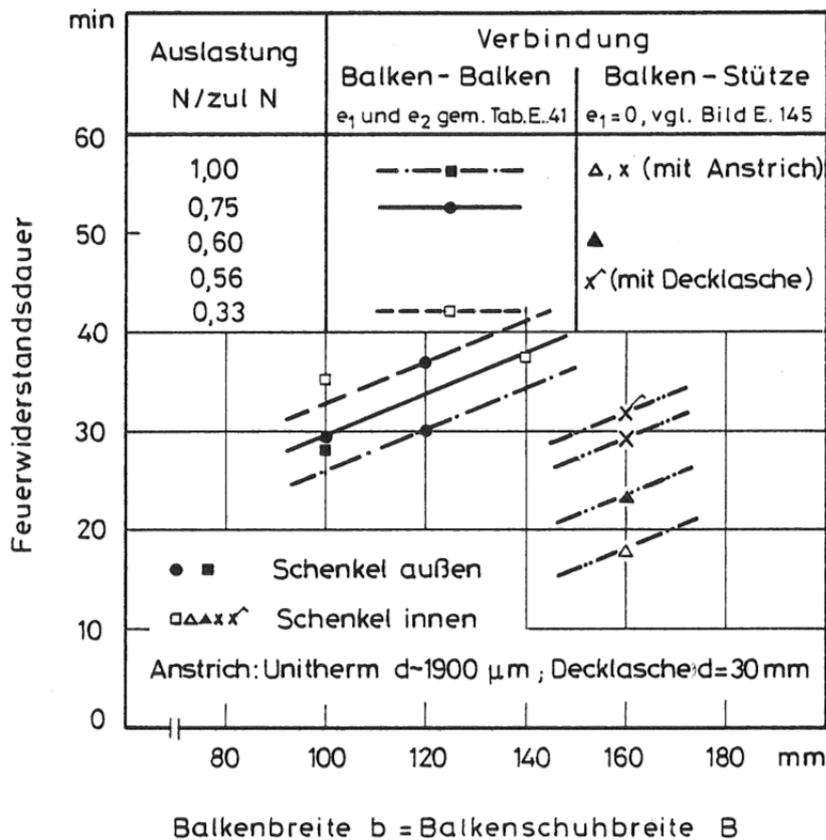


Abbildung 1-5 Feuerwiderstandsdauer von Balkenschuh-Verbindungen in Abhängigkeit verschiedener Parameter, entnommen aus [24].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass verschiedene, teils ältere, Literaturangaben zum Tragverhalten der Verbindungen im Brandfall vorliegen, allerdings normativ gesicherte Bemessungsvorschriften und einfach anwendbare Regelungen in den bauaufsichtlichen Zulassungen nicht vorhanden sind.

1.4.2.2 Vollgewindeschrauben

Vollgewindeschrauben sind vielfältig einsetzbare Verbindungsmittel im Holzbau. Sie finden Anwendung bei Bauteilanschlüssen, Zugstößen oder Verstärkungen. Um verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden, werden die Vollgewindeschrauben mit Durchmessern bis zu ca. 12 mm und Längen bis zu 600 mm angeboten.

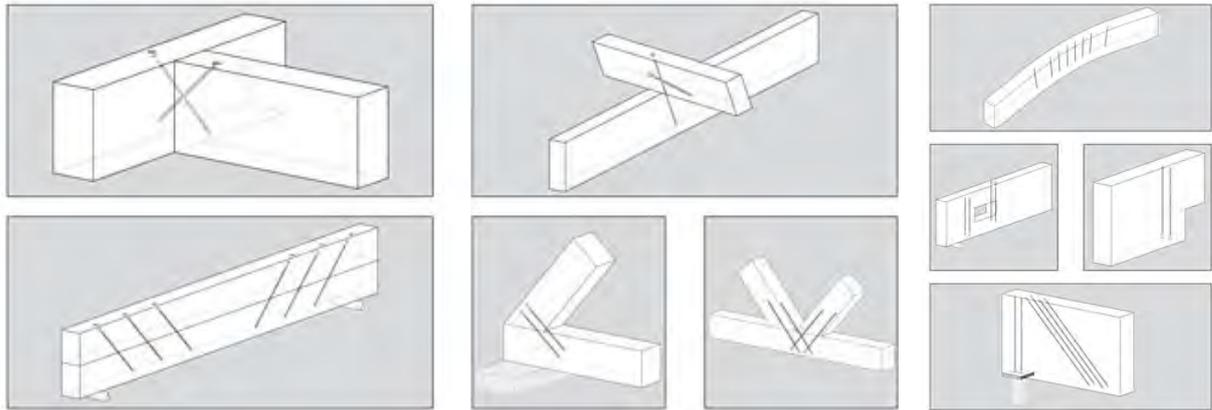


Abbildung 1-6: Zugstöße, Bauteilanschlüsse, und Verstärkungen mit Vollgewindeschrauben (Quelle [3])

Bauteilanschlüsse zur planmäßigen Übertragung von Querkräften für Haupt-Nebenträger-Verbindungen und Stützen-Träger-Anschlüsse können durch geneigt angeordnete Vollgewindeschrauben hergestellt werden.

Die Bemessung erfolgt nach DIN EN 1995-1-1 in Verbindung mit entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassungen oder Europäischen Technischen Bewertungen (ETA) (z. B. [48], [49]). Die Vollgewindeschrauben werden dabei auf Herausziehen, Abscheren oder eine Kombination der beiden Beanspruchungsarten belastet.

Eine Bemessung für den Brandfall nach DIN EN 1995-1-2 für ungeschützte Verbindungen ist nur für auf Abscheren beanspruchte Schrauben bis zu 20 Minuten Brandbeanspruchung möglich (vgl. DIN EN 1995-1-2 Abschnitt 6.2.2.1 [45]). Bei geschützten Verbindungen werden Feuerwiderstandsdauern für auf Abscheren beanspruchte Schrauben bis zu 60 Minuten möglich. Der Bemessungswert für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben unter Brandbeanspruchung kann gemäß DIN EN 1995-1-2 Abschnitt 6.4 [45] rechnerisch nur dann ermittelt werden, wenn diese vor direkter Brandeinwirkung geschützt werden (vgl. Abschnitt 0). Eine Bemessungsmöglichkeit für ungeschützte auf Herausziehen beanspruchte Schrauben ist derzeit nicht gegeben.

In den herstellerepezifischen Verwendbarkeitsnachweisen sind keine Bemessungsregeln für den Brandfall enthalten.

1.5 Abgrenzung des Forschungsvorhabens

Ziel war die Untersuchung von Balkenschuh- und Schraubenverbindungen im Hinblick auf die in Abschnitt 1.3 genannten Fragestellungen.

Die praktische Verwendung der Ergebnisse kann insbesondere darin liegen, Zulassungsprüfungen für die untersuchten Verbindungstypen zu konzipieren und durchzuführen sowie den

Aufwand für weitere Brandprüfungen einzuschränken. Dazu werden detaillierte Angaben gemacht, wie die Verbindungen zum Erreichen bestimmter Feuerwiderstandsdauern zweckmäßigerweise zu gestalten sind. Die baurechtlich abgesicherte Verwendbarkeit der Ergebnisse für die Praxis kann somit künftig durch die Aufnahme der Ergebnisse in Normen oder herstellerspezifischen Zulassungen erfolgen. Dieser Schritt obliegt nach Abschluss des Vorhabens den Normungsausschüssen und Systemherstellern.

Die Ergebnisse ermöglichen es, verbesserte Bemessungsregeln in die Normung aufzunehmen. Dies betrifft in erster Linie die schon teilweise vorhandenen normativen Vorgaben für die Brandbemessung von Vollgewindeschrauben. Wegen der großen Vielzahl von herstellerspezifischen Varianten von Balkenschuhen und Balkenträgern sowie fehlenden Normungsgrundlagen liegt ein möglicher Weg des baurechtlichen Verwendbarkeitsnachweises in der Aufnahme entsprechender Angaben in die bauaufsichtlichen nationalen oder europäischen Bewertungsdokumente.

1.6 Hochtemperatureigenschaften von Holz und Stahl

Unter erhöhten Temperaturen ändert Holz seine Materialeigenschaften, indem chemische Zersetzungsprozesse einsetzen. Ab einer Temperatur von etwa 100°C entweicht das im Holz gebundene Wasser. Ein Abbau des Lignins und der Hemizellulose setzt bei ca. 150°C ein. Die Bildung einer Holzkohleschicht beginnt bei ca. 270°C.[32]

Einhergehend mit der Änderung der Holzzusammensetzung ändern sich auch die Festigkeiten und Steifigkeiten des Holzes in Abhängigkeit von der Temperatur [45].

In Abbildung 1-7 ist die temperaturabhängige Festigkeitsabnahme von Nadelholz parallel zur Faser für Druck, Schub und Zug dargestellt. Bei etwa 300°C weist das Holz durch die Bildung der Holzkohleschicht keine Festigkeit mehr auf. Auffällig ist der „Knick“ der Schub- und Zugfestigkeit bei 100°C. Dieser ist auf die starke Austrocknung des Holzes zurückzuführen, die eine Kohäsion der Fasern hervorruft.

Stahl zeigt ein deutlich anderes Verhalten bei Temperaturerhöhungen: Die Fließgrenze bleibt bis zu 400° C konstant, fällt danach aber stark ab und entspricht bei 600°C nur noch 40 % ihrer Kalttragfähigkeit. Die Proportionalitätsgrenze fällt bereits bei Erwärmungen über 100 °C ab (siehe Abbildung 1-8) [43].

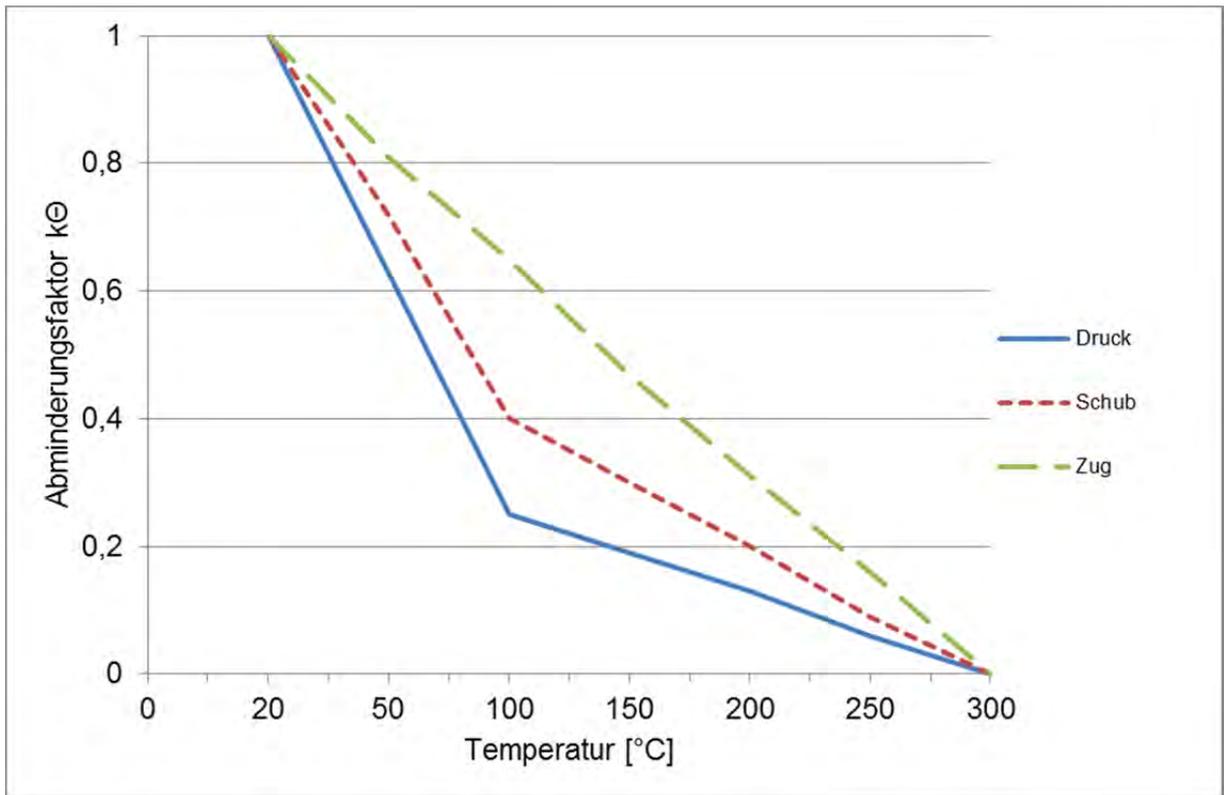


Abbildung 1-7: Abminderungsfaktor für die Festigkeit von Nadelholz parallel zur Faser [45]

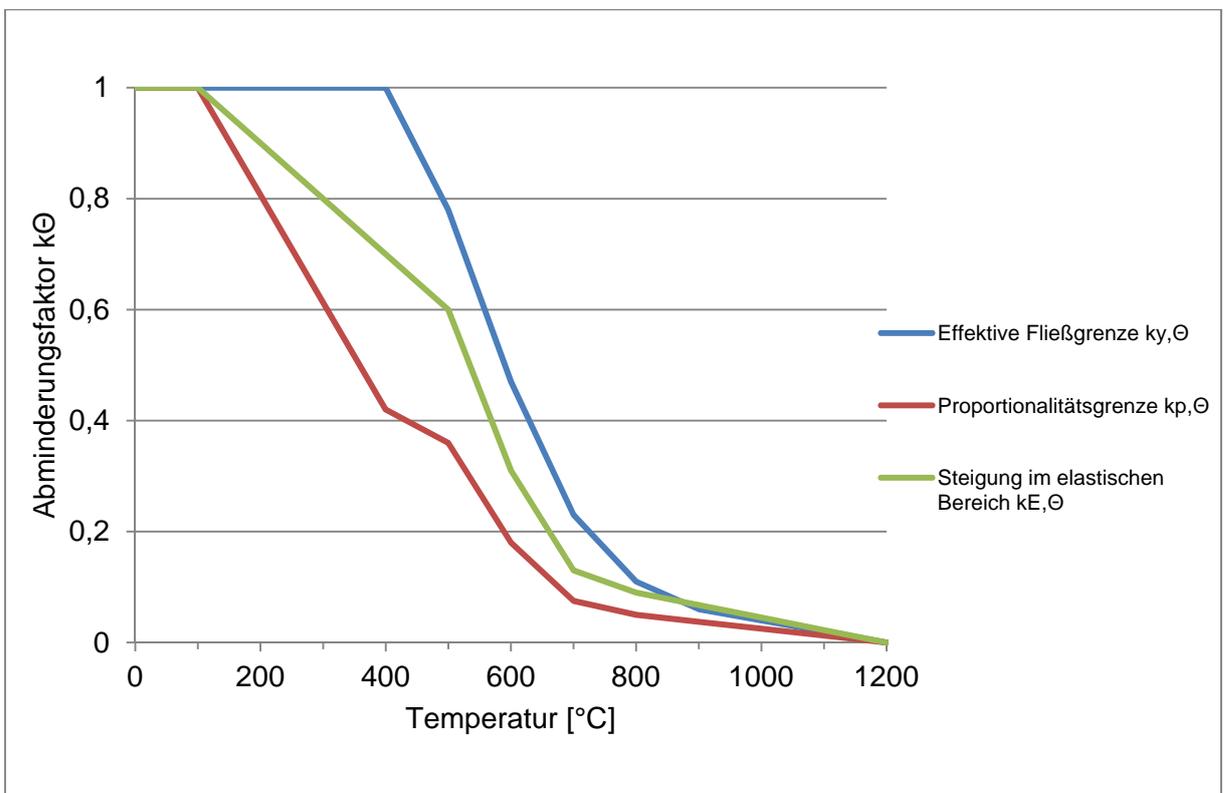


Abbildung 1-8: Abminderungsfaktor für die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhten Temperaturen [43]

Die Temperaturen von Stahlbauteilen können während Brandversuchen anhand der Glühfarben abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 1-9). Hierbei ist jedoch die Lichtfarbe und Helligkeit der Beleuchtung zu beachten. Die dargestellte Farbtabelle gilt für einen mit diffusem Tageslicht schwach erhellten Raum.

Helle Weißglut	1300°C	
Mattweißglühend	1200°C	
Hellgelb	1100°C	
Gelb	1000°C	
Hellgelbrot	950°C	
Gelbrot	900°C	
Hellrot	850°C	
Hellkirschrot	800°C	
Kirschrot	750°C	
Dunkelkirschrot	700°C	
Dunkelrot	650°C	
Braunrot	600°C	

Abbildung 1-9 Glühfarben von Stahl, entnommen aus [10]

Die Änderung physikalischer Materialgrößen, wie die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmespeicherkapazität und die Rohdichte, zeigt erheblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung entlang der Verbindung im Brandfall.

Im Brandfall schützt das umgebende Holz innenliegende Verbindungen vor einer direkten Brandeinwirkung. Durch die sich bildende Holzkohleschicht schützt das Holz den innenliegenden Querschnittsbereich und verzögert aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit (vgl.

Abbildung 1-10) den Abbrand. An den freiliegenden Enden der stiftförmigen Verbindungsmittel wird der Stahl nur noch geringfügig durch das Holz geschützt. Hier ist das Element einer direkten Brandeinwirkung ausgesetzt. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahles bewirkt eine Übertragung der Wärme in das umgebende Holz. Der Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Holz bzw. Holzkohle mit der von Kohlenstoffstahl zeigt, dass Stahl eine etwa 30-50 fache Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Durch den Wärmeeintrag in das Verbindungsmittel wird dessen mechanische Widerstandsfähigkeit beeinflusst und auch die Festigkeit und Steifigkeit des Holzes reduziert.

Das Brandverhalten von ungeschützten innenliegenden Verbindungen kann nur bei Kenntnis des Verhaltens der Einzelkomponenten als auch deren Wechselwirkung unter Normbrandbeanspruchung beurteilt werden.

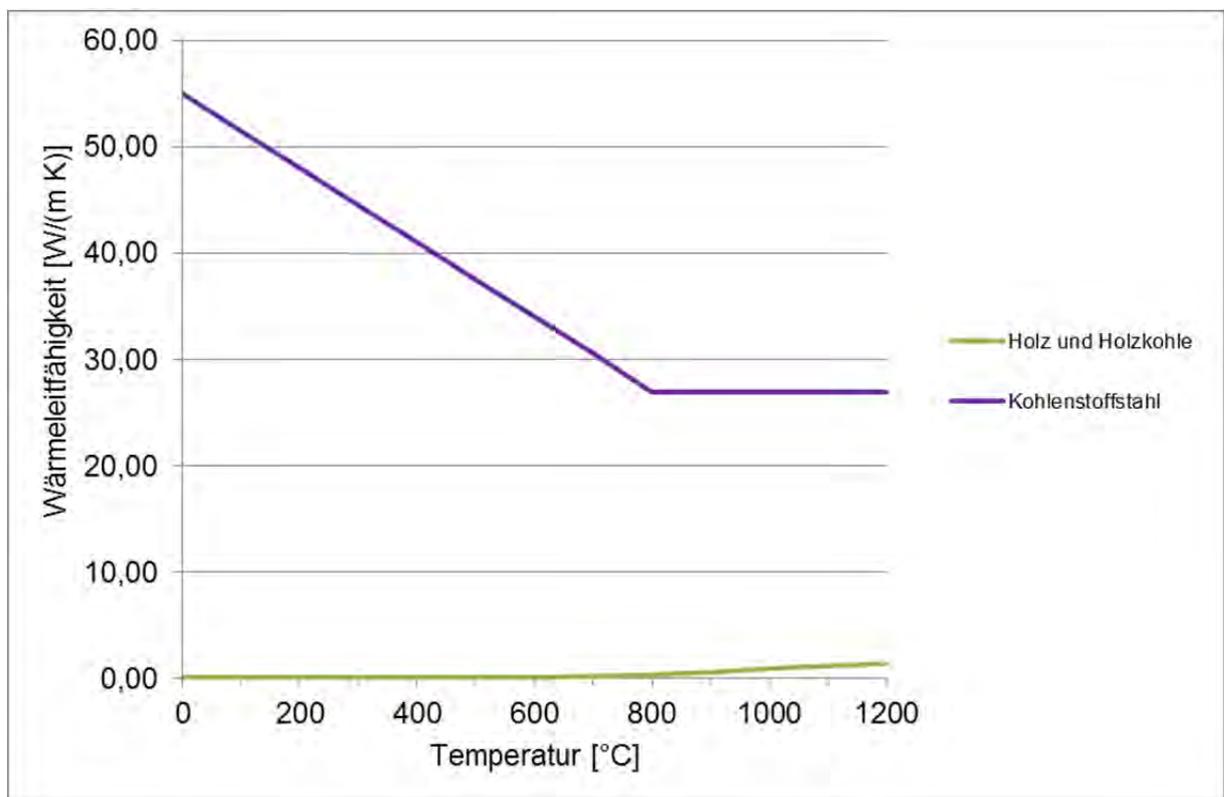


Abbildung 1-10: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Holz und Kohlenstoffstahl [43] [45]

Neben der Wärmeleitfähigkeit spielen für die Temperaturentwicklung im Bauteil unter instationären Bedingungen, wie sie der Brandfall darstellt, die temperaturabhängige Wärmespeicherkapazität und Rohdichte von Stahl und Holz entscheidende Rollen. Diese dürfen DIN EN 1993-1-2 [43] und DIN EN 1995-1-2 [45] entnommen werden.

Weitere Eigenschaften zum Hochtemperaturverhalten von Holz und Stahl sind in [17], [31], [20], [23], [21], [22], [25] enthalten.

2 Eigenschaften und Tragverhalten von Haupt-Nebenträger-Verbindungen

2.1 Balkenschuhe

2.1.1 Allgemeines

Balkenschuhe aus dünnwandigen Stahlblechen werden im Holzbau seit Jahrzehnten verwendet. Ihre Eigenschaften wurden in zahlreichen Untersuchungen und Prüfserien beurteilt und dokumentiert. Darüber hinaus wurden für jeden konkreten Typ eines bestimmten Herstellers außerdem Zulassungsprüfungen durchgeführt, welche zur Ermittlung der hersteller-spezifischen Besonderheiten und als Grundlage der Erstellung von baurechtlichen Verwendbarkeitsnachweisen dienen.

Die baurechtliche und bautechnische Verwendbarkeit ist in *bauaufsichtlichen Zulassungen* (abZ) bzw. *Europäisch Technische Beurteilungen* (ETA) geregelt. Dort werden alle notwendigen Informationen zur praktischen Verwendung und Ermittlung der rechnerischen Tragfähigkeit angegeben.

2.1.2 Eigenschaften von Balkenschuhen

Die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Balkenschuhe sind Bauteile aus dünnen, in der Regel bandverzinkten Stahlblechen, welche durch Kaltumformung in die gewünschte Form gebracht werden. Die Stärke der verwendeten Bleche beträgt in der Regel 2,0 mm oder 2,5 mm. Balkenschuhe dienen der Verbindung und Kraftübertragung von rechtwinklig aufeinandertreffenden Holzbauteilen mit rechteckigen Querschnitten oder der Verbindung solcher Querschnitte mit flächigen Bauteilen aus Holz oder anderen Werkstoffen. Sie können dabei planmäßig in beiden Querrichtungen belastet werden, jedoch nicht durch Biege- und Torsionsmomente. Die Blechlaschen zur Befestigung an den zu verbindenden Bauteilen sind mit gestanzten Löchern ausgestattet, die zur Aufnahme stiftförmiger Verbindungsmittel dienen. Üblicherweise verwendet werden dazu Rillennägel oder spezielle Schrauben. Typische Abmessungen der Verbindungsmittel sind \varnothing 4 mm oder 5 mm mit Längen von 40 mm bis 75 mm. Bei Verbindung von Holz- mit Stahl- oder Betonbauteilen werden auch materialabhängig geeignete Typen von Schraubverbindungen verwendet, z. B. Bolzen mit Spreizverankerung im Beton. Es existieren Typen von Balkenschuhen mit innen- und außenliegenden Laschen, wobei das Tragverhalten und die übertragbaren Kräfte sehr ähnlich sind. Die Auswahl innen- oder außenliegender Laschen erfolgt daher normalerweise nach praktischen oder gestalterischen Gesichtspunkten.

Übliche Abmessungen beginnen bei ca. $B \times H = 40 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ und enden bei ca. $240 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$. Die übertragbaren Kräfte sind im Verhältnis zur Tragfähigkeit der verbundenen Bauteile relativ hoch und lassen in der Regel eine volle Ausnutzung der Holzquerschnitte zu.



Abbildung 2-1: Beispiele für praxisübliche Balkenschuhtypen. Rechts eine Variante für große Holzquerschnitte, links ein kleinerer Verbinder mit zusätzlichen Sicken zur Verbesserung des Tragverhaltens bei zweiachsiger Beanspruchung. (Quelle: GH Baubeschläge)

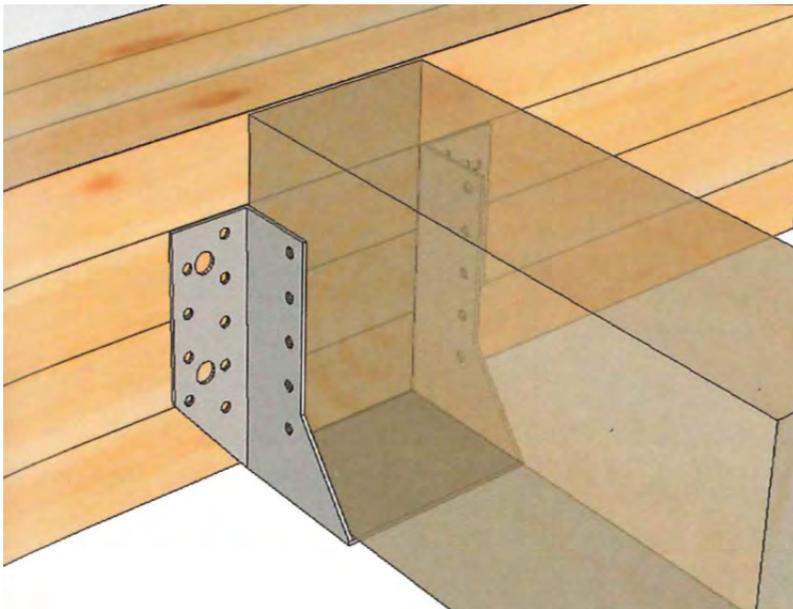


Abbildung 2-2: Typische Anwendung eines Balkenschuhs zur Verbindung zweier rechtwinklig aufeinandertreffender Holzbalken. Die großen Löcher in den Blechlaschen am Hauptträger dienen zur alternativen Befestigung mit Schrauben oder Bolzen an Stahl- oder Betonbauteilen. (Quelle: GH Baubeschläge)

2.1.3 Eigenschaften von Balkenschuhen aus geschweißten Blechen

Neben den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Balkenschuhen aus dünnen kaltverformten Blechen gibt es individuell als Stahl-Schweißteile hergestellte balkenschuhartige Verbinder aus dickeren Stahlblechen. Diese werden gemäß den technischen Regeln für Stahlbaukonstruk-

tionen bemessen und hergestellt. Auf diese Weise können individuell an den jeweiligen Anwendungszweck angepasste Konstruktionen hergestellt werden.

2.1.4 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung im Kaltbemessungsfall

2.1.4.1 Tragverhalten

Die Kraftübertragung erfolgt vom Nebenträger über die eingebrachten Verbindungsmittel in das Stahlblechformteil. Die Verbindungsmittel sind dabei vorwiegend auf Abscheren beansprucht. Je nach Typ des Balkenschuhs beteiligt sich das „Boden“-Blech unterhalb des Nebenträgers teilweise an der Kraftübertragung. Die Last wird vom Nebenträger vorwiegend über einen Schubspannungszustand innerhalb des Bleches auf die Laschen am Hauptträger weitergeleitet. Dort übertragen die stiftförmigen Verbindungsmittel die Last in den Hauptträger bzw. das sonstige angrenzende Bauteil. Hier sind die Verbindungsmittel kombiniert auf Abscheren und Herausziehen beansprucht.

Das Trag- und Verformungsverhalten dieser Verbinder ist durch eine ausgeprägte Duktilität gekennzeichnet. Es kommt nach einem linear-elastischen Anfangsbereich bei steigender Last zu deutlichen plastischen Verformungen des Holzes, der Verbindungsmittel und des Bleches. Abbruchkriterium innerhalb der Tragfähigkeitsbeurteilung ist nicht das Bauteilversagen bei maximaler Belastung, sondern eine vereinbarte Verformungsbegrenzung von 15 mm zwischen Haupt- und Nebenträger nach DIN EN 26891.

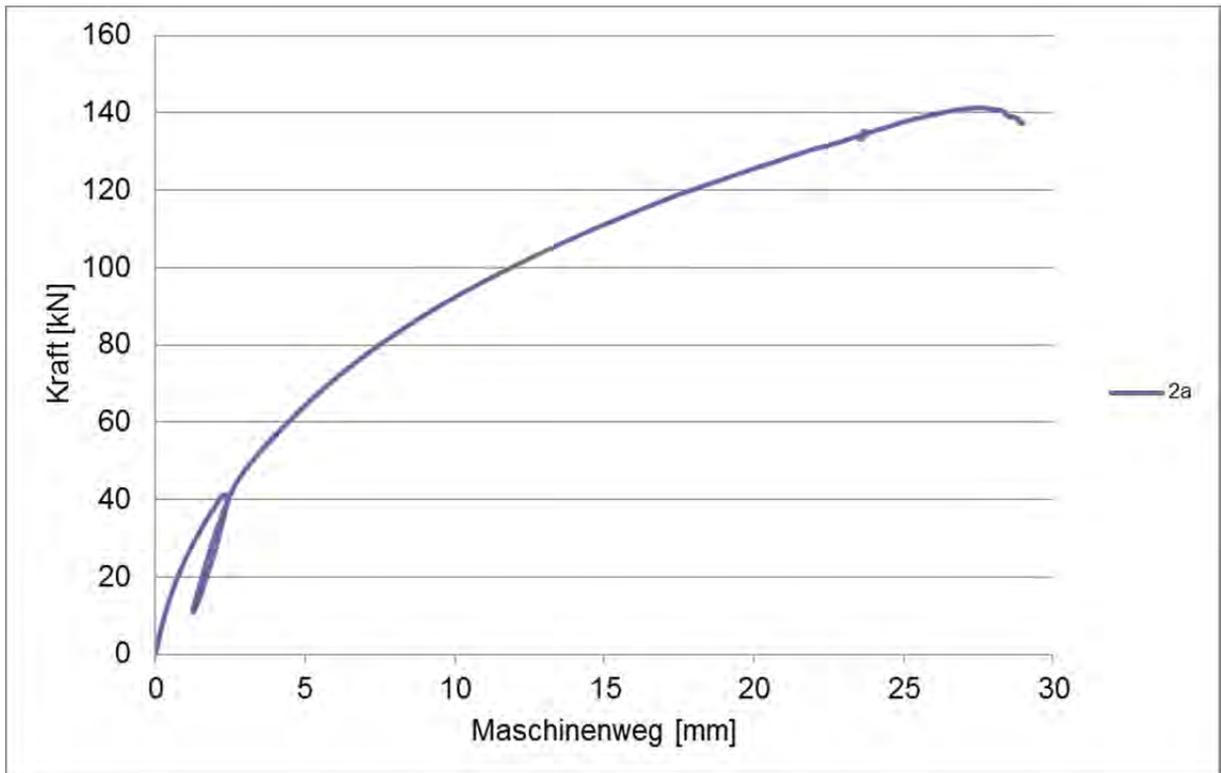


Abbildung 2-3: typisches Tragverhalten einer Balkenschuhverbindung. Gut erkennbar sind die hohen Tragfähigkeitsreserven auch nach dem Überschreiten von 15 mm Verschiebungsweg.



Abbildung 2-4: Exemplarisches Bruchbild der Balkenschuhverbindung aus Abbildung 2-3.

Grundsätzlich können die folgenden Anteile zum Verformungs- bzw. Versagensverhalten beitragen:

- 1) Herausziehen der Verbindungsmittel im Hauptträger, dabei gleichzeitig starke Verformung der Blechlaschen
- 2) Abscheren der Verbindungsmittel im Nebenträger
- 3) Abscheren der Verbindungsmittel im Hauptträger
- 4) Querkzugversagen des Holzes im Hauptträger
- 5) Schubversagen des Holzes im Nebenträger
- 6) Abreißen des Bleches nach Überschreiten der Materialfestigkeiten
- 7) Lochleibungsversagen des Bleches
- 8) Lochleibungsversagen des Holzes

Typisch ist eine Kombination aus verschiedenen Versagensmechanismen und Verformungsanteilen. Die Fälle 2), 3), 6) und 7) werden dabei bei bauaufsichtlich zugelassenen Balkenschuhen durch geeignete Auswahl von Materialien und Querschnitten ausgeschlossen. Der Fall 4) ist abhängig von der Anschlussgeometrie, insbesondere den Verhältnis a/h . Nach DIN EN 1995-1 [44] kann Querkzugversagen bei $a/h > 0,7$ ausgeschlossen werden. In anderen Fällen ist die Tragfähigkeit gesondert nachzuweisen oder es sind Verstärkungsmaßnahmen vorzusehen.

Das Verformungsverhalten wird außerdem erheblich durch die Lagerungsbedingungen und Verformungsmöglichkeiten der verbundenen Bauteile beeinflusst. Übliche Prüfbedingungen sehen folgende Randbedingungen vor:

- Gabellagerung des Haupt- und Nebenträgers, d. h. Verhinderung von Verdrehungen um die Trägerlängsachsen
- axiale Verschiebbarkeit des Nebenträgers

Unter Annahme dieser Bedingungen kann das Verformungsverhalten wie folgt beschrieben werden:

- Aufziehen und starke Verformung der Laschen am Hauptträger, dabei gleichzeitiges Herausziehen der Verbindungsmittel im oberen Bereich.
- starke Scherbeanspruchung der Verbindungsmittel im Nebenträger in Trägerlängs- und Querrichtung, dabei plastische Verformung der Verbindungsmittel
- Plastische Verformungen des Holzes infolge Lochleibungsbeanspruchung

- Tragfähigkeit wird erreicht durch kombinierte Beanspruchung der Verbindungsmittel auf Herausziehen und Abscheren unter starker Verformung des Bleches, der Verbindungsmittel und des Holzes

2.1.4.2 Bemessung

Die Bemessung erfolgt auf Grundlage bauaufsichtlicher Zulassungen oder europäischer Bewertungsdokumente mit dort angegebenen Bemessungsformeln. Häufig sind die Tragfähigkeitswerte auch in Form von Tabellen für unterschiedliche Abmessungen und Konfigurationen von Verbindungen anwenderfreundlich aufbereitet.

Die Bemessungsformeln geben die Tragfähigkeit der Verbindungen in Abhängigkeit der Beanspruchbarkeit der Verbindungsmittel auf Herausziehen und Abscheren an. Die Tragfähigkeit des Bleches wird dabei vorausgesetzt, bzw. ist gegeben durch die von Hersteller gewählten Geometrien und Materialien. Diese muss daher nicht explizit nachgewiesen werden. Je nach Balkenschuhtyp gehen empirisch ermittelte Formfaktoren in Abhängigkeit der Abmessungen und sonstigen Geometriebedingungen in die Tragfähigkeitsberechnung ein. Es existieren z. B. Balkenschuhtypen mit zusätzlichen Sicken, die zur Versteifung des Bleches dienen. Diese haben dementsprechend andere Formfaktoren, was z. B. zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit in y-Richtung oder bei kombinierter Beanspruchung gegenüber Typen ohne Sicken führt.

Bei der Bemessung wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass alle angeschlossenen Bauteile gegen Verdrehen gesichert sind. Gegebenenfalls sind Exzentrizitätsmomente in den Bauteilen zu berücksichtigen und durch geeignete Festhaltungen aufzunehmen.

Die Tragfähigkeiten der Verbindungsmittel werden entweder nach Norm (DIN EN 1995-1 [44]) bestimmt, oder ergeben sich aus der Zulassung des jeweiligen Verbindungsmittels. Es ist die in dem jeweiligen baurechtlichen Verwendbarkeitsnachweis des Balkenschuhs genannte Art der Ermittlung der Tragfähigkeit zu verwenden.

Es besteht abhängig von der jeweiligen Zulassung in der Regel die Möglichkeit, nicht die maximal mögliche Anzahl von Verbindungsmitteln zu verwenden, sondern eine Teilausnagelung bzw. –verschraubung vorzunehmen. Die Tragfähigkeit wird dadurch entsprechend reduziert, die Zulassungen geben an, welche der Verbindungsmittel wegzulassen sind. Eine derartige Teilausnutzung der Balkenschuhe kann sinnvoll sein, wenn aufgrund der Nachweise der Holzquerschnitte nicht die volle Tragfähigkeit an der Verbindungsstelle erforderlich ist.

In einigen Fällen haben Balkenschuhe außerdem aus produktionstechnischen Gründen mehr Löcher als zulassungsgemäß Verbindungsmittel zur Erzielung der vollen Tragfähigkeit ange-

ordnet werden müssen. Im Kaltzustand ergibt die Verwendung einer größeren Anzahl von Verbindungsmitteln keine erhöhte Tragfähigkeit, da vorher bereits die Tragfähigkeit des Holzquerschnittes erreicht wird.

Die folgenden Bemessungsgleichungen wurden als Beispiel aus einer aktuellen ETA entnommen. Der grundsätzliche Aufbau der Bemessungsformeln ist für verschiedene Balkenschuhtypen einheitlich, Unterschiede ergeben sich aus der Variation der Formfaktoren:

Kraft in Richtung der Bodenplatte des Balkenschuhs (positive z-Richtung):

$$F_{Z,Rd} = \min \left\{ \frac{(n_j + 2) * F_{v,J,Rd}}{1}, \sqrt{\left(\frac{1}{n_j * F_{v,H,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_{H,1} * F_{ax,H,Rd}}\right)^2} \right\} \quad (1)$$

Kraft von der Bodenplatte des Balkenschuhs weg (negative z-Richtung):

$$F_{Z,Rd} = \min \left\{ \frac{n_j * F_{v,J,Rd}}{1}, \sqrt{\left(\frac{1}{n_j * F_{v,H,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_{H,2} * F_{ax,H,Rd}}\right)^2} \right\} \quad (2)$$

Kraft in Querrichtung (y-Richtung):

$$F_{Z,Rd} = \min \left\{ \frac{n_j * F_{v,J,Rd}}{\sqrt{\left(\frac{2 * \sqrt{e_{J,0}^2 + e_{J,90}^2}}{b_J}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,J,Rd}}{F_{ax,J,Rd}}\right)^2}}, \frac{F_{v,H,Rd}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_H} + \frac{e_H}{e_1}\right)^2 + \left(\frac{e_H}{e_2}\right)^2}} \right\} \quad (3)$$

mit

n_j = Gesamtanzahl der Verbindungsmittel in beiden Laschen im Nebenträger

n_H = Gesamtanzahl der Verbindungsmittel in beiden Laschen im Hauptträger

$F_{v,Rd}$ = „design“ Tragfähigkeit auf Abscheren der Verbindungsmittel im Haupt- oder Nebenträger, gekennzeichnet durch die Indizes „H“ oder „J“

$F_{ax,Rd}$ = „design“ Tragfähigkeit auf Herausziehen der Verbindungsmittel im Haupt- oder Nebenträger, gekennzeichnet durch die Indizes „H“ oder „J“

b_J = Breite des Balkenschuhs

$e_{J,90}$ = Abstand des Kraftangriffspunktes der Horizontalkraft aus dem Nebenträger gegenüber dem Schwerpunkt der Verbindungsmittel im Nebenträger

$e_{J,0}$ = Abstand des Schwerpunktes der Nägel im Nebenträger von der Oberfläche des Hauptträgers

e_H = Abstand des Kraftangriffspunktes der Horizontalkraft aus dem Nebenträger gegenüber dem Schwerpunkt der Verbindungsmittel im Hauptträger

e_1 = Dimensionsfaktor des Balkenschuhs

e_2 = Dimensionsfaktor des Balkenschuhs

$k_{H,1}$ = Formfaktor

$k_{H,2}$ = Formfaktor

Kombinierte Beanspruchungen in y- und z-Richtung werden wie folgt nachgewiesen:

$$\left(\frac{F_{y,Ed}}{F_{y,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{z,Ed}}{F_{z,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (4)$$

2.2 Vollgewindeschrauben

2.2.1 Allgemeines

Selbstbohrende Vollgewindeschrauben im Holzbau gibt es erst seit ca. 10 Jahren. Ihre Eigenschaften wurden in zahlreichen Untersuchungen und Prüfserien erforscht und dokumentiert [5], [4], [6], [7]. Für jeden Typ eines bestimmten Herstellers wurden außerdem Zulassungsprüfungen durchgeführt, welche zur Ermittlung der herstellereigenschaften und als Grundlage der Erstellung von herstellereigenschaften bautechnischen Verwendbarkeitsnachweisen dienen.

Die baurechtliche und bautechnische Verwendbarkeit ist wie bei den Balkenschuhen in bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. European technical approvals (ETA) geregelt. Zusätzlich werde normative Bemessungsregeln zu Holzschrauben in der DIN EN 1995-1-1 angeboten.

2.2.2 Eigenschaften von Vollgewindeschrauben

Haupt-Nebenträger-Verbindungen, die durch selbstbohrende Vollgewindeschrauben hergestellt werden, können auf vielseitige Weise erzeugt werden. Die Anschlüsse werden beispielsweise durch mindestens zwei parallel zum Nebenträger angeordnete Vollgewindeschrauben geschaffen, die über den Nebenträger eingeschraubt werden. Alternativ können über mindestens ein Paar gekreuzt angeordnete Vollgewindeschrauben, die entweder beide

über den Nebenträger oder jeweils unterschiedlich über Haupt- und Nebenträger eingeschraubt werden (siehe Abbildung 2-5), angeordnet werden.

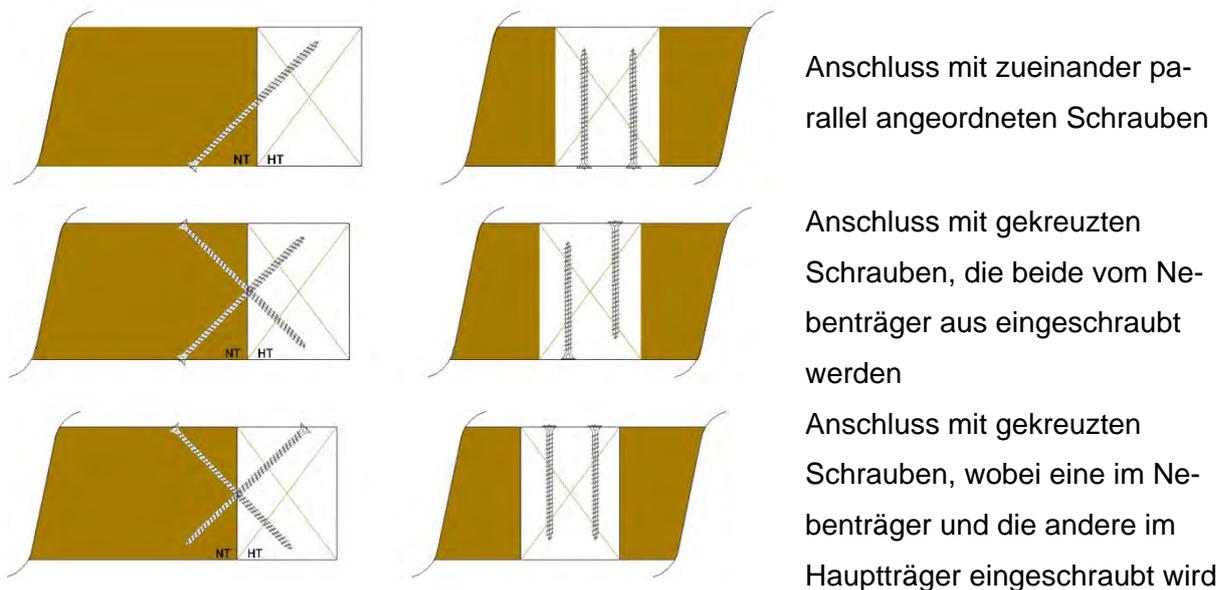


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung von Haupt-Nebenträgerverbindungen mit parallel zueinander oder gekreuzt angeordneten Schrauben

Die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Vollgewindeschrauben sind selbstbohrende Vollgewindeschrauben (Firma SPAX International GmbH & Co. KG).

Die Schrauben sind mit unterschiedlichen Kopfformen, Durchmessern, Längen und in unterschiedlichen Materialien erhältlich. Dabei werden Schrauben mit Senkkopf, Tellerkopf, Zylinderkopf oder Halbrundkopf angeboten. Hergestellt werden Sie mit unterschiedlichen Durchmessern, in der Regel werden jedoch Durchmesser von 6 mm bis 12 mm für geschraubte Querkraftanschlüsse verwendet. In Abhängigkeit des Durchmessers gibt es unterschiedliche Schraubenlängen. In Schritten von ca. 20 mm oder 50 mm sind Längen von 160 mm bis 600 mm erhältlich. Neben den üblichen Kohlenstoffschrauben kommen auch Edelstahlschrauben zum Einsatz.

2.2.3 Trag- und Verformungsverhalten, Bemessung

2.2.3.1 Tragverhalten unter Raumtemperatur

Die Kraftübertragung erfolgt über die Vollgewindeschrauben, die planmäßig in Achsrichtung beansprucht werden. Gekreuzte Schrauben werden dabei auf Herausziehen oder Hineindrücken belastet. Parallel zueinander angeordnete Schrauben werden auf Zug beansprucht. Die Druckkraft wird dabei durch den Kontakt der beiden Träger übertragen und erzeugt eine Haftwirkung.

Der Auszieh Widerstand der Schraube ist von den Ausziehparametern und dementsprechend von der Rohdichte des Holzes abhängig. Die Zugtragfähigkeit wird durch die Zugfestigkeit der Schraube vorgegeben. Die Werte für die Ausziehparameter und Zugfestigkeiten können bei Schrauben mit herstellereigenem Verwendbarkeitsnachweis den Zulassungen entnommen werden und bei genormten Schrauben der DIN EN 1995-1-1. Die axiale Tragfähigkeit auf Herausziehen und Hineindrücken wird als gleich groß angenommen.

Ein Versagen der Verbindung kann durch folgende Mechanismen erfolgen:

- Überschreitung der Ausziehfestigkeit der Schraube im Holz
- Durchziehen des Schraubenkopfes
- Abreißen der Schraube auf Zug
- Knickversagen der Schraube bei Druckbelastung



Abbildung 2-6: Ausziehen der im Hauptträger eingedrehten Schraube aus dem Nebenträger (vordere abgebildete Schraube)

Das Last-Verschiebungsdiagramm einer Haupt-Nebenträger-Verbindung mit Vollgewindeschrauben zeigt in der Regel keine Duktilität auf. Das Versagen der Verbindung ist spröde (vgl. Abbildung 2-7).

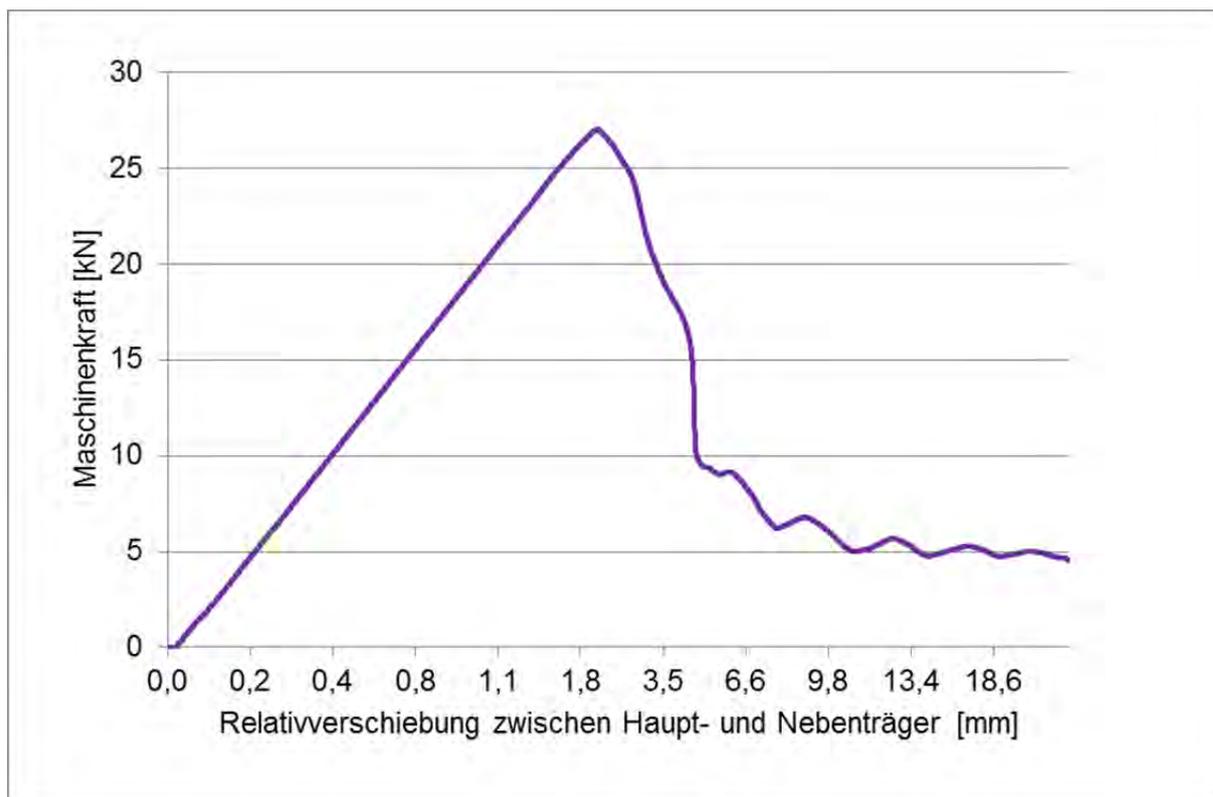


Abbildung 2-7: Verformungsverhalten von Haupt-Nebenträger-Verbindungen mit gekreuzt angeordneten Schrauben ($d=6\text{mm}$, $l=180\text{mm}$, 45°)

Bei der Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit von Haupt-Nebenträgeranschlüssen mit parallel zueinander oder gekreuzt angeordneten Schrauben ist die Lagerungsart des Hauptträgers zu beachten. Die gelenkige oder eingespannte Lagerung des Hauptträgers erzeugt eine unterschiedliche Beanspruchung der Verbindung in der Fuge.

Bei eingespannten Hauptträgern wird angenommen, dass die Auflagerkraft des Nebenträgers in der Fuge übertragen wird.

Für Anschlüsse mit zwei parallel zueinander angeordneten Schrauben sowie einem gelenkig gelagerten Hauptträger muss ein vorgegebener Einschraubwinkel eingehalten werden, damit die Druckkraft in der Fuge zwischen den Bauteilen übertragen werden kann. Das System wird ansonsten kinematisch.

Bei gekreuzt angeordneten Schrauben sowie gelenkig gelagerten Hauptträgern wird die Auflagerkraft in einem bestimmten Abstand zur Fuge übertragen, sofern ein vorgegebener Einschraubwinkel eingehalten wird [5]. Dabei sollen sich die Kräftevektoren aus der Auflagerkraft und der Zug- und Druckkraft in einem Punkt schneiden. Andernfalls entsteht ein zusätzliches Moment infolge der Ausmitte des Schnittpunktes der Kräftevektoren aus den Schrauben zum Vektor aus der Auflagerkraft. Mit steigender Größe dieses Momentes sinkt die Tragfähigkeit eines Haupt-Nebenträgeranschlusses mit gekreuzt angeordneten Schrauben [4].

2.2.3.2 Bemessung unter Raumtemperatur

Für Anschlüsse mit parallel angeordneten Schrauben kann die aufnehmbare Querkraft für eingespannt gelagerte Hauptträger nach Gleichung (5) ermittelt werden.

$$F_{v,k} = F_{ax,\alpha,k} \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) \quad (5)$$

Bei einem gelenkig gelagerten Hauptträger darf Gleichung (5) nur dann verwendet werden, wenn für den Einschraubwinkel α Gleichung (6) eingehalten wird. Da bei einem größeren Einschraubwinkel keine Druckkraft in der Fuge übertragen werden kann, wird das System kinematisch.

$$\alpha \leq \arctan \frac{H - y}{z} \quad (6)$$

Dabei ist

$F_{v,k}$	charakteristische Querkrafttragfähigkeit
$F_{ax,\alpha,k}$	charakteristischer Wert des axialen Ausziehwiderstandes oder des Widerstandes gegen Hineindrücken
α	Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaser;
H	Höhe des Nebenträgers in mm;
z	halbe Breite des Hauptträgers, Schnittpunkt zwischen der Zug- und druckbeanspruchten Schraube in mm;
y	Abstand Ober-/ Unterkante des Hauptträgers bis Einschnitt der Schraube in Fugenebene [mm]
μ	Reibwert zwischen den Bauteilen, sofern der Reibwert zwischen Holzbauteilen unbekannt ist, darf der Reibwert zu $\mu = 0,25$ angenommen werden

Für Anschlüsse mit gekreuzten Schrauben sowie einem eingespannt gelagerten Hauptträger kann die aufnehmbare Querkraft nach Gleichung (7) ermittelt werden.

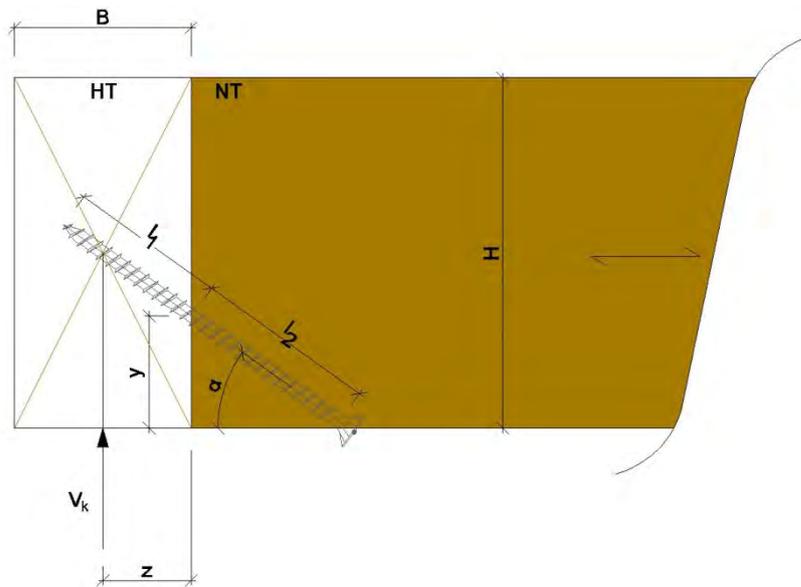
$$F_{v,k} = 2 \cdot F_{ax,\alpha,k} \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Für gelenkig gelagerte Hauptträger darf Gleichung (7) nur angewendet werden, wenn für den Einschraubwinkel α folgende Bedingung Gleichung (8) eingehalten wird. Bei der Verwendung anderer Einschraubwinkel schneiden sich die Kraftvektoren nicht mehr in einem gemeinsamen Punkt. Dadurch entsteht ein Moment, welches die Querkrafttragfähigkeit der Verbindung reduziert.[5]

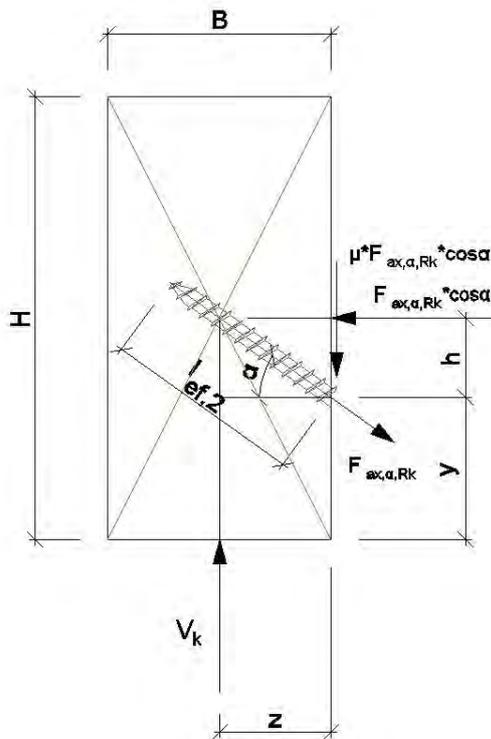
$$\alpha = \arctan \frac{h}{2 \cdot z} \quad (8)$$

Dabei ist

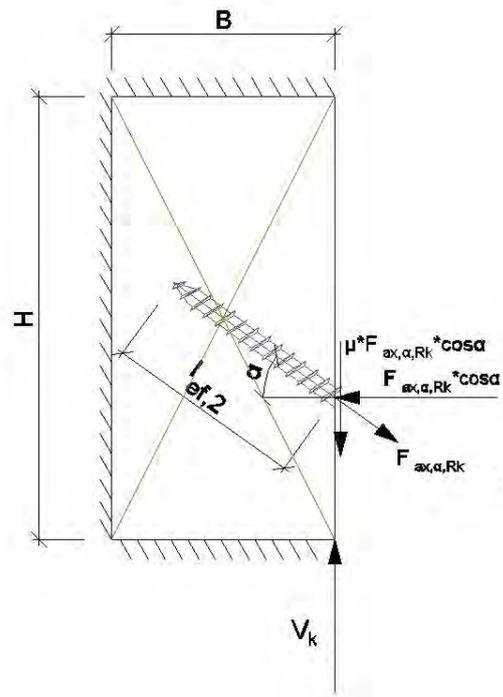
h	Abstand zwischen der zug- und druckbeanspruchten Schraube in Fugenebene
-----	-------------------------------------------------------------------------



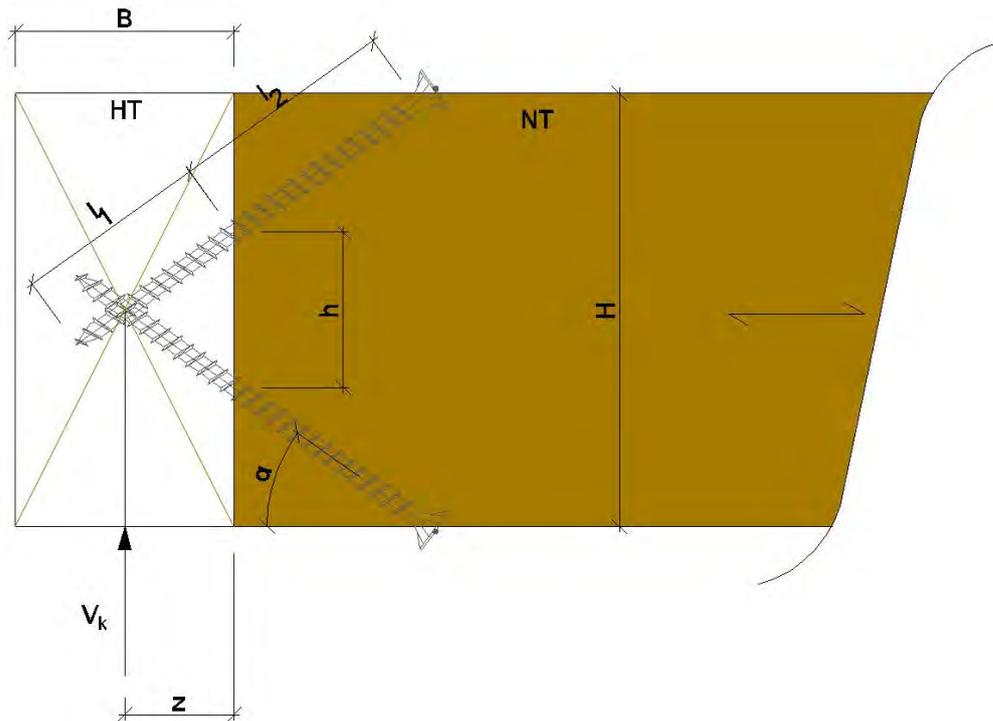
Haupt-Nebenträgerverbindung mit zwei parallel angeordneten Schrauben



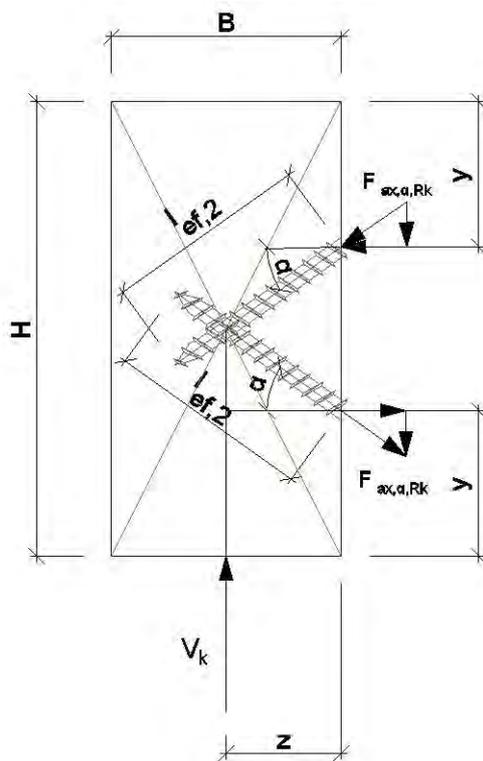
Hauptträger gelenkig



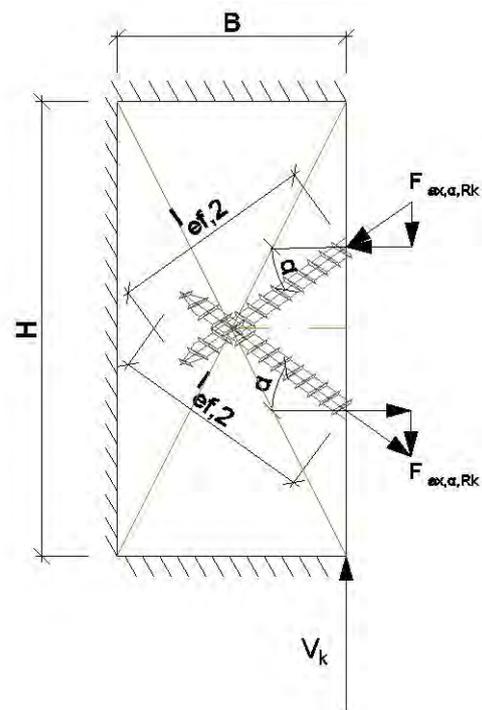
Hauptträger eingespannt



Hauptnebenträgerverbindung mit gekreuzten Schrauben



Hauptträger gelenkig



Hauptträger eingespannt

Abbildung 2-8: Kraftverlauf der geschraubten Anschlüsse

Um beim Einschrauben von nicht vorgebohrten Vollgewindeschrauben ein Spalten des Holzes zu verhindern, muss eine Mindestdicke der Bauteile eingehalten werden. Im Weiteren müssen Mindestabstände zwischen den Schrauben beachtet werden, da das Holz auch bei klein gewählten Verbindungsmittelabständen zum Spalten neigt [4].

Geringere Mindestabstände im Vergleich zur Bemessung nach DIN EN 1995-1-1 sind bei Schrauben möglich, die über Bohrspitzen, Schneidgewinde, Reibschäfte oder ähnliche Merkmale verfügen, da diese die Gefahr des Aufspaltens reduzieren. Bei Schrauben, die nur auf Herausziehen beansprucht werden, können die Mindestabstände weiter reduziert werden [7].

Beim Vergleich der Mindestholzdicke und der Mindestabstände für Schrauben nach DIN EN 1995-1-1 + NA, die auf Herausziehen beansprucht werden, mit den Anforderungen aus der Zulassung Z-9.1-519 [48] der Firma SPAX International GmbH & Co. KG zeigen sich folgende Unterschiede [3].

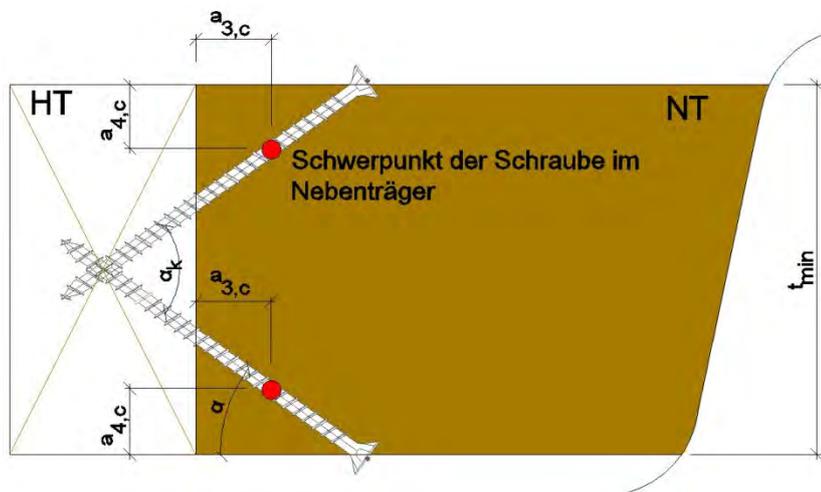
Tabelle 2-1: Vergleich der Anforderungen aus DIN EN 1995-1-1 mit den Anforderungen aus Z-9.1-519 [48]

Mindestdicke	DIN EN 1995-1-1 + NA		Z-9.1-519	
	nicht vorgebohrt	vorgebohrt	nicht vorgebohrt	vorgebohrt
Vollholz aus Nadelholz:	$t_{min} = \max \left\{ 14 \cdot d_1; (13 \cdot d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{200} \right\}$		-	$t_{min} = 12 \cdot d$
Vollholz aus Kiefer:	$t_{min} = \max \left\{ 7 \cdot d_1; (13 \cdot d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400} \right\}$		-	
Mindestabstände	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k < 500 \text{ kg/m}^3$	-	-
Abstand a_1 (in Faserrichtung)	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 7 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7 + 8 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$
Abstand a_2 (rechtwinklig zur Faserrichtung)	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$	$(3 + \sin \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$ bzw. $2,5 \cdot d$ (wenn $a_1 \cdot a_2 = 25 \cdot d^2$)
Abstand $a_{3,t}$ (beanspruchtes Hirnholzende)	$(10 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(15 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	*
Abstand $a_{3,c}$ (unbeanspruchtes Hirnholzende)	$10 \cdot d$	$15 \cdot d$	$7 \cdot d$	$5 \cdot d$
Abstand $a_{4,t}$ (beanspruchter Rand)	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(7 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(7 + 5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(3 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(3 + 4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	*
Abstand $a_{4,c}$ (unbeanspruchter Rand)	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$	$3 \cdot d$

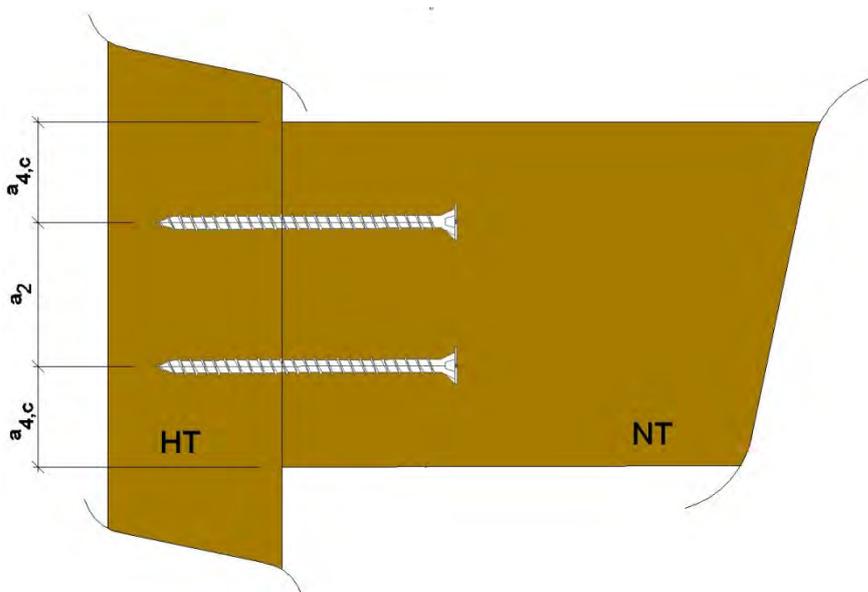
* Für planmäßig auf Herausziehen beanspruchte Vollgewindeschrauben der Firma SPAX International GmbH & Co. KG sind alle Ränder als unbeansprucht anzusehen

Dabei ist

- t die Mindestholzdicke in mm;
- ρ_k der charakteristische Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m^3 ;
- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm;
- α Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaser;
- a_1 Abstand der Verbindungsmittel innerhalb einer Reihe in Faserrichtung;
- a_2 Abstand der Verbindungsmittelreihen rechtwinklig zur Faserrichtung;
- $a_{3,c}$ Abstand zwischen Verbindungsmittel und unbeanspruchtem Hirnholzende;
- $a_{3,t}$ Abstand zwischen Verbindungsmittel und beanspruchtem Hirnholzende;
- $a_{4,c}$ Abstand zwischen Verbindungsmittel und unbeanspruchtem Rand;
- $a_{4,t}$ Abstand zwischen Verbindungsmittel und beanspruchtem Rand.



Ansicht



Draufsicht

Abbildung 2-9: Mindestabstände

Für gekreuzt angeordnete Schrauben darf der Achsabstand a_2 nach Zulassung Z-9.1-519 wie folgt angenommen werden:

$$a_2 = \max \begin{cases} 1,5 \cdot d & \text{bei } 70^\circ < \alpha_k \leq 90^\circ \\ 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\alpha_k}{180^\circ}\right) \cdot d & \text{bei } 0^\circ \leq \alpha_k \leq 70^\circ \end{cases} \quad (9)$$

Dabei ist

α_k Kreuzungswinkel der Schrauben

Zwischen parallel angeordneten Schrauben benachbarter Schraubenkreuze sind die Mindestabstände a_1 und a_2 der Spalte 5 aus Tabelle 2-1 einzuhalten.

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit gegen Herausziehen unterscheiden sich die Bemessungsformeln nach DIN EN 1995-1-1 und Z-9.1-519 ebenfalls.

Tabelle 2-2: Bemessungsformeln nach DIN EN 1995-1-1 und Z-9.1-519 für eine Schraube

	DIN EN 1995-1-1+NA ¹⁾	Z-9.1-519 ^{2) 3)}
Widerstand gegen Herausziehen	$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{f_{ax,k} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot k_d}{1,2 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2}$ <p>mit:</p> $f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8}$ <p>für</p> $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ $0,6 \leq d/d_1 \leq 0,75$ <p>Sind die Anforderungen in Bezug auf den gegebenen Außen- und Innendurchmesser des Gewindes nicht erfüllt, gilt</p> $F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{f_{ax,\rho,k} \cdot l_{ef} \cdot d}{1,2 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8}$	$F_{ax,Rk} = k_{ax} \cdot f_{1,k} \cdot l_{ef} \cdot d \text{ [N]}$ <p>mit</p> $f_{1,k} = 80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$ $k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{45^\circ} \text{ für } 15^\circ \leq \alpha < 45$ $k_{ax} = 1,0 \text{ für } \alpha \geq 45$ $k_{ax} = 1,25 \text{ für } \alpha = 90^\circ \text{ und } d \leq 8 \text{ mm}$ <p>für Vollholz, Brettschichtholz, Brett- oder Balkenlagenholz</p> $f_{1,k} = 55 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$ <p>für Vollholzaus Buche oder Eiche oder Brettschichtholz aus Buche, Eiche oder Esche</p>
Widerstand gegen Kopfdurchziehen	$F_{ax,\alpha,Rk} = f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8}$	$F_{ax,Rk} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{2,k} \cdot d_k^2 \\ k_{ax} \cdot f_{1,k} \cdot l_{ef,k} \cdot d \end{array} \right. \text{ [N]}$ <p>mit:</p> $f_{2,k} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$ <p>für Halbrundkopf-, Tellerkopf- und Sechskantkopfschrauben mit Flansch beim Anschluss von Holzbauteilen aus Nadelholz</p> $f_{2,k} = 80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$ <p>für alle anderen Kopfformen beim Anschluss von Holzbauteilen aus Nadelholz und für Schrauben mit Tellerkopf</p>

		<p>oder Unterlegscheibe beim Anschluss von Holzbauteilen aus Laubholz</p> $f_{2,k} = 60 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$ <p>für alle anderen Kopfformen beim Anschluss von Holzbauteilen aus Laubholz</p> <p>Beim Anschluss von Holzbauteilen mit Dicken $\geq 12\text{mm}$ bis $\leq 20\text{mm}$ darf nur mit $f_{2,k} = 8 \text{ N/mm}^2$ gerechnet werden.</p>
Zugtragfähigkeit des Stahles	$F_{t,Rk} = f_{tens,k}$	$F_{t,Rk}$ nach Tabelle 1 Z-9.1-519
Beanspruchung auf Zug	$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} F_{ax,Rd} \text{ Herausziehen} \\ R_{t,Rd} \text{ Zugtragfähigkeit} \\ F_{ax,Rd} \text{ Kopfdurchziehen} \end{cases}$	$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} F_{ax,Rd} \text{ Herausziehen} \\ F_{t,Rd} \text{ Zugtragfähigkeit} \\ F_{ax,Rd} \text{ Kopfdurchziehen} \end{cases}$
Beanspruchung auf Druck	$l_{ef} \leq 11500 \cdot \left(\frac{d}{\rho_k}\right)^{1,1}$ [mm] nach [5], um ein Ausknicken unter Druckbeanspruchung zu verhindern	$F_{c,\alpha,Rd} = \min \begin{cases} F_{ax,Rd} \\ F_{ki,Rd} \end{cases}$ $F_{ki,Rd}$ nach Tabelle 4 Z-9.1-519
Widerstand gegen Herausziehen	$n_{ef} \cdot F_{ax,Rd}$	$n_{ef} \cdot F_{ax,Rd}$

¹⁾Einschraubtiefen l_{ef} kleiner $6 \cdot d$ dürfen nicht in Rechnung gestellt werden

²⁾Ausgenommen in dieser Tabelle ist die Bemessung in Kerto

³⁾ Einschraubtiefen l_{ef} kleiner $4 \cdot d$ dürfen nicht in Rechnung gestellt werden

Dabei ist

k_{ax} Beiwert zur Berücksichtigung des Einschraubwinkels;

$f_{l,k}$ charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung in N/mm^2 ;

$F_{ax,\alpha,Rk}$ der charakteristische Wert des Ausziehwidestands der Verbindung unter einem Winkel α zur Faserrichtung, in N;

der charakteristische Durchziehwidestand der Verbindung unter einem Winkel α zur Faserrichtung in N, mit $\alpha > 30^\circ$;

$f_{ax,k}$ der charakteristische Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung in N/mm^2 ;

$f_{ax,\rho,k}$ der nach EN 14592 bestimmte charakteristische Ausziehparameter rechtwinklig zur Faserrichtung für die zugehörige Rohdichte ρ_a ;

$f_{head,k}$ der charakteristische Durchziehparameter der Schraube, bestimmt nach EN 14592 für die zugehörige Rohdichte ρ_a ;

$f_{tens,k}$ der charakteristische Zugwidestand der Schraube, bestimmt nach EN 14592;

l_{ef} Gewindelänge im Holzteil mit der Schraubenspitze in mm;

$l_{ef,k}$ Gewindelänge im Holzteil mit dem Schraubenkopf in mm;

α Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaser;

d	Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm;
d_I	Innendurchmesser des Gewindes der Schraube in mm;
d_k	Kopfdurchmesser der Schraube oder Durchmesser der Unterlegscheibe in mm;
d_h	Kopfdurchmesser der Schraube in mm;
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzbaustoffs in kg/m ³ ;
ρ_a	die zugehörige Rohdichte für $f_{ax,k}$ in kg/m ³ in kg/m ³

Bei einer Verbindung mit einer Schraubengruppe, die durch eine Kraftkomponente in Schaft-richtung beansprucht wird, beträgt die wirksame Anzahl der Schrauben:

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (10)$$

Dabei ist

n_{ef}	die wirksame Anzahl der Schrauben;
n	die Anzahl der Schrauben, die in einer Verbindung zusammenwirken.

2.2.3.3 Bemessung von auf Herausziehen beanspruchte Schrauben unter Brandbeanspruchung

Der Bemessungswert für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben unter Brandeinwirkung kann gemäß DIN EN 1995-1-2 Abschnitt 6.4 [45] rechnerisch nur dann ermittelt werden, wenn diese vor direkter Brandeinwirkung geschützt werden.

Hierbei soll die Beanspruchbarkeit der Schraube auf Herausziehen in Brandfall durch das Abmindern der Kalttragfähigkeit mit einem Umrechnungsfaktor η ermittelt werden.

Voraussetzung zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors ist die Einhaltung der Randabstände a_2 und a_3 in Abhängigkeit vom Randabstand a_1 .

Der in der DIN EN 1995-1-2 beschriebene Randabstand a_1 entspricht dem Randabstand $a_{4,c}$ der Kaltbemessung (vgl. Abbildung 2-10).

$$a_2 = a_1 [mm] + 40mm \quad (11)$$

$$a_3 = a_1 [mm] + 20mm \quad (12)$$

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{für } a_1 \leq 0,6 \cdot t_{d,fi} \\ \frac{0,44 \cdot a_1 - 0,264 \cdot t_{d,fi}}{0,2 \cdot t_{d,fi} + 5} & \text{für } 0,6 \cdot t_{d,fi} \leq a_1 \leq 0,8 \cdot t_{d,fi} + 5 \\ \frac{0,56 \cdot a_1 - 0,36 \cdot t_{d,fi} + 7,32}{0,2 \cdot t_{d,fi} + 23} & \text{für } 0,8 \cdot t_{d,fi} + 5 \leq a_1 \leq t_{d,fi} + 28 \\ 1,0 & \text{für } a_1 \geq t_{d,fi} + 28 \end{cases} \quad (13)$$

mit:

a_1	seitliche Überdeckung, in mm, siehe Abbildung 2-10;
$t_{d,fi}$	erforderliche Feuerwiderstandsdauer, in Minuten.

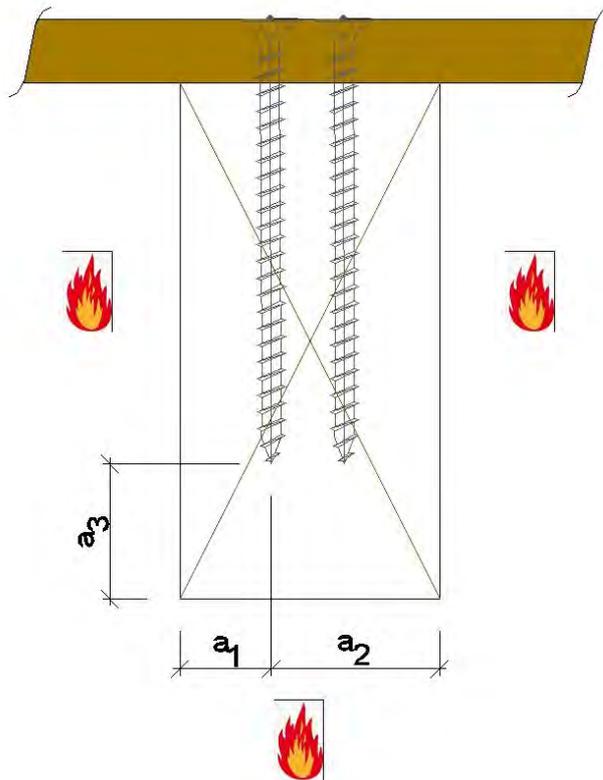


Abbildung 2-10: Definition der Randabstände

Der Umrechnungsfaktor η für Verbindungsmittel mit Randabständen $a_2 = a_1$ und $a_3 \geq a_1 + 20 \text{ mm}$ sollte entsprechend Gleichung (13) berechnet werden, wobei $t_{d,fi}$ durch $1,25 t_{d,fi}$ zu ersetzen ist.

Für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben, deren Kopf nicht vor Brandeinwirkung geschützt ist, liegen derzeit keine Bemessungsregeln vor. Ziel der Arbeit ist es daher Bemessungsregeln zu überprüfen und zu optimieren, wodurch geringere Randabstände verwendet werden können. Außerdem sollen Konstruktionsmöglichkeiten für Verbindungen mit auf Herausziehen beanspruchten Schrauben entwickelt werden, die ohne eine Überdeckung des Schraubenkopfes eine Feuerwiderstandsdauer bis zu 60 Minuten ermöglichen.

3 Versuche zur Prüfung der temperaturabhängigen Ausziehfestigkeit von Vollgewindeschrauben

3.1 Allgemeines

Die Festigkeit der Vollgewindeschrauben und des umgebenden Holzes wird im Brandfall durch die steigende Temperatur in der Verbindung reduziert. Je höher die Temperatur entlang eines stiftförmigen Verbindungsmittels und des umgebenden Holzes ist, desto weniger Widerstand bietet die Verbindung gegen das Ausziehen der Schraube. Erhöhte Temperaturen führen sowohl zu einem Festigkeitsverlust des Holzes als auch der Schraube.

In Bereichen entlang der Schraube, in welchen die Verbindung 300°C überschreitet, ist keine Tragfähigkeit zu erwarten, da das Holz verkohlt ist. Die Abnahme der Stahlfestigkeit spielt bei dieser Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Abbildung 1-8).

In ähnlichem Maße wie die Schubfestigkeit des Holzes (vgl. Abbildung 1-7) sollte sich die Ausziehfestigkeit einer Schraube unter Temperaturbeanspruchung verhalten, da der Ausziehvorgang einer Schubbeanspruchung ähnlich ist. Das temperaturabhängige Ausziehverhalten der Vollgewindeschrauben wird infolge der geringen Datenlage daher für den weiteren Verlauf der Arbeit in Versuchen analysiert.

Die Temperaturbeanspruchung entlang der Schraube kann durch zahlreiche Randbedingungen beeinflusst werden. Zu nennen sind dabei vor allem verschiedene Längen, Durchmessern, Kopffarten und Materialien der Vollgewindeschrauben sowie unterschiedlicher Holzüberdeckungen.

Sofern der Schraubenkopf nicht vor der Brandbeanspruchung geschützt wird, werden die Temperaturen hauptsächlich über den Schraubenkopf in die Verbindung geleitet. Die große Wärmeleitfähigkeit des Stahles im Vergleich zum Holz (vgl. Abbildung 1-10) führt zu einem deutlich größeren Wärmeeintrag über die Schraube in die Verbindung. Am Kopf entstehen dabei die höchsten Temperaturen. Mit zunehmender Entfernung vom Schraubenkopf nehmen die Temperaturen ab, da die Wärme in das umliegende Holz abgeführt wird.

3.2 Notwendigkeit der Versuche

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Ausziehtragfähigkeit von Vollgewindeschrauben in Vollholz wurden Prüfungen angelehnt an DIN EN 1382 [47] durchgeführt. Dabei sollte festgestellt werden, inwiefern sich die Ausziehtragfähigkeit der Vollgewindeschrauben unter Temperatureinfluss verändert. Die Ergebnisse dienen zur Abschätzung der Tragfähigkeit von auf Herausziehen beanspruchten Schrauben im Brandfall, die durch verschieden große

Randabstände oder Überdeckungen sowie Einschraubwinkel und Orientierungen zur Faser unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen ausgesetzt werden. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse aus den unbelasteten Brandversuchen (vgl. Abschnitt 0) und der numerischen Simulation (vgl. Abschnitt 7) kann die Temperaturverteilung entlang der Schraube abgebildet werden. Den einzelnen Temperaturbereichen kann mit Hilfe dieser Versuchsergebnisse die entsprechende temperaturabhängige Ausziehfestigkeit zugewiesen werden. Durch Addition der einzelnen Ausziehfestigkeiten entlang der Schraube, kann die Tragfähigkeit der Verbindung im Brandfall abgeschätzt werden. Dieses Verfahren dient zur Abschätzung der erreichbaren Querkrafttragfähigkeit in den belasteten Brandversuchen (vgl. Abschnitt 5.3).

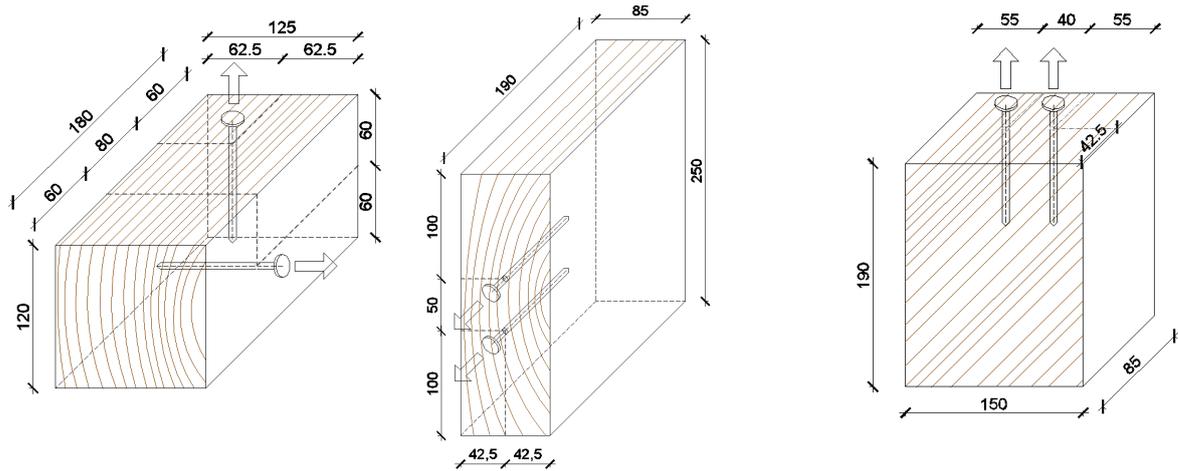
3.3 Versuchsaufbau

3.3.1 Prüfkörperaufbau

Die DIN EN 1382 gibt die Mindestabmessungen der Prüfkörper vor. Die Prüfkörper bestanden aus Vollholz der Festigkeit C24 mit jeweils zwei 80 mm tief eingeschraubten Vollgewindeschrauben.

Um möglichst kleine Prüfkörper zu erhalten, wurden Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 6 mm und einer Länge von 100 mm gewählt.

Die Größe der Prüfkörper unterschied sich in Abhängigkeit des Einschraubwinkels zur Faser des Holzes. Die beiden Schrauben eines Versuchskörpers wurden entweder senkrecht, parallel oder unter 45° zur Faser ohne Vorbohren ins Holz geschraubt. Zur Prüfung der Ausziehfestigkeit senkrecht zur Faser des Holzes wurden je eine Schraube radial zu den Jahresringen und die andere Schraube tangential zu den Jahresringen eingeschraubt.



90° zur Faser



0° zur Faser



45° zur Faser

Abmessungen der Prüfkörper in Abhängigkeit des Einschraubwinkels zur Faser

Abbildung 3-1: Abmessung der Prüfkörper

Der Abstand der Schrauben zueinander sowie der Abstand der Schrauben zum Rand variierte ebenfalls in Abhängigkeit des Einschraubwinkels (siehe Abbildung 3-1).

Um die temperaturabhängige Abnahme der Ausziehfestigkeit bestimmen zu können, wurden die Prüfkörper auf unterschiedliche stationäre Temperaturen in einem Wärmeofen erwärmt. Für jeden Temperaturschritt und jede Versuchskörperabmessung wurde ein Referenzkörper angefertigt. Dieser wurde in seiner Mitte mit einem Nickel-Chrom-Nickel-Thermoelement versehen, um festzustellen, ob der gesamte Prüfkörper die gewünschte Temperatur erreicht hat. Für jeden Temperaturschritt und jeden Einschraubwinkel wurden mindestens 4 Prüfkörper gefertigt. Die Rohdichte der Prüfkörper variierte zwischen 350 - 480 kg/m³. Die Ausgangsholzfeuchte lag bei 14- 17 M-%.

Als Temperaturstufen für die Versuche wurden 20°C, 50°C, 80°C, 100°C, 120°C, 150°C und 180°C vorgesehen. Insgesamt wurden ca. 28 Probekörper je Neigung zur Faserrichtung hergestellt, um pro Versuchsreihe mindestens vier Ergebnisse zu erhalten.

Je Körper wurden zwei Vollgewindeschrauben der Firma SPAX International GmbH & Co. KG mit Durchmesser 6 mm und Länge 100 mm auf der Stirnseite des Holzklotzes 80 mm weit ohne Vorbohren eingedreht.

3.3.2 Aufbau des Versuchstandes

Den normativen Rahmen hinsichtlich des Versuchsaufbaus und der Abmessungen der Probekörper lieferte die DIN EN 1382 zur Ausziehfestigkeit von Holzverbindungsmiteln. Das verwendete Prüfgerät ist eine Universalspindelprüfmaschine Z 6000 des Herstellers Zwick-Roell. Die Auszugsprüfung wurde mit einer gleichförmigen Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass F_{\max} in etwa 90 ± 30 Sekunden erreicht wurde. Eingespannt wurden die Proben in eine Konstruktion, bestehend aus einer massiven Holzscheibe, an der vier Gewindestangen nach oben und eine nach unten befestigt waren. Während die untere Stange in die Prüfmaschine eingespannt wurde, fixierten Flachstähle die Holzprobe zwischen den anderen Gewindestangen. Die Ausziehvorrichtung bestand aus einem U-Profil mit seitlicher Nut im Steg, in welche die Schraube eingeführt werden konnte (siehe Abbildung 3-2). Diese Vorrichtung wurde bei allen Versuchen angewandt.



Prüfgerät

Abbildung 3-2: Einspannvorrichtung und Prüfgerät



Ausziehvorrichtung



Einspannvorrichtung

Durch die beschriebene Einspannung der Prüfkörper wirkte die Ausziehkraft in Richtung der Achse des Verbindungsmittels (siehe Abbildung 2).

Die Prüfkörper wurden vor den Ausziehversuchen unter konstanter Temperatureinwirkung aufgewärmt. Der Temperaturabfall während der Prüfung wurde am Referenzkörper gemessen und belief sich in Prüfkörpermitte auf max. 2 °C.

Bei den Versuchen mit auf 50°C erwärmten Proben war auffällig, dass jeder Körper verhältnismäßig große Schwindrisse aufwies, was in Kombination mit der nicht optimalen Einspannvariante dazu führte, dass bei dem zweiten Ausziehvorgang meist ein Holzversagen entlang der Faserrichtung auftrat. Deswegen wurde die Einspannvorrichtung für die nachfolgenden Versuche insofern verbessert, dass eine größere Einspannfläche durch längs und

quer verlegte Flachstahl ausgeführt wurde (siehe Abbildung 3-2 Bild rechts). Vorher wurde nur quer liegender Flachstahl verwendet.

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Allgemeines

Die Prüfergebnisse wurden aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten auf mehrere Prüfkollektive aufgeteilt.

Analysiert wurden die Prüfergebnisse hinsichtlich der absoluten Auszieh Widerstände (Ausziehfestigkeit f). Zusätzlich fand eine Berechnung und vergleichende Betrachtung der charakteristischen Werte und der Mittelwerte statt.

Die Ermittlung der Ausziehfestigkeit f kann mit Hilfe der im Versuch erzielten maximalen Ausziehlast und der nachfolgenden Gleichung aus DIN EN 1382 erfolgen:

$$f = \frac{F_{max}}{d_{nom} * l_p} \quad (14)$$

mit:

- f Ausziehfestigkeit [N/mm²]
- F_{max} maximale Ausziehlast [N]
- d_{nom} Durchmesser der Schraube [mm]
- l_p Eindringtiefe der Schraube einschließlich Spitze [mm]

3.4.2 Versuchsergebnisse

Die Prüfergebnisse der Ausziehversuche senkrecht zur Faser wurden auf drei Prüfkollektive aufgeteilt. Das erste Prüfkollektiv umfasste den Rohdichtebereich von 366 kg/m³ bis 381 kg/m³, das zweite Prüfkollektiv fasst die Ergebnisse der Prüfkörper mit Rohdichten von 398 kg/m³ bis 430 kg/m³ und das dritte Prüfkollektiv umfasst den Rohdichtebereich von 502 kg/m³ bis 511 kg/m³ zusammen. Die Prüfergebnisse der maximalen Ausziehlast senkrecht zur Faser in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung und der Rohdichte werden in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: maximale Ausziehlast F_{\max} [kN] senkrecht zur Faser in Abhängigkeit der Temperatur und Rohdichte

Rohdichtebereich/ Temperatur	20°C	50°C	80°C	100°C	120°C	150°C	180°C
366-381 kg/m ³			6,91	7,31	5,73	5,06	
			6,62	6,74	5,30	6,49	
398-430 kg/m ³		7,79		6,58	6,21	5,54	3,73
		7,25		7,42	5,55	5,03	5,02
		7,31					5,80
		7,32					4,96
502-511 kg/m ³	9,30		8,22				
	8,35		7,52				
	8,55						
	9,62						

Mit Hilfe der maximalen Auszugslast F_{\max} aus den Versuchen kann die Ausziehfestigkeit f als Funktion des Durchmessers und der Einbindelänge berechnet werden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 11-2 dargestellt.

Die Prüfergebnisse der Ausziehversuche parallel zur Faser wurden auf zwei Prüfkollektive aufgeteilt. Das erste Prüfkollektiv umfasste den Rohdichtebereich von 403 kg/m³ bis 420 kg/m³, das zweite Prüfkollektiv fasst die Ergebnisse der Prüfkörper mit Rohdichten von 432 kg/m³ bis 450 kg/m³ zusammen. Tabelle 3-2 zeigt die maximale Ausziehlast der Schrauben, die parallel zur Holzfasern angeordnet wurden, auf.

Tabelle 3-2: maximale Ausziehlast F_{\max} [kN] parallel zur Faser in Abhängigkeit der Temperatur und Rohdichte

Rohdichtebereich/ Temperatur	20°C	50°C	80°C	100°C	120°C	150°C	180°C
403-420 kg/m ³	6,26	4,30	5,78	5,78	5,53	5,32	
	7,22	3,48	6,22	5,36	5,64	5,82	
						4,65	
						3,98	
432-450 kg/m ³	7,26	5,42	7,48	5,75	6,79	5,53	4,80
	8,05	5,38	7,54	5,52	5,50	5,97	3,62
		6,41	7,56	6,79	5,99		4,29
		6,96	6,46	7,04	5,30		4,39
							5,01
							5,70

Die maximale Ausziehfestigkeit f parallel zur Faser in Abhängigkeit der Temperatur wird in Abbildung 11-1 dargestellt.

Die Prüfergebnisse der Ausziehversuche unter 45° zur Faser wurden ebenfalls auf zwei Prüfkollektive aufgeteilt. Das erste Prüfkollektiv umfasste den Rohdichtebereich von 344 kg/m³ bis 372 kg/m³, das zweite Prüfkollektiv fasst die Ergebnisse der Prüfkörper mit Rohdichten von 414 kg/m³ bis 465 kg/m³ zusammen. Die maximale Ausziehlast unter einem Einschraubwinkel von 45° zur Faser wird in Tabelle 3-3 ersichtlich.

Tabelle 3-3: maximale Ausziehlast [kN] unter 45° in Abhängigkeit der Temperatur und Rohdichte

Rohdichtebereich/ Temperatur	20°C	50°C	80°C	100°C	120°C	150°C	180°C
340-372 kg/m ³	5,72	4,86	5,23	5,36	4,78	3,98	3,54
	6,86	5,40	5,15	5,72	5,02	3,65	4,10
	7,03	5,76		4,96			
	6,09	3,22		4,90			
414-465 kg/m ³		6,02	6,82	7,39	9,69	4,53	5,35
		5,23	7,39	7,50	8,73	4,55	5,51
			6,70	6,41	6,26	4,64	6,07
			5,95	6,42	5,80	4,70	5,96
			5,64		6,08	6,59	4,27
			5,93		6,07	6,02	3,99
							3,65
							3,80

Im Weiteren wurden Werte der Temperaturstufe von 50°C nicht berücksichtigt, da diese auf Grund von Holzversagen keinen Beitrag zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit liefern.

3.5 Auswertung

3.5.1 Auswertung der Versuchsergebnisse aus den Ausziehversuchen an Vollgewindeschrauben

Die Veränderung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur wird in Referenz zu den Mittelwerten aus den Versuchen unter Raumtemperatur dargestellt.

Mit zunehmender Temperatur ist eine lineare Abnahme der Ausziehfestigkeit des Holzes erkennbar.

Bei einem Einschraubwinkel senkrecht zur Holzfaser kann im gleichen Maße wie bei Holzbetonverbundschrauben [11] eine Reduzierung der Ausziehfestigkeit festgestellt werden.

Bei einer Temperaturbeanspruchung von ca. 80°C liegen etwa 88 % der mittleren Ausziehfestigkeit unter Raumtemperatur vor. Bei einer Beanspruchung von 120°C sind es nur noch etwa 70% und bei 180°C nur noch etwa 45% im Vergleich zur Ausziehfestigkeit unter

Raumtemperatur. Dieses Verhalten ist unabhängig vom Bereich der betrachteten Rohdichten (Prüfkollektiv 1 und 2).

Die Abnahme der Ausziehfestigkeit für Schrauben, die parallel zu Faser angeordnet wurden erfolgt analog den senkrecht zur Faser angeordneten Schrauben.

Auch die Ausziehfestigkeit der Schrauben, die unter 45° zur Faser angeordnet wurden, entspricht diesem Verhalten.

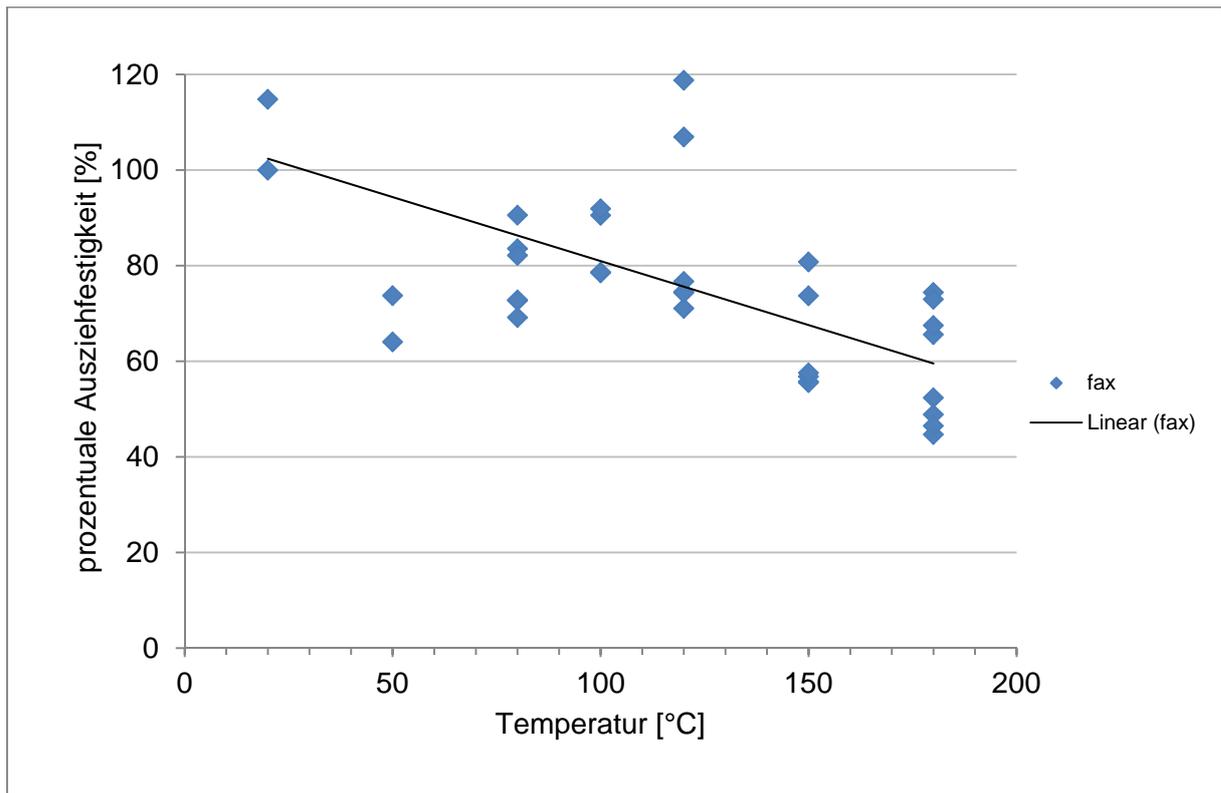


Abbildung 3-3: temperaturabhängige prozentuale Ausziehfestigkeit von Vollgewindeschrauben unter 45° in Vollholz mit einer Rohdichte von 414 kg/m³-465 kg/m³ im Bezug zum Mittelwert der Ausziehfestigkeit f bei Raumtemperatur

Weitere Diagramme, in welchen die prozentualen Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur, des Neigungswinkels der Schraube und der Rohdichte dargestellt sind, können Anhang 11.1.2 entnommen werden.

Beim Vergleich der Ausziehfestigkeiten unter verschiedenen Einschraubwinkel im Bezug zur Holzfaser wird ersichtlich, dass die Reduzierung der Ausziehfestigkeit unter Temperaturbeanspruchung nahezu unabhängig vom Winkel erfolgt.

Eine rechnerische prozentuale Ausziehfestigkeit kann mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse abgeleitet werden:

$$f(\theta) = 115,7 - 0,39 \cdot \theta \text{ für } 40^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad (10)$$

mit:

θ Temperatur in °C

f rechnerische Ausziehfestigkeit in %

Der Gleichung wird zugrunde gelegt, dass keine Reduzierung der Ausziehfestigkeit bis zu einer Temperatur von 40°C stattfindet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

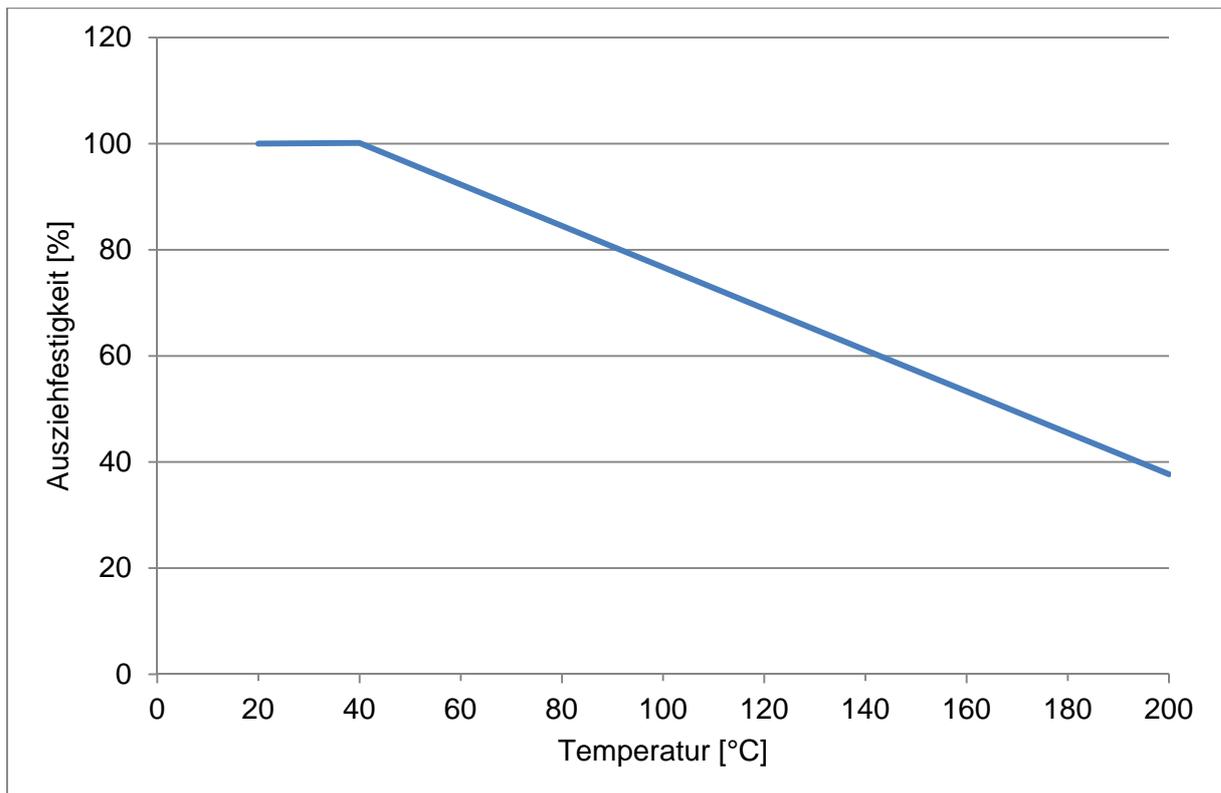


Abbildung 3-4: prozentuale Ausziehfestigkeit von Vollgewindeschrauben abgeleitet aus den Versuchen

3.5.2 Vergleich mit Versuchen an Holzbetonverbundschrauben

Eine ähnliche Reduzierung der Ausziehfestigkeit ist in Versuchen an Holzbetonverbundschrauben in Brettschichtholz aus Fichte erkennbar [11] (siehe Abbildung 3-5). Hierbei wurden die Versuchskörper wie in der eigenen Versuchsreihe auf die Versuchstemperatur bei konstanter Temperatur aufgewärmt.

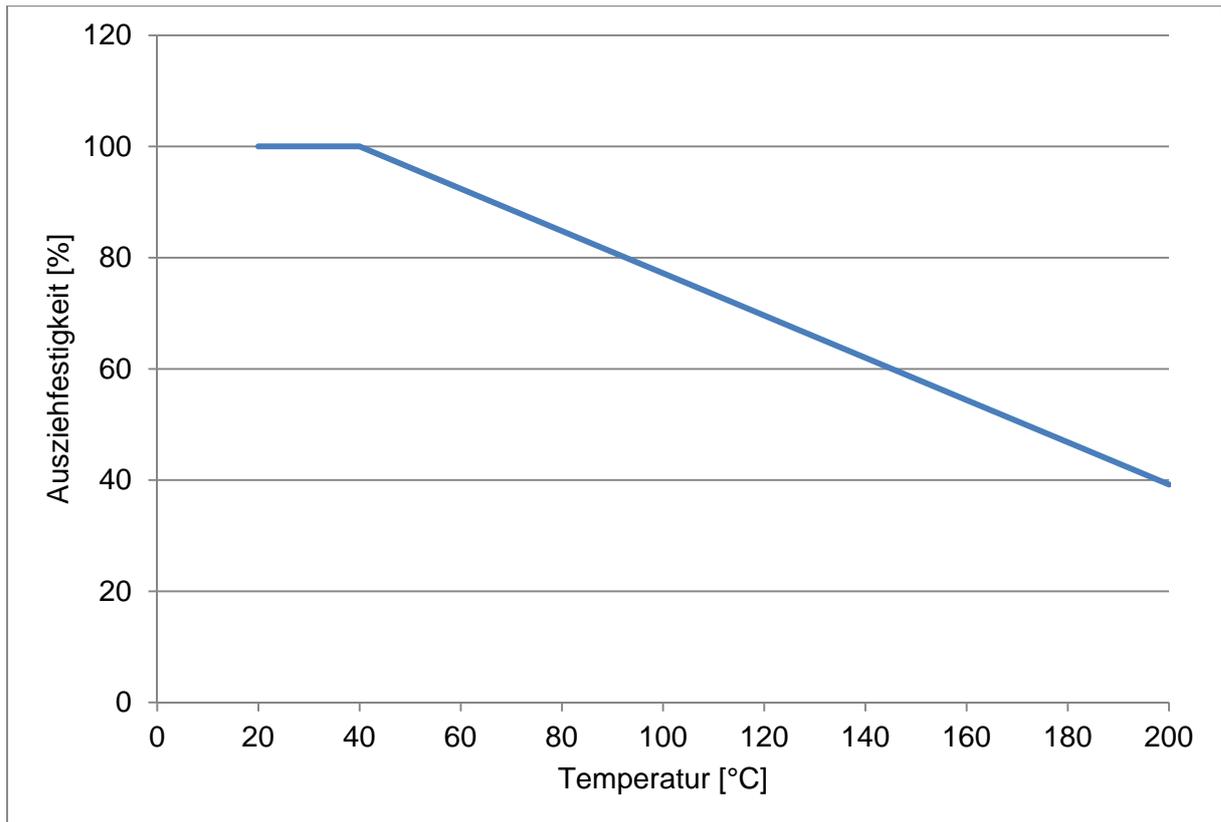


Abbildung 3-5: rechnerische Ausziehfestigkeit an Holzbetonverbundschrauben als Funktion der Temperatur unter konstanter Temperatur [11]

Im Vergleich zur Brandbeanspruchung unter der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 [46] trocknen die Querschnitte der Versuchskörper unter konstanter Temperaturbeanspruchung durch die ca. acht stündige Erwärmung deutlich stärker aus. Im Falle einer 30 minütigen Brandbeanspruchung unter ETK darf hingegen angenommen werden, dass im Inneren des Restquerschnitts keine wesentliche Austrocknung stattfindet [12].

Eine stärkere Austrocknung führt zu einer Köhäsion des Holzes und somit zu einer erhöhten Festigkeit und Steifigkeit des Holzes. Dieser Effekt lässt im Brandversuch geringere Ausziehfestigkeiten vermuten als unter konstanter Temperaturbeanspruchung.

Bei Normbrandversuchen an Verbindungen mit Holzbetonverbundschrauben konnte abgeleitet aus Bild 3.10 aus [11] folgende Abnahme der Ausziehfestigkeit festgestellt werden.

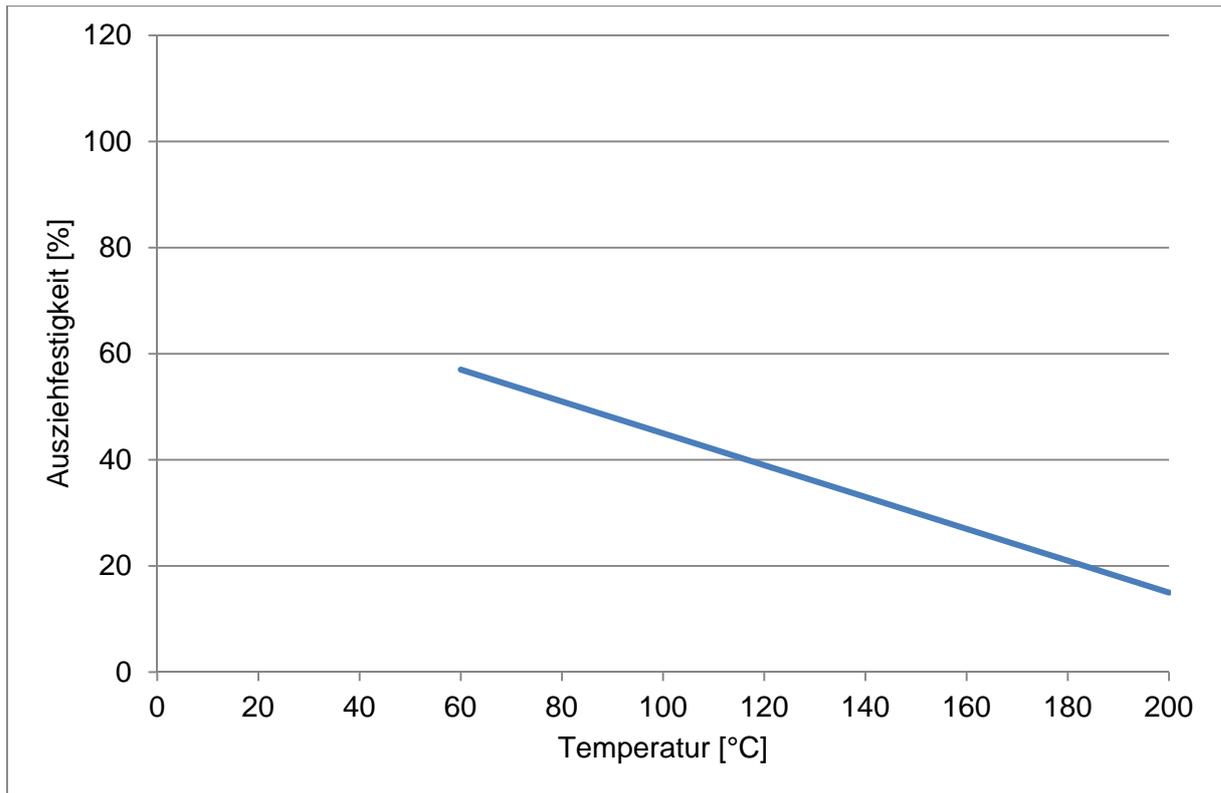


Abbildung 3-6: Ausziehfestigkeit an Holzbetonverbundschrauben als Funktion der mittleren Temperatur entlang der Schraubenachse unter ISO-Normbrandbeanspruchung [10]

Die in Abschnitt 3.5.1 ermittelten Werte stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Ausziehfestigkeiten unter konstanter Temperatur an Holzbetonverbundschrauben trotz eines anderen Schraubentyps und anderer Geometrie überein.

Es ist daher davon auszugehen, dass sich auch die Ausziehfestigkeiten unter Normbrandbeanspruchung ähnlich wie bei den Holzbetonverbundschrauben verhalten.

Mit Hilfe eines Mittelwertes aus den Ergebnissen aus Gleichung (18) und den Ergebnissen aus ISO-Normbrandversuchen an Holzbeton-Verbundschrauben in Abbildung 3-6 kann der prozentuale Abfall der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung entlang der Schraube abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 3-7). Auf Grundlage dieser Abschätzung werden die belasteten Brandversuche mit gekreuzten Vollgewindeschrauben entwickelt.

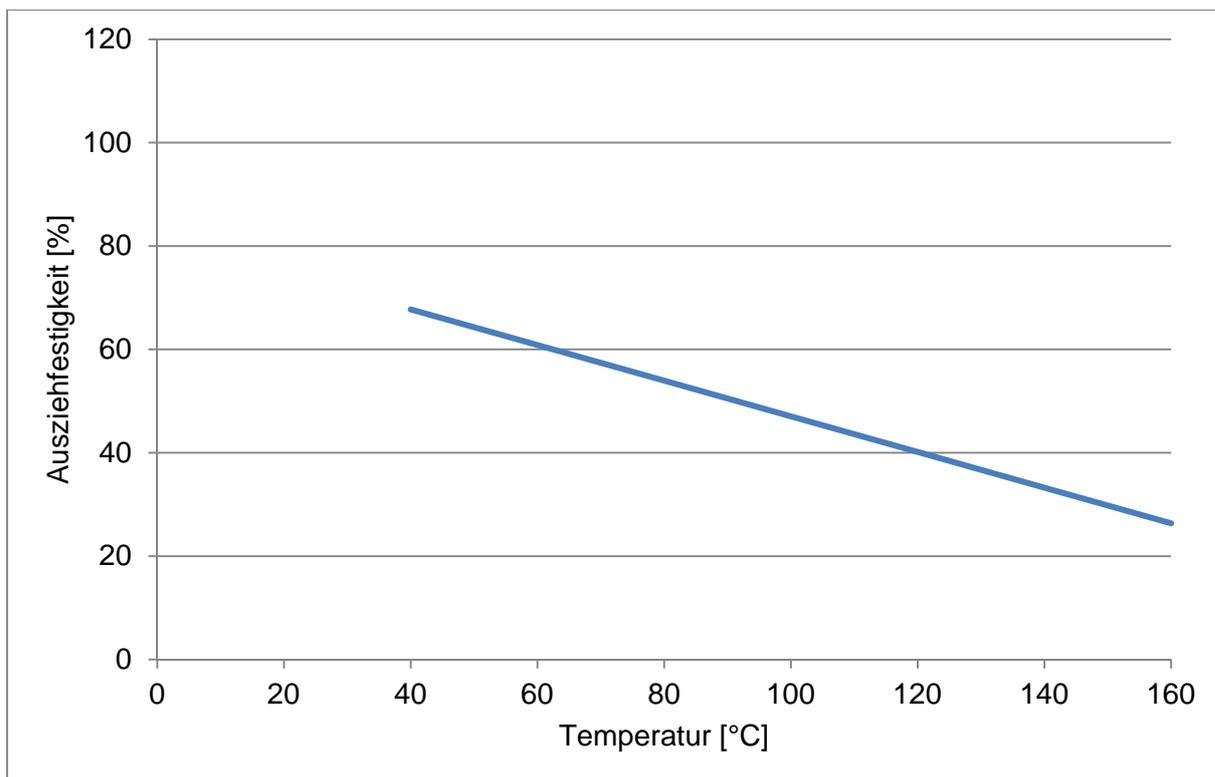


Abbildung 3-7: Mittelwert der Ausziehfestigkeit aus Beanspruchung unter konstanter Temperatur an Vollgewindeschrauben und den Ausziehfestigkeiten von Holzbetonverbundschrauben unter ISO-Normbrandbeanspruchung

4 Unbelastete Brandversuche

4.1 Zweck der Versuche

Ziel der Versuche war die Untersuchung des Brandverhaltens von Nebenträgeranschlüssen mit Vollgewindeschrauben und Balkenschuhen aus bandverzinktem Stahlblech.

Zur Beurteilung der Einflüsse von üblicherweise in den Verbindungen eingesetzten stiftförmigen Verbindungsmitteln wurde ein breites Anwendungsspektrum mit Varianz in der Anordnung, Geometrie, Art, Länge und Durchmesser in Kombination mit verschiedenen Nebenträgerquerschnitten untersucht. Ziel war es einen Überblick über tendenziell günstige und ungünstige Ausführungsarten zu gewinnen, um dadurch eine Vorauswahl für die zu planenden Brandversuche unter mechanischer Belastung zu erhalten und den nötigen Umfang dieser Versuche sinnvoll einzuschränken.

Andere im Vorhaben zu untersuchende Verbindungsbauteile, wie Balkenträger aus Aluminiumformteilen oder dickwandige Stahlblechverbinder wurden in dieser Versuchsreihe nicht berücksichtigt, da hierzu bereits weiterführende Erkenntnisse aus Versuchen der durchführenden Forschungsstelle und rechnerische Ansätze vorliegen [2].

Auf Basis der gesichteten Literatur und theoretischer Vorbetrachtungen konnte für außenliegende, dünnwandige Stahlblechformteile ohne weitere Schutzmaßnahmen die Anwendung für einen Feuerwiderstand im Bereich von 30 Minuten identifiziert werden. Verbindungen mit Vollgewindeschrauben können bei entsprechender Dimensionierung potentiell auch für eine 60-minütige Beanspruchung ausgelegt werden. Infolgedessen wurde ein Versuch mit 30 und ein weiterer mit 60 Minuten Brandbeanspruchung nach der normativ für diese Anwendung vorgesehen Einheits-Temperatur-Zeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 [46] durchgeführt. Die Versuchskörper waren an allen relevanten Stellen mit Temperatursensoren (Thermoelemente) ausgestattet, deren Ergebnisse eine Beurteilung der Temperaturentwicklung mittels Temperatur-Zeit-Diagrammen über die Versuchsdauer ermöglichen und ein Vergleich verschiedener Ausführungsvarianten und Teilergebnisse erlauben.

4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

4.2.1 Aufbau des Versuchstandes für die Prüfung

Die Versuche wurden in einem kombinierten Wand-Deckenprüfstand durchgeführt. Die Hauptmaße und der prinzipielle Aufbau sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Die diagonal schraffierten Teile der Zeichnung stellen den Prüföfen dar, in den die Prüfkörper von oben eingebaut und seitlich mit Mineralwolle abgedichtet wurden. Der Rauchgasabzug befindet sich gegenüber des schematisch eingezeichneten Ölbrenners, so dass die Prüfkörper parallel von den Heizgasen des Brenners angeströmt wurden. Die Temperaturmessung erfolgte

mit verteilt im Brandraum angeordneten Plate-Thermoelementen, der Mittelwert ihrer Messwerte wurde zur kontinuierlichen manuellen Steuerung der Ofentemperatur gemäß ETK genutzt.

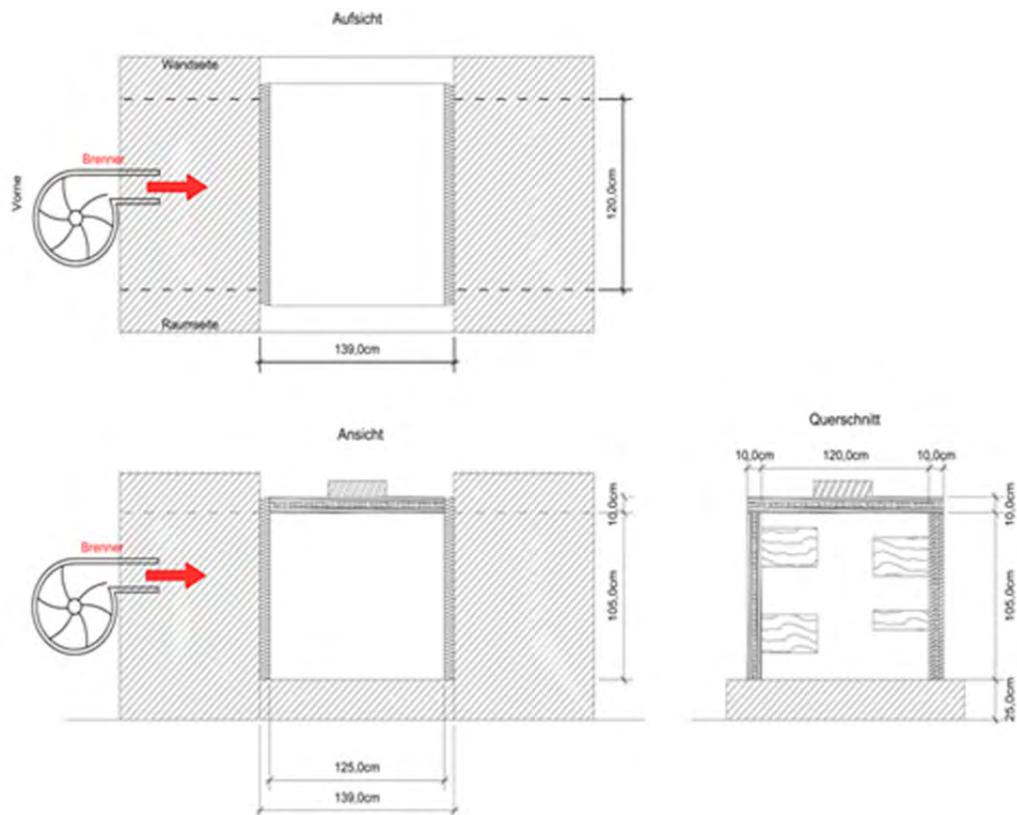


Abbildung 4-1: Zeichnung des kleinen Deckenofens und eines Versuchskörpers der unbelasteten Brandversuche

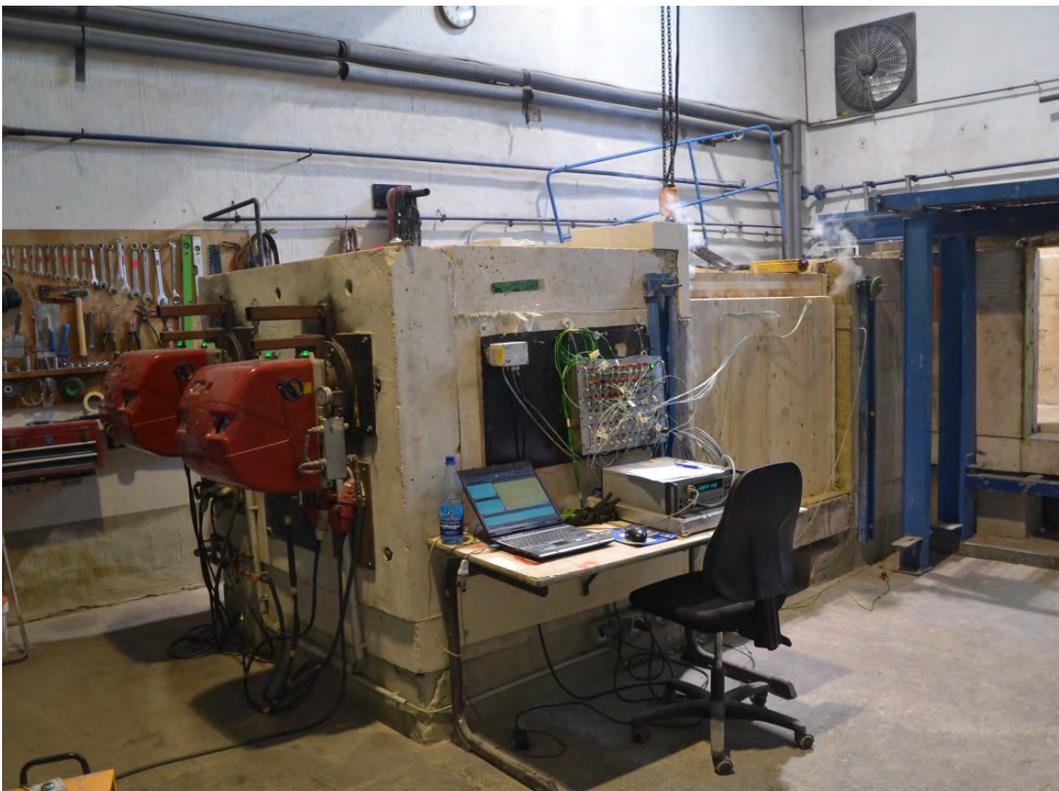


Abbildung 4-2: Ansicht des Prüfofens mit eingebautem Prüfkörper.

4.2.2 Allgemeiner Aufbau der Prüfkörper

Es wurden zwei Brandversuche, bestehend aus jeweils zwei Wand- und einem Deckenelement mit an den Wänden angeschlossenen Nebenträgern durchgeführt. Die beiden Versuchskörper waren in ihrem grundsätzlichen Aufbau identisch, sie unterschieden sich in der Anordnung der eingebauten Nebenträgeranschlüsse und Verbindungsmittel. Sie bestanden aus dreilagigen Brettsperrholzplatten in 100 mm Dicke, die zu U-förmigen Bauteilen zusammengesetzt waren (vgl. Abbildung 4-3). An den Innenseiten der Wände, die als Hauptträger („HT“) dienten, wurden ca. 350 mm lange Abschnitte aus BSH GL 24h mit Stahlblechformteilen und Vollgewindeschrauben als Nebenträger („NT“) angebracht. Der Aufbau und die Maße der Versuchskörper sind in Abbildung 4-1 ersichtlich. Die Nebenträgerabschnitte wurden so angeordnet, dass eine möglichst gleichmäßige Beanspruchung aller Bauteile durch die Brandgase erfolgen konnte. Die bei praxisüblicher Verwendung nach unten zeigenden Seiten der Prüfkörper wurden zur Brennerseite des Ofens orientiert, so dass sie von den Brandgasen direkt angeströmt wurden. Die Hirnholzseiten der Nebenträgerabschnitte wurden mit Gipskarton-Feuerschutzplatten vor Abbrand geschützt.

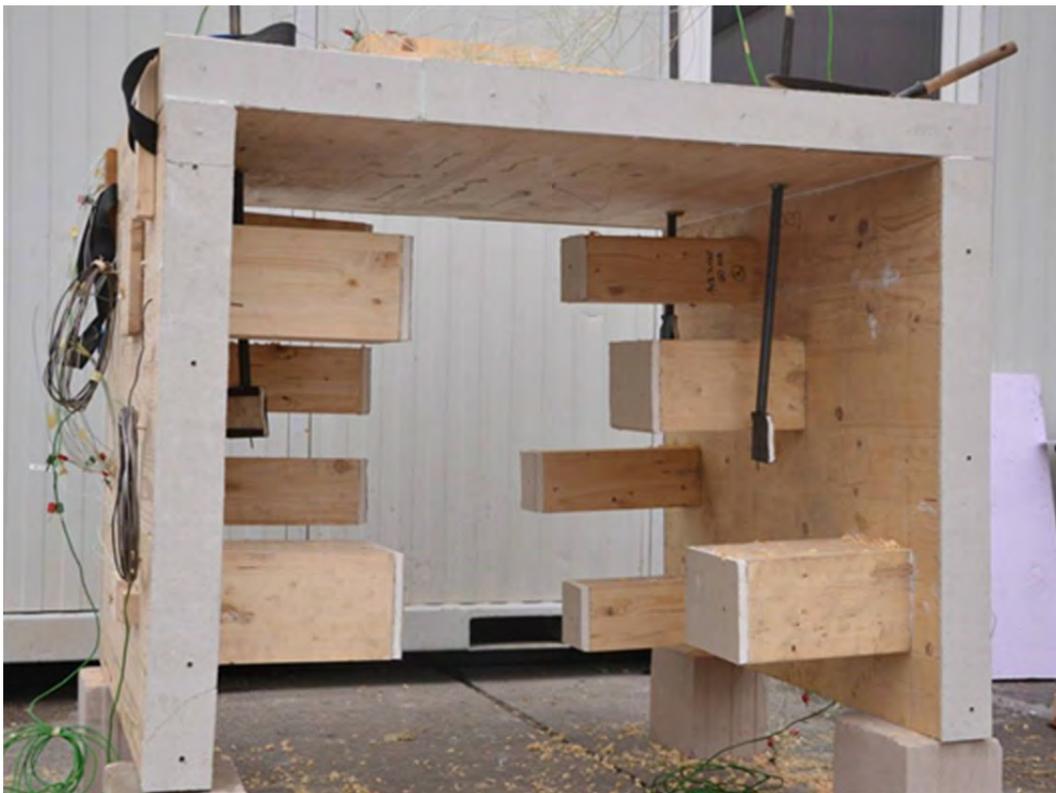


Abbildung 4-3: Versuchskörper des unbelasteten Brandversuchs

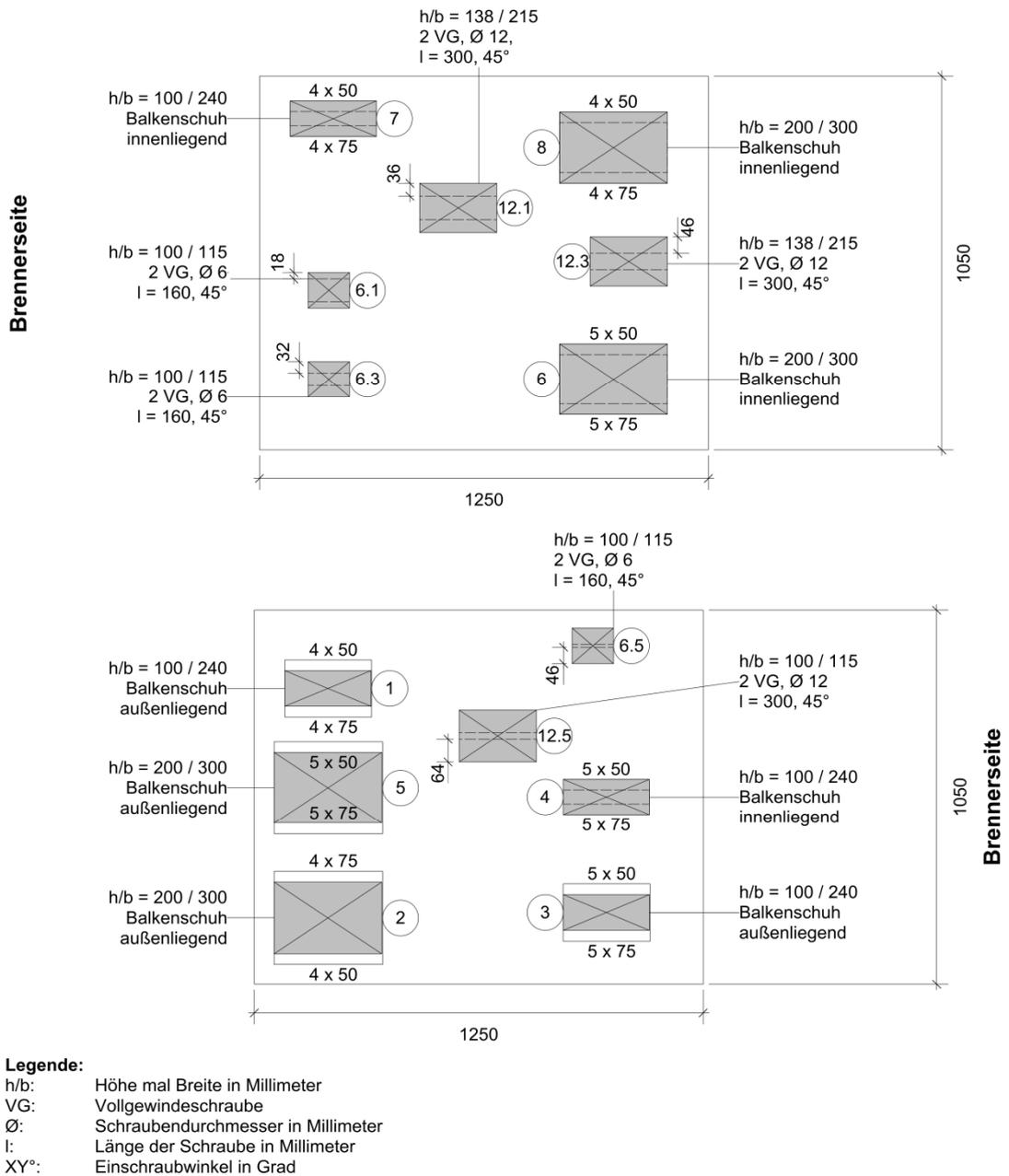


Abbildung 4-4: Anordnung der Nebenträger-Abschnitte an den Wänden des Versuchskörpers 1 (30 min)

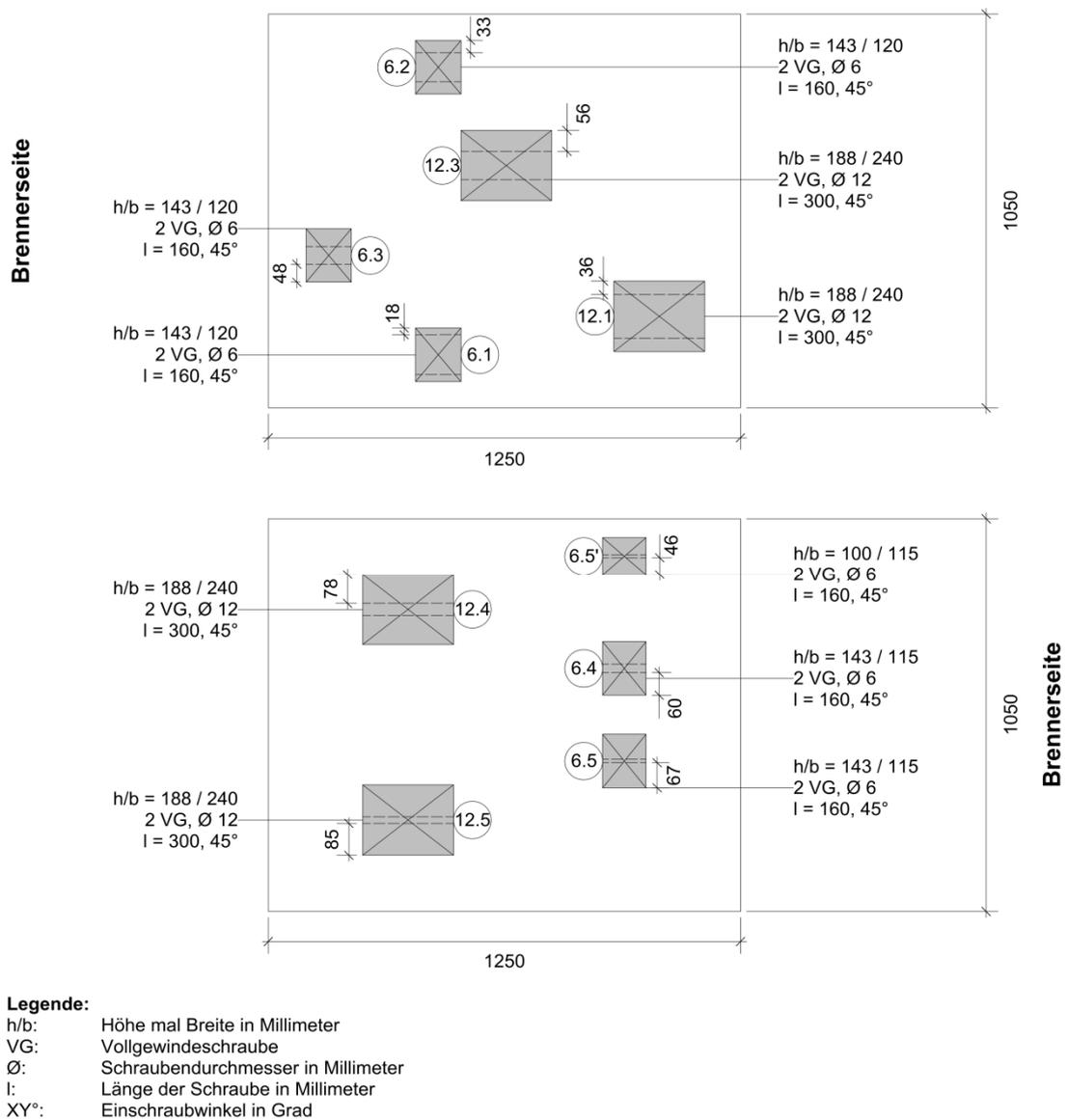


Abbildung 4-5: Anordnung der Nebenträger-Abschnitte an den Wänden des Versuchskörpers 2 (60 min)

4.2.2.1 Balkenschuhe

Es wurden acht Nebenträger-Abschnitte montiert und mit Thermoelementen zur Temperaturmessung ausgestattet. Verwendet wurden die beiden Querschnittsabmessungen 100 mm x 240 mm und 200 mm x 300 mm, mit jeweils zugehörigen Balkenschuhen. Von diesen wurde jeweils einer mit innen- und einer mit außenliegenden Laschen eingebaut. In Kombination mit jeder dieser Varianten wurden einmal Rillennägeln mit 4 mm Nenndurchmesser und einmal Schrauben mit 5 mm Nenndurchmesser als Verbindungsmittel verwendet. Auf jeweils einer Seite der einzelnen Prüfkörper wurden schließlich Verbindungsmittel mit 50 mm Länge eingebaut und auf der anderen Seite des symmetrischen Balkenschuhes Verbindungsmittel

mit 70 bzw. 75 mm Länge (vgl. Abbildung 4-6). Die Spaltbreite zwischen Haupt- und Nebenträger betrug 5 mm, einheitlich bei allen Verbindungen. Die Wahl der Querschnitte ergab sich aus den baupraktisch üblichen Balkenschuhgrößen des Typs 05/2 des Projektpartners GH Baubeschläge. 100 mm x 240 mm ist die kleinste verfügbare Größe, gleichzeitig konnten 100 mm als absolute Untergrenze sinnvoller Breiten für brandbeanspruchte Verbindungen abgebildet werden. Der Querschnitt 200 mm x 300 mm wurde gewählt, da hier mit Sicherheit gegenseitige Beeinflussungen der jeweils gegenüberliegenden Seitenflächen auszuschließen sind. Bei noch größeren Querschnittsmaßen ergeben sich somit mit hoher Sicherheit keine abweichenden Ergebnisse im Brandverhalten.

Auf diese Weise konnten alle möglichen Kombinationen abgedeckt und deren Verhalten mit Thermoelementen messtechnisch erfasst werden.

Zur Erfassung der Temperaturen der Verbindungsmittel wurden an jedem Prüfkörper je 2 Stück jeder Länge mit Thermoelementen an Kopf und Spitze ausgestattet. Die Befestigung an den Verbindungsmitteln erfolgte durch das Einstecken und Verklemmen der Messspitze in vorher eingebrachte Bohrungen im Verbindungsmittel. Zusätzlich wurden unter den Blechlaschen sowie im Spalt zwischen Haupt- und Nebenträger Thermoelemente eingebaut. Die Thermoelemente erhielten jeweils die Nummer des Prüfkörpers gemäß Tabelle 4-1 und einen Unterscheidungsbuchstaben gemäß Abbildung 4-7.

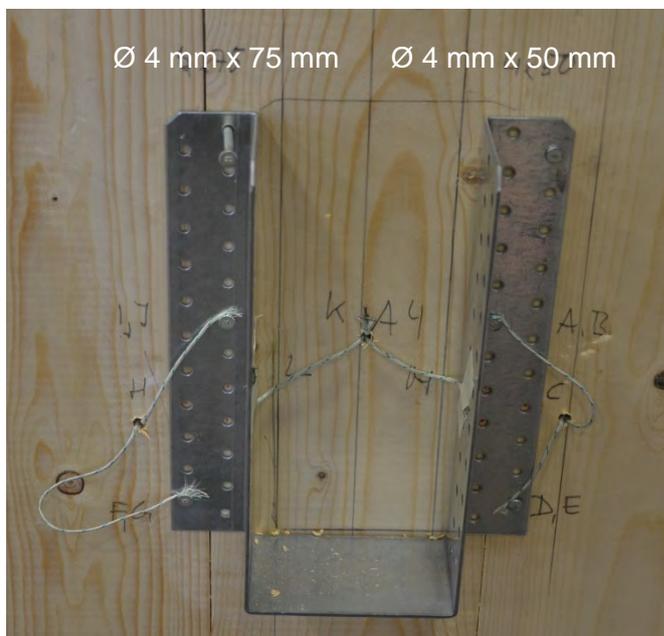


Abbildung 4-6: Detail der Anbringung eines Balkenschuhs, ausgestattet mit Thermoelementen zur Messung der Blech- und Verbindungsmitteltemperaturen

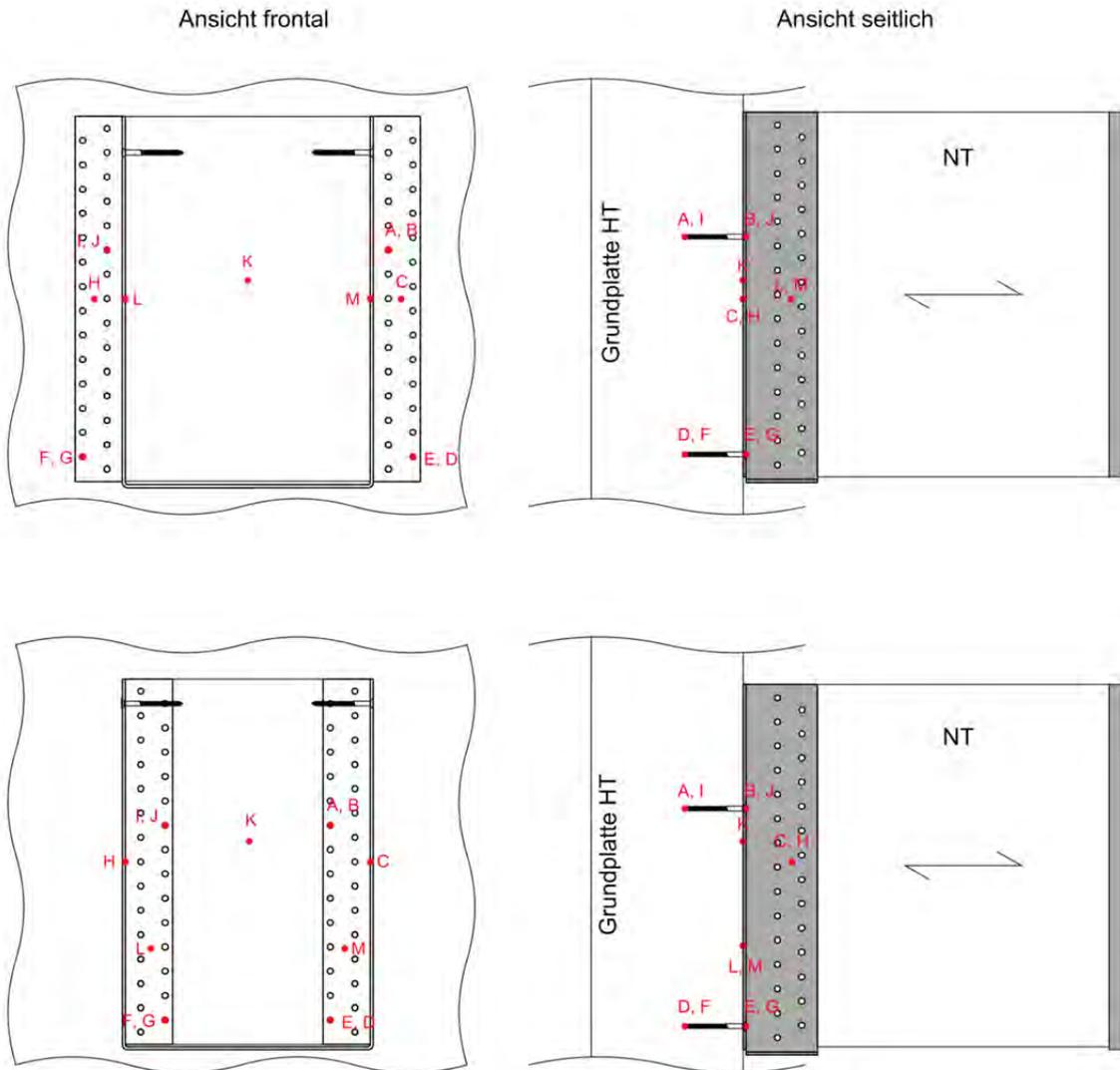


Abbildung 4-7 Anordnung und Nummerierung der Thermoelemente an den Balkenschuhverbindungen

Tabelle 4-1 Kombination der Verbindungen der Haupt-Nebenträger mit Balkenschuhen

Nummer	NT-Querschnitt	Verbindungsmittel-Ø	Laschenart
1	100 mm x 240 mm	4 mm Rillennagel	außen
2	200 mm x 300 mm	4 mm Rillennagel	außen
3	100 mm x 240 mm	5 mm Schraube	außen
4	100 mm x 240 mm	5 mm Schraube	innen
5	200 mm x 300 mm	5 mm Schraube	außen
6	200 mm x 300 mm	5 mm Schraube	innen
7	100 mm x 240 mm	4 mm Rillennagel	innen
8	200 mm x 300 mm	4 mm Rillennagel	innen

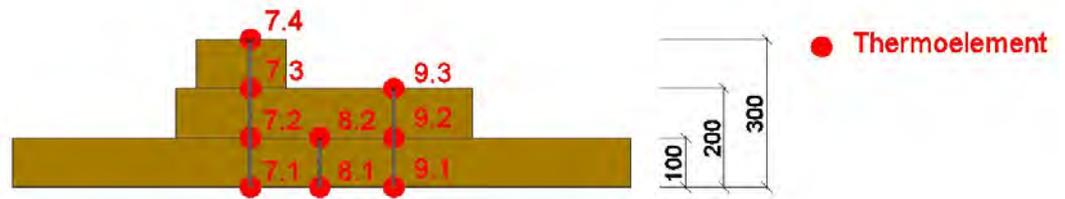
4.2.2.1 Vollgewindeschrauben

Um Abhängigkeiten für verschiedene Längen, Durchmessern, Kopffarten und Materialien der Vollgewindeschrauben genauer untersuchen zu können, wurden neun, nebeneinander angeordnete Vollgewindeschrauben (siehe Tabelle 4-2 und Abbildung 4-8) in der Decke der Brandversuchskörper eingebracht. Dafür wurde die Deckenplatte aus Brettsperrholz partiell mit weiteren Brettsperrholzplatten aufgedoppelt.

Tabelle 4-2: Vollgewindeschrauben in der Decke

Nummer	Durchmesser der Schraube	Länge der Schraube	Material der Schraube	Kopffart der Schraube
1	10 mm	200 mm	Edelstahl	Senkkopf
2	10 mm	200 mm	Kohlenstoff	Senkkopf
3	12 mm	200 mm	Kohlenstoff	Zylinderkopf
4	8 mm	300 mm	Kohlenstoff	Senkkopf
5	8 mm	100 mm	Kohlenstoff	Senkkopf
6	8 mm	200 mm	Kohlenstoff	Zylinderkopf
7	8 mm	300 mm	Kohlenstoff	Zylinderkopf
8	8 mm	100 mm	Kohlenstoff	Zylinderkopf
9	6 mm	200 mm	Kohlenstoff	Zylinderkopf

Schnitt A-A:



Draufsicht:

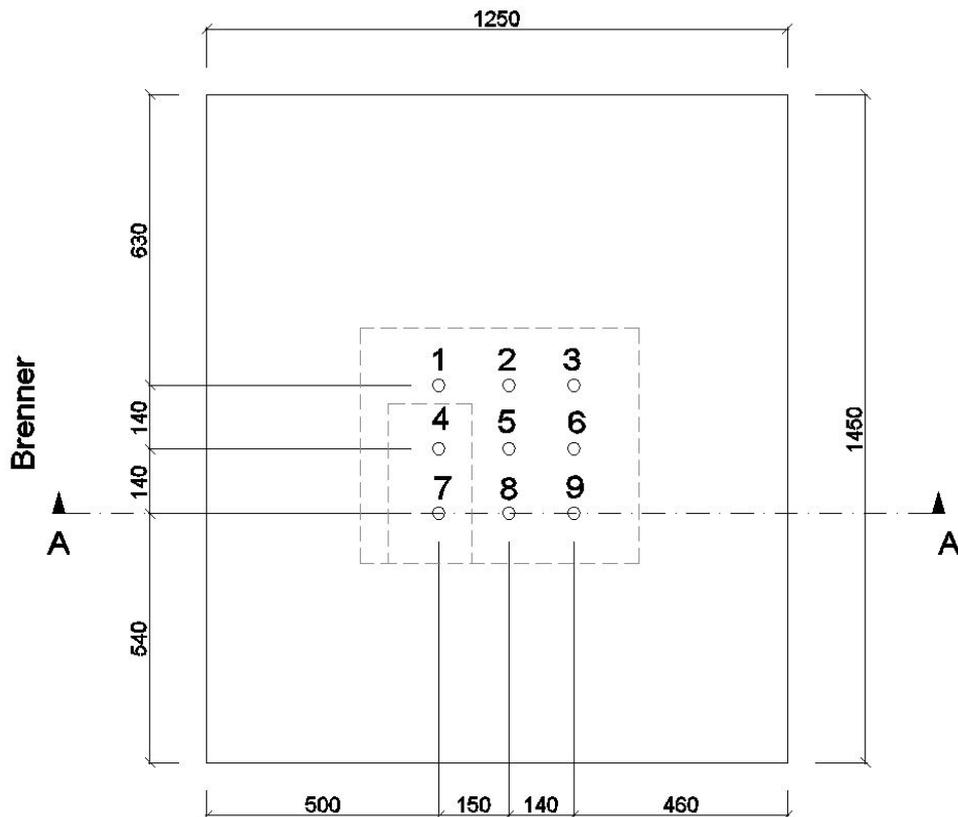


Abbildung 4-8: Anordnung der Vollgewindeschrauben in der Decke des Versuchskörpers

Alle Vollgewindeschrauben wurden an Kopf und Spitze mit einem Thermoelement versehen (siehe Abbildung 4-9). Zusätzlich wurden bei den 200 mm langen Schrauben in der Mitte und bei den 300 mm langen Schrauben nach 100 mm und 200 mm zusätzliche Temperaturmessungen vorgenommen (vgl. Abbildung 4-8).



Abbildung 4-9: Vollgewindeschraube mit angeschweißten Thermoelementen an Kopf und Spitze

Im Weiteren wurde der Randabstand $a_{4,c}$ untersucht (vgl. Abbildung 4-10). Dafür wurden Nebenträger aus Vollholz (C24) an den beiden Wänden aus Brettsperrholzplatten befestigt. Um die kleinstmögliche Schraubenverbindung und größtmögliche Schraubenverbindung zu prüfen, wurden Verbindungen mit Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 6 mm und des Durchmessers von 12 mm untersucht. Pro Haupt-Nebenträger-Verbindung wurde jeweils ein Paar gekreuzte Vollgewindeschrauben mit $\varnothing 6\text{mm}$, $l = 160\text{ mm}$ oder $\varnothing 12\text{mm}$, $l = 300\text{ mm}$ unter 45° verwendet. Eine Vollgewindeschraube wurde dabei jeweils über den Hauptträger (Wand), die andere Schraube über den Nebenträger eingedreht. Eine Anordnung der Vollgewindeschrauben unter 45° führt zur größten erwarteten Querkrafttragfähigkeit der Verbindung. Im Hinblick auf die belasteten Brandversuche wurde deshalb nur diese Schraubenanordnung untersucht.

In den Versuchen wurden sechs Haupt-Nebenträger-Verbindungen für eine Beanspruchung von 30 Minuten unter der Einheitstemperaturzeitkurve und zehn Haupt-Nebenträger-Verbindungen für eine Beanspruchung von 60 Minuten unter der Einheitstemperaturzeitkurve beurteilt (vgl. Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 und Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5).

Dabei wurden folgende Randabstände betrachtet:

- I) $a_{4,c} = 3 \cdot d_{nom}$ (gemäß Bemessung nach DIN EN 1995-1-1)
- II) $a_{4,c} = 3 \cdot d_{nom} + \beta_n \cdot t + k_0 d_0$ (in Anlehnung an den Bemessungsansatz für Holzbau-
teile unter Brandbeanspruchung nach DIN EN 1995-1-2)
- III) $a_{4,c} = 3 \cdot d_{nom} + x$ (ungefähr mittlere Holzüberdeckung ergebend aus Ver-
suchsaufbau I) und II))

mit:

- $a_{4,c}$ Abstand zwischen Verbindungsmittel und unbeanspruchtem Rand in mm
- d_{nom} Durchmesser der Schraube in mm
- β_n Bemessungswert der ideellen Abbrandrate in mm/min abhängig von Holzart und
Rohdichte, siehe Tabelle 3.1 DIN EN 1995-1-2:2010-12
- d_0 7 mm
- k_0 1,0 für Brandbeanspruchung von mehr als 20 Minuten
- t Branddauer in min
- $x \approx \frac{\beta_n \cdot t + k_0 d_0}{2}$

Tabelle 4-3: Haupt-Nebenträger-Verbindungen für eine Beanspruchung von 30 Minuten

30 Min	Verbindungsmittel Vollgewindeschraube	Abmessung Nebenträger	Randabstand	
30-6.1	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	100 mm x 115 mm	$a_{4,c} = 18\text{mm}$	$a_{4,c}=3*d_{nom}$
30-6.3	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	100 mm x 115 mm	$a_{4,c} = 32\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x$
30-6.5	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	100 mm x 115 mm	$a_{4,c} = 46\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +\beta_n*t+k_0d_0$
30-12.1	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	138 mm x 215 mm	$a_{4,c} = 36\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom}$
30-12.3	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	138 mm x 215 mm	$a_{4,c} = 46\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x$
30-12.5	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	146 mm x 215 mm	$a_{4,c} = 64\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +\beta_n*t+ k_0d_0$

Tabelle 4-4: Haupt-Nebenträger-Verbindungen für eine Beanspruchung von 60 Minuten

60 Min	Verbindungsmittel Vollgewindeschraube	Abmessung Nebenträger	Randabstand	
60-6.1	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	143 mm x 120 mm	$a_{4,c} = 18\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom}$
60-6.2	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	143 mm x 120 mm	$a_{4,c} = 33\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x$
60-6.3	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	143 mm x 120 mm	$a_{4,c} = 48\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x2$
60-6.4	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	143 mm x 120 mm	$a_{4,c} = 60\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x3$
60-6.5	Schraubenpaar, 45°, Ø 6, l = 160 mm	143 mm x 120 mm	$a_{4,c} = 67\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +\beta_n*t+ k_0d_0$
60-12.1	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	188 mm x 240 mm	$a_{4,c} = 36\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom}$
60-12.3	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	188 mm x 240 mm	$a_{4,c} = 56\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x$
60-12.4	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	188 mm x 240 mm	$a_{4,c} = 78\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +x2$
60-12.5	Schraubenpaar, 45°, Ø 12, l = 300 mm	188 mm x 240 mm	$a_{4,c} = 85\text{mm}$	$a_{4,c}=3* d_{nom} +\beta_n*t+ k_0d_0$

Der Randabstand $a_{4,c}$ bei Haupt-Nebenträgerverbindungen mit gekreuzten Vollgewindeschrauben beeinflusst den Temperaturverlauf der Vollgewindeschraube und des umgebenden Holzes.

Dabei wird die Schraube durch die Holzüberdeckung (Randabstand), die sich im Laufe des Brandes durch die Bildung einer Holzkohleschicht verringert, vor einen frühzeitigen Temperatureintrag geschützt. Die Temperatureinwirkung auf die Schraube findet somit bei ausrei-

chendem seitlichem Schutz im Wesentlichen nur noch über den Schraubenkopf statt. Je geringer der Randabstand $a_{4,c}$ gewählt wird, desto schneller wird das Temperaturniveau der Schraube auch durch seitliche Wärmetransportvorgänge beeinflusst, was somit die Gefahr der Nachgiebigkeit der Verbindung bedeutet. Um die Temperaturen während des Brandversuches an der Schraube aufzeichnen zu können, wurde ein Thermoelement mit dem Kopf der Schraube (Messstelle A1), die im Nebenträger eingeschraubt wird, verschweißt. Außerdem wurde die Schraube, in etwa auf ihrer halben Länge, (Messstelle A2) mit einem weiteren Thermoelement verbunden. Zusätzlich wurde an der Spitze der Schraube (B3), die im Hauptträger eingeschraubt wurde und in der Mitte der Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger (M2) eine Messstelle vorgesehen (siehe Abbildung 4-10).

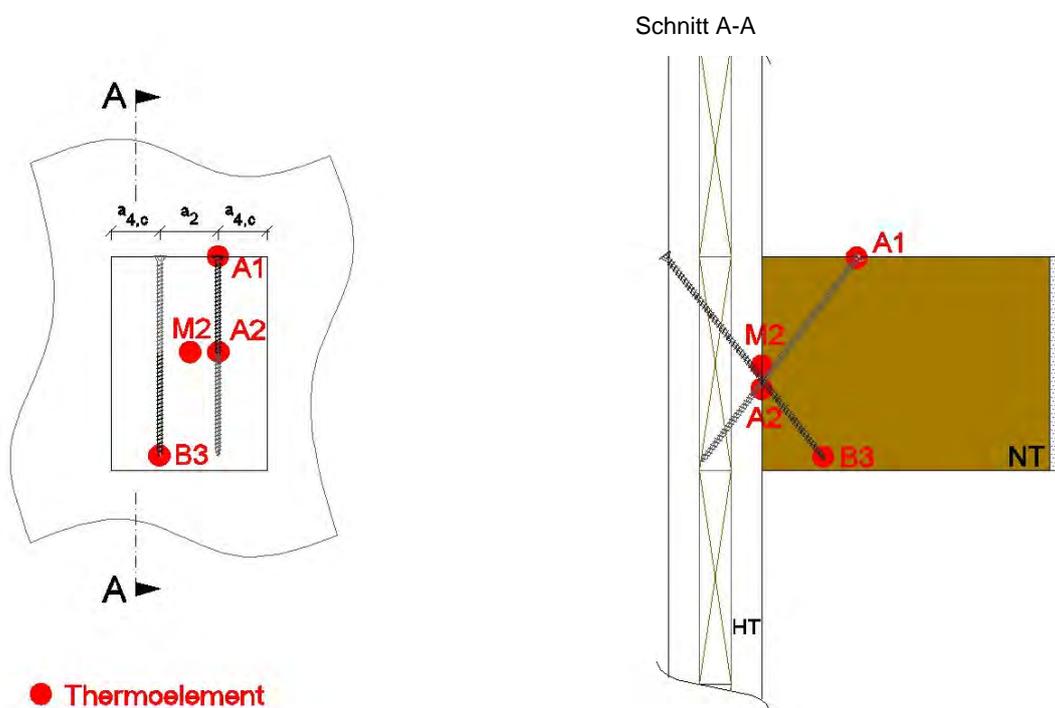


Abbildung 4-10: Temperaturmessstellen an der Haupt-Nebenträger-Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben

4.2.3 Versuchsdurchführung

Die vorbereiteten Prüfkörper wurden von oben in den Brandprüfstand eingebaut und seitlich zu den Ofenwänden abgedichtet. Die Temperaturbeanspruchung erfolgte über 30 bzw. 60 Minuten gemäß ETK nach DIN EN 1363-1 [46]. Die Messwerte der Thermoelemente wurden über die Versuchszeit alle 10 s aufgezeichnet. Nach Ablauf der Prüfzeit wurde der Brenner abgeschaltet und die Versuchskörper durch die Brenneröffnung zunächst oberflächlich abgelöscht. Anschließend wurden die Prüfkörper herausgehoben, soweit notwendig weiter abgelöscht und im Freigelände der Versuchsstelle zur Abkühlung zwischengelagert.

Hinweise zu detaillierten Angaben zum Versuchsaufbau und der Durchführung finden sich im Prüfbericht [55].

Die Versuchsdurchführung erfolge für beide Versuchskörper nach dem gleichen Ablauf:

- 1) Montage des Prüfkörpers, Anschluss der Thermoelemente wo zutreffend
- 2) Brenner starten, Beginn der Temperaturofzeichnung.
- 3) Bei Ablauf der Brandbeanspruchungsdauer nach 30 bzw. 60 min Stopp des Brenners
- 4) Möglichst schnelles Ablöschen der Versuchskörper, Ausbau aus dem Ofen, Lagerung der Prüfkörper zur weiteren Untersuchung und Begutachtung.



Abbildung 4-11: Blick durch die Brenneröffnung in den Brandraum unmittelbar nach Versuchsende

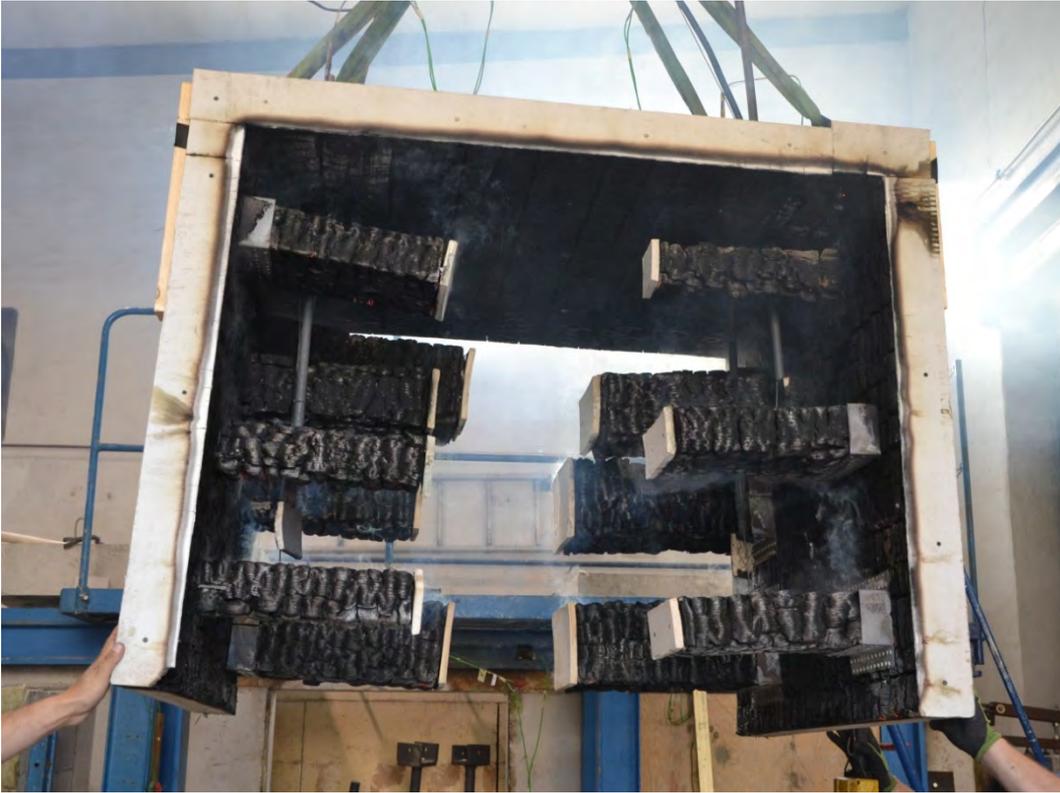


Abbildung 4-12: Herausheben des Versuchskörpers aus dem Brandofen nach Versuchsende.

4.3 Versuchsergebnisse

4.3.1 Versuchsergebnisse der Balkenschuhe

Nach Versuchsende wurden die einzelnen Balkenschuhanschlüsse jeweils mit dem umgebenden Bereich der „Hauptträger“ Platte und dem Nebenträger aus dem U-förmigen Versuchskörper herausgetrennt und in der MPA BAU der TUM näher untersucht. Die Untersuchung fand durch manuelles Zerlegen, Messen von Längenmaßen und optischer Inaugenscheinnahme statt. Die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend beschrieben:

4.3.1.1 Prüfkörper 2

Außenliegende Laschen, NT 200 mm x 300 mm, Rillennägel Ø 4 mm

- Ø 4 x 50 mm Nägel im HT lose, bereits durch leichte mechanische Beanspruchung beim Transport herausgerissen.
- Ø 4 x 50 mm Nägel im NT locker, leicht mit der Hand herauszuziehen.
- Ø 4 x 75 mm Nägel im HT und NT noch mit Resttragfähigkeit, Nägel lassen sich mit Werkzeug relativ leicht herausziehen.
- Alle herausgezogenen Nägel waren auf ihrer gesamten Länge schwarz verfärbt.



Abbildung 4-13: Versuchskörper 2, Gesamtansicht



Abbildung 4-14: Versuchskörper 2 nach Entfernen des Nebenträgers



Abbildung 4-15: Horizontaler Schnitt durch den Nebenträger des Prüfkörpers 2

4.3.1.2 Prüfkörper 5

Außenliegende Laschen, NT 200 mm x 300 mm, Schrauben Ø 5 mm

- Ø 5 x 50 mm Schrauben im HT lassen sich mit geringer Handkraft auf den Prüfkörper herauslösen, sie binden nicht mehr in unverbranntes Holz.
- Ø 5 x 70 mm Schrauben im HT gute Restfestigkeit und Einbindung in unverbranntes Holz
- Ø 5 x 50 mm Schrauben im NT geringe Restfestigkeit
- Ø 5 x 70 mm Schrauben im NT gute Restfestigkeit



Abbildung 4-16: Versuchskörper 5 Gesamtansicht



Abbildung 4-17: Versuchskörper 5 Detailansicht der 5 x 50 mm Schrauben

4.3.1.3 Prüfkörper 6

Innenliegende Laschen, NT 200 mm x 300 mm, Schrauben \varnothing 5 mm

- \varnothing 5 x 50 mm Schrauben im HT geringe Restfestigkeit
- \varnothing 5 x 50 mm Schrauben im NT lose
- \varnothing 5 x 70 mm Schrauben zeigen hohe Restfestigkeit in beiden Laschen, insbesondere im HT
- \varnothing 5 x 70 mm Schrauben sind nach dem Herausdrehen noch teilweise blank ohne Verkohlungsspuren



Abbildung 4-18: Prüfkörper 6 Gesamtansicht



Abbildung 4-19: Prüfkörper 6 Detail der Schrauben im Hauptträger, gut erkennbar ist die erhöhte Abbrandtiefe von ca. 35 mm im Bereich der Verbindung



Abbildung 4-20: Prüfkörper 6, Balkenschuh nach Demontage des Nebenträgers, gut erkennbar sind die teilweise noch blanken Schraubenspitzen 5 x 70 mm.

4.3.1.4 Prüfkörper 8

Innenliegende Laschen, NT 200 mm x 300 mm, Rillennägel Ø 4 mm

- Ø 4 x 50 mm Nägel im HT locker, aber noch mit Restfestigkeit
- Ø 4 x 50 mm Nägel im NT lose/herausgebrochen
- Ø 4 x 75 mm Nägel im HT stecken noch sehr fest, Herausziehen nur mit Werkzeug und erheblichem Krafteinsatz möglich, dabei bleiben in den Rillen Anhaftungen von hellem/unverkohltem Holz stehen
- Ø 4 x 75 mm Nägel im NT lassen sich mit der Hand und geringem Krafteinsatz herausziehen, dunkle Verfärbung auf der gesamten Länge



Abbildung 4-21: Prüfkörper 8, Ansicht nach Demontage des NT



Abbildung 4-22: Prüfkörper 8, Nägel 4 x 75 mm aus dem NT, deutlich erkennbar ist die dunkle Verfärbung auf der gesamten Länge



Abbildung 4-23: Prüfkörper 8, Nägel 4 x 75 mm aus dem HT, deutlich erkennbar ist ein unverfärbter Bereich auf ca. 30 mm von der Nagelspitze

4.3.1.5 Prüfkörper 1, 3, 4, 7

Außen- und innenliegende Laschen, NT 100 mm x 240 mm, Ø 4 mm Nägel und Ø 5 mm Schrauben

Alle Nebenträger waren im Gesamtquerschnitt verkohlt und hatten eine sehr geringe Restfestigkeit, deswegen sind sie schon beim Herausheben aus dem Prüfofen oder bei der weiteren Handhabung abgebrochen. Das Verhalten der Befestigungen an den Hauptträgern entsprach demjenigen der entsprechenden Befestigungen der Prüfkörper mit Querschnitten 200 mm x 300 mm. Auch hier hatten die 50 mm langen Verbindungsmittel keine oder sehr geringe Restfestigkeiten, mit geringen Abweichungen für innen/außenliegende Laschen und Ø 4/Ø 5 mm Verbindungsmitteldurchmesser. 70 bzw. 75 mm lange Verbindungsmittel wiesen noch deutliche Restfestigkeiten auf, sie ließen sich nur unter Zuhilfenahme von Werkzeug demontieren.

Es war ein deutlicher Unterschied in den Verfärbungen der Verbindungsmittel zwischen Nägeln und Schrauben zu erkennen (vgl. Abbildung 4-25). Die Nägel waren in beiden Längen 50 mm und 75 mm vollständig schwarz verfärbt, die Schrauben der Länge 70 mm dagegen von der Spitze aus auf ca. 30 mm noch blank.



Abbildung 4-24: Ansicht der Versuchskörper 1, 3, 4, 7

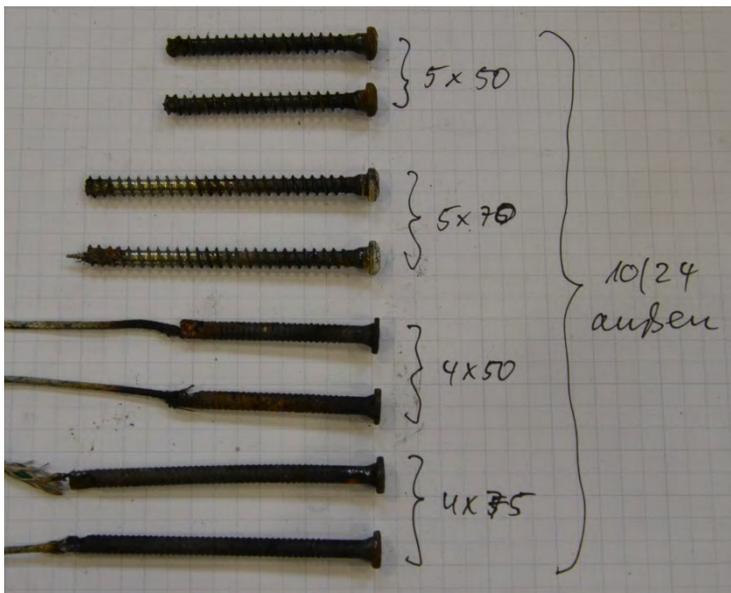


Abbildung 4-25: Vergleich von Verbindungsmitteln aus den Hauptträgern der Prüfkörper 1 und 3 (QS 100 mm x 240 mm, außenliegende Laschen, Nägel und Schrauben). An den unteren vier Verbindungsmitteln sind noch die Thermolemente an den Spitzen zu erkennen.

Temperaturmesswerte

Generell ist festzustellen, dass die gemessenen Temperaturen sehr gut mit den visuell festgestellten Brandeinwirkungen übereinstimmen. Verkohlungstiefen, Verfärbungen, Entfestigungen der Verbindungsmittel etc. konnten gut mit den Messwerten in Zusammenhang ge-

bracht werden. Die Diagramme mit den Temperaturmesswerten sind in Anhang 11.2.1 enthalten.

Zu beachten bei der Beurteilung der gemessenen Temperaturen der Verbindungsmittel ist grundsätzlich, dass der jeweilige Nenndurchmesser vom Kerndurchmesser mehr oder weniger stark abweicht. Der Kerndurchmesser der Schrauben mit Nenndurchmesser 5 mm beträgt 3,0 mm, während bei den Rillennägeln der Kerndurchmesser aufgrund der geringeren Profilierung nur geringfügig kleiner als der Nenndurchmesser ist. Der für die Wärmeleitung maßgebende Kernquerschnitt ist daher bei den Schrauben deutlich geringer als bei den Nägeln, zudem können die Schrauben über die „Kühlrippenwirkung“ des Gewindes besser Temperatur an das umgebende Holz abgeben.

Die Verbindungsmittelköpfe an den außenliegenden Laschen hatten recht ähnliche Temperaturen von jeweils ca. 120 °C unter der Ofentemperatur. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Verbindungsmitteldurchmesser und –längen festgestellt werden.

Große Unterschiede zeigten erwartungsgemäß die Temperaturen an den Verbindungsmittelspitzen. Bei außenliegenden Laschen wurden an den 4 x 50 mm Rillennägeln Temperaturen von ca. 450 °C gemessen, während sie bei den 4 x 75 mm Rillennägeln unter 250 °C blieben. Die Spitzentemperaturen der 5 x 70 mm Schrauben lagen mit maximal 200 °C deutlich darunter. Die Spitzentemperaturen der 5 x 50 Schrauben konnten nicht festgestellt werden, da die dort eingebauten Thermolemente vermutlich aufgrund von Defekten keine verwertbaren Ergebnisse geliefert haben. Es ist aber von ähnlich hohen Temperaturen wie bei den 4 x 50 Rillennägeln auszugehen, da die Verkohlung vergleichbar weit fortgeschritten war.

Bei innenliegenden Laschen waren die Einflüsse der Verbindungsmitteldurchmesser geringer. Es wurden Spitzentemperaturen von 190 °C für die „langen“ und 320 °C für die „kurzen“ Verbindungsmittel gemessen. Auffallend, aber nachvollziehbar ist, dass bei innenliegenden Laschen die Verbindungsmittel in der inneren Reihe weniger beansprucht werden.

Die gemessenen Temperaturen der Laschen an den Nebenträgern konnten jedoch nicht in einen signifikanten Zusammenhang mit der Laschenanordnung innen/außen gebracht werden. Einen gewissen Einfluss hierauf haben möglicherweise die Längen der Verbindungsmittel. Lange Verbindungsmittel wirken vermutlich geringfügig „kühlend“ auf die Laschen, da sie mehr Wärmeenergie aufnehmen und ableiten können. Die Bandbreite der Temperaturen lag zwischen 400 °C und 700 °C, was aber auch teilweise darin begründet sein kann dass die Thermolemente nicht mit den Laschenblechen verschweißt oder anderweitig mechanisch verbunden waren. Infolge des Abbrandes und der Verformungen lagen die Thermolemente vermutlich nicht mehr vollständig an den Laschen an.

Die Laschentemperaturen am Hauptträger sind nachvollziehbarerweise deutlich unterschiedlich je nach Anordnung innen oder außen. Dies erscheint aber nicht als maßgebend, da die stärkste Beanspruchung und Temperatureinwirkung am Nebenträger stattfindet.

4.3.2 Versuchsergebnisse der Vollgewindeschrauben

4.3.2.1 Einfluss verschiedener Schraubenparameter

Der qualitative Einfluss der Schraubenparameter Länge, Durchmesser, Material und Kopart unter Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve kann Tabelle 4-5 entnommen werden.

Tabelle 4-5: Einfluss der Schraubenparameter auf die Verbindung, abgeleitet aus dem 30 und 60 Minuten Brandversuch

Parameter	geringe Temperatur an der Schraubenspitze, wenn	geringe Verkohlungstiefe des Holzes, wenn	Einfluss des Parameters
Länge	groß	klein	bedeutend
Material	Edelstahl	Edelstahl	mittelmäßig
Durchmesser	klein	klein	mittelmäßig
Kopart	nicht feststellbar	nicht feststellbar	vernachlässigbar

Tabelle 4-5 zeigt auf, dass die Verwendung langer Schrauben und kleiner Durchmesser aus Edelstahl mit Zylinderkopf positive Auswirkungen auf die Verkohlungstiefe des Holzes (siehe Tabelle 4-7) und das Temperaturniveau (vgl. Tabelle 4-6) der Schraube erzeugt.

Tabelle 4-6: gemessene Temperaturen in Abhängigkeit der Dauer der Brandversuche und der untersuchten Parameter

Parameter		30 min			60 min		
		Kopf	Mitte	Spitze	Kopf	Mitte	Spitze
Schraubenkopf	Senkkopf	870°C	45°C	25°C	870°C	95°C	30°C
	Zylinderkopf	870°C	45°C	25°C	870°C	85°C	30°C
Länge	100 mm	850°C	-*	120°C	850°C	-*	206°C
	300 mm	850°C	60°C	35°C	850°C	97°C	30°C
Material	Kohlenstoff	880°C	80°C	40°C	880°C	144°C	58°C
	Edelstahl	880°C	30°C	25°C	880°C	58°C	25°C
Durchmesser	6 mm	910°C	40°C	27°C	910°C	60°C	33°C
	8 mm	910°C	50°C	30°C	910°C	60°C	43°C
	12 mm	910°C	78°C	45°C	910°C	113°C	60°C

*keine Temperaturmesswerte vorhanden

Tabelle 4-7: Verkohlungstiefen des Holzes entlang der Schraube

Nr.	Durchmesser [mm]	Länge [mm]	Material	Kopfart	Verkohlungstiefe des Holzes nach 30 min [mm]	Verkohlungstiefe des Holzes nach 60 min [mm]
1	10	200	Edelstahl	Senkkopf	48	69
2	10	200	Kohlenstoff	Senkkopf	58	81
3	12	200	Kohlenstoff	Zylinderkopf	53	95
4	8	300	Kohlenstoff	Senkkopf	51	81
5	8	100	Kohlenstoff	Senkkopf	45	68
6	8	200	Kohlenstoff	Zylinderkopf	58	68
7	8	300	Kohlenstoff	Zylinderkopf	58	76
8	8	100	Kohlenstoff	Zylinderkopf	43	68
9	6	200	Kohlenstoff	Zylinderkopf	45	66

Bei längerer Brandbeanspruchung verstärkt sich der Einfluss der Länge (vgl. Abbildung 4-26). Auch der Effekt des Materials (vgl. Abbildung 4-27) und der Größe des Durchmessers (vgl. Abbildung 4-28) wirken sich deutlicher aus.

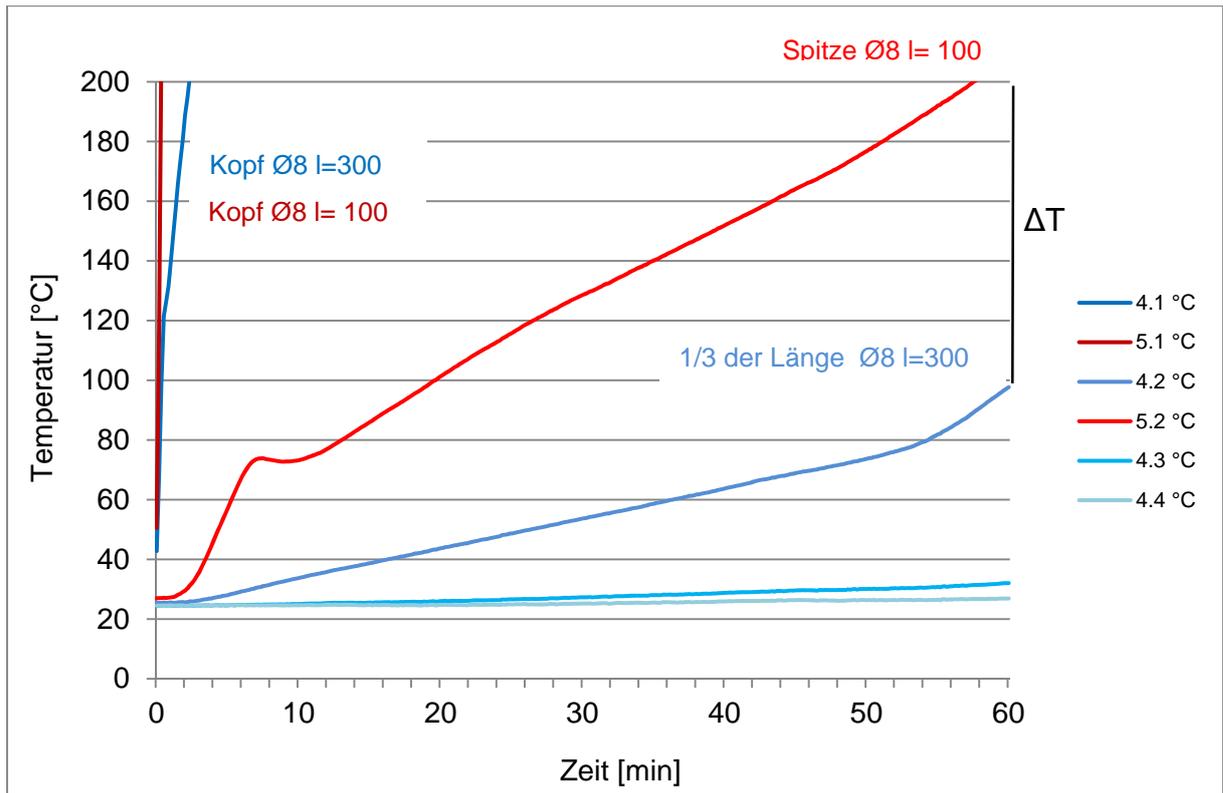


Abbildung 4-26: Detailansicht zum Vergleich unterschiedlichen Längen $l = 100$ mm (5.1 - 5.2) und $l = 300$ mm (4.1 - 4.4), Kohlenstoffstahl (vgl. Position der Thermoelemente in Abbildung 4-8)

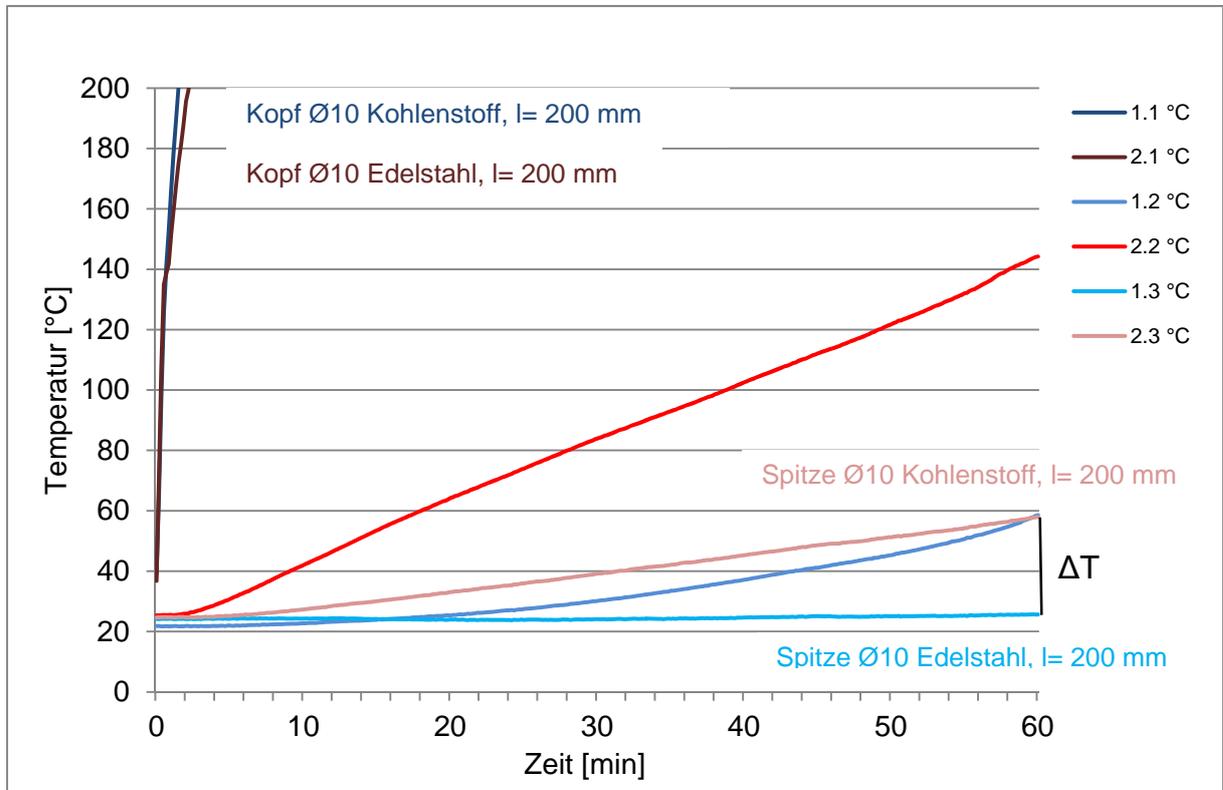


Abbildung 4-27: Detailansicht zum Vergleich verschiedener Materialien: Kohlenstoff (2.1 - 2.3) und Edelstahl (1.1- 1.3), $l = 200$ mm (vgl. Position der Thermoelemente in Abbildung 4-8)

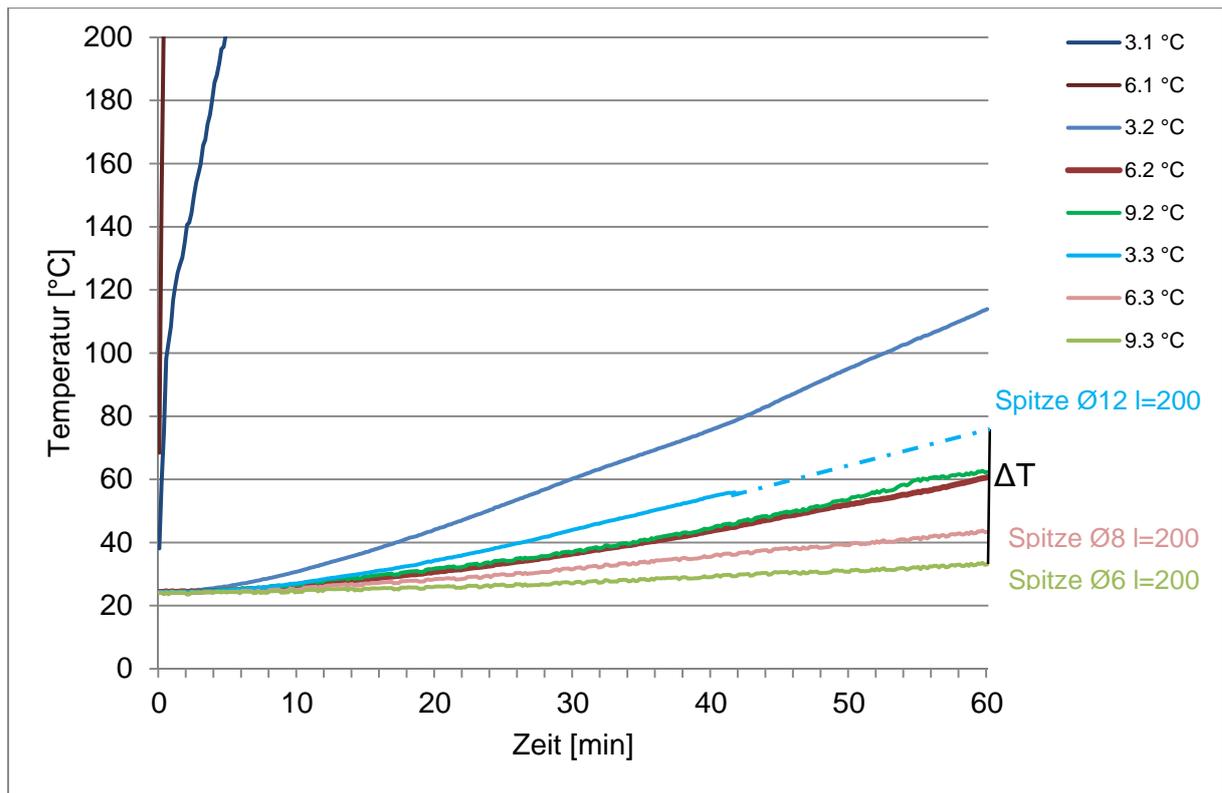


Abbildung 4-28: Detailansicht zum Vergleich unterschiedlicher Durchmesser $\varnothing 6$ (9.1-9.3)/ $\varnothing 8$ (6.1-6.3)/ $\varnothing 12$ (3.1-3.3), $l = 200$ mm, Kohlenstoffstahl (vgl. Position der Thermoelemente in Abbildung 4-8)

4.3.2.2 Einfluss verschiedener seitlicher Randabstände bei gekreuzten Vollgewindeschrauben

Zusätzlich wurden die Temperaturen und die Verkohlungstiefen an den Haupt-Nebenträger-Verbindungen mit gekreuzten Vollgewindeschrauben ausgewertet.

Im 30-minütigen Versuch stiegen die Temperaturen am Schraubenkopf der Vollgewindeschraube im Nebenträger jedes Versuchskörpers zunächst linear an und erreichten nach etwa 20 Minuten eine Maximaltemperatur von etwa 700°C (Messstelle A1), die sie bis zu Versuchsende beibehielten.

Die Temperaturmessstelle an der Schraubenmitte (A2) zeichnete für diejenigen Schrauben Temperaturen kleiner 200°C auf, deren Randabstand größer war als der im Kaltzustand benötigte Randabstand. Diese Temperaturen dürfen mit der in Tabelle 4-8 aufgezeigten Werten „A2 ungestört“ verglichen werden. „A2 ungestört“ gibt Temperaturen an, die in vergleichbarer Holztiefe durch den eindimensionalen Wärmeeintrag von der Seite unter 30 minütiger ETK Beanspruchung vorliegen würden (vgl. [32]). Die Differenz zu den gemessenen A2 Werten ergibt sich im Wesentlichen durch die zusätzliche Temperaturbeeinflussung der Schraube aus dem Kopf. In Mitte der Fuge zwischen Haupt und Nebenträger (M2) wurden Temperaturen von ca. 100°C aufgezeichnet. Diese Temperatur wird zu diesem Zeitpunkt durch die Entstehung und Transport von Wasserdampf innerhalb der brandbeanspruchten Holzquerschnitte in der baupraktisch gut ausgeführten Fuge deutlich geprägt.

Tabelle 4-8: Maximaltemperaturen entlang der Schrauben für die untersuchten Randabstände $a_{4,c}$ (30 min)

Prüf- körper	Durch- messer	$a_{4,c}$	30 min			
			A1	A2	M2	A2 ungestört
30-6.1	6 mm	$3*d=18\text{mm}$	803 °C	390 °C	100 °C	800°C
30-6.3	6 mm	$3*d+14=32\text{mm}$	760 °C	160 °C	100 °C	97°C
30-6.5	6 mm	$3*d+0,7*30+7=46\text{mm}$	640 °C	127 °C	120 °C	45°C
30-6.5`	6 mm	$3*d+0,7*30+7=46\text{mm}$	590 °C	130 °C	-*	45°C
30-12.1	12 mm	$3*d=36\text{mm}$	760 °C	255 °C	100 °C	97°C
30-12.3	12 mm	$3*d+10=46\text{mm}$	880 °C	-*	-*	53°C
30-12.5	12 mm	$3*d+0,7*30+7=64\text{mm}$	803 °C	150 °C	110 °C	24°C

*keine Temperaturmesswerte vorhanden

Im 60-minütigen Versuch wurden an jedem Schraubenkopf Maximaltemperaturen von 850°C gemessen. Für die größten getesteten Randabstände wurden an der Schraubenmitte (A2) Temperaturen kleiner 220°C aufgenommen. Die kleinsten Randabstände verursachten dort Temperaturen größer 700°C. Die Temperaturen in Mitte der Fuge (M2) zwischen Haupt- und Nebenträger beliefen sich bei den größten Randabständen auf maximal 150°C. Die Temperaturen an der Schraubenspitze (B3) im Nebenträger entsprachen bei allen Versuchskörpern nach 60 Minuten in etwa den Temperaturen des Prüfofens.

Der Nebenträger des Prüfkörpers 1 mit dem Schraubendurchmesser von 6 mm ist während des Versuches vom Hauptkörper abgefallen, da die Schrauben nach entsprechendem Abbrand des Holzes im verkohlten Bereich lagen. In den Haupt-Nebenträger Verbindungen des Prüfkörpers 3 mit dem Schraubendurchmesser von 6 mm und dem Prüfkörper 1 mit dem Schraubendurchmesser von 12 mm führten hohe Temperaturen (M2) und damit verringerte Festigkeit der Verbindung zu einer Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger.

Tabelle 4-9: Maximaltemperaturen entlang der Schrauben für die untersuchten Randabstände $a_{4,c}$ (60 min)

Prüf- körper	Durch- messer	$a_{4,c}$	60 min			
			A1	A2	M2	A2 ungestört
60-6.1	6 mm	$3*d=18\text{mm}$	850 °C	842 °C	760 °C	860°C
60-6.3	6 mm	$3*d+30=48\text{mm}$	850 °C	690 °C	435 °C	300°C
60-6.5	6 mm	$3*d+0,7*60+7=67\text{mm}$	850 °C	220 °C	130 °C	59°C
60-12.1	12 mm	$3*d=36\text{mm}$	850 °C	795 °C	760 °C	860°C
60-12.3	12 mm	$3*d+24=56\text{mm}$	850 °C	733 °C	148 °C	177°C
60-12.5	12 mm	$3*d+0,7*60+7=85\text{mm}$	850 °C	130 °C	101 °C	25°C

Die Verkohlung, die durch den zusätzlichen Wärmeeintrag über die Schraube in das Holz entsteht, konnte mit Hilfe der Verfärbungen entlang der Schrauben (vgl. Abbildung 4-29 und Abschnitt 11.4) oder des Holzes (vgl. Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31) ermittelt werden. Sie werden in Tabelle 4-10 für die einzelnen Versuchskörper aufgezeigt. Zuletzt wurden die Restquerschnitte des jeweiligen Nebenträgers und die verbliebenen Holzüberstände seitlich der Schrauben untersucht und ebenfalls in Tabelle 4-10 zusammengefasst.

Weitere Aufnahmen können Abschnitt 11.4 entnommen werden.



Abbildung 4-29: Verkohlung an der Schraube, die über den Nebenträger eingedreht wurde (Prüfkörper 1, Ø12 mm bei einem Randabstand von 36 mm, 30 Minuten Brandbeanspruchung), die zweite Schraube, die über den Hauptträger eingedreht wurde und am Kopf geschützt war, zeigt keine Verkohlung auf.



Abbildung 4-30: Verkohlung entlang der Schraube, die am Nebenträger eingeschraubt wurde (Prüfkörper 1, Ø12 mm bei einem Randabstand von 36 mm, 30 Minuten Brandbeanspruchung)



Abbildung 4-31: Verkohlung entlang der Schraube, die am Nebenträger eingeschraubt wurde (Prüfkörper 3, Ø12 mm bei einem Randabstand von 56 mm, 60 Minuten Brandbeanspruchung)

Tabelle 4-10:Auswertung der Verkohlung an den Haupt-Nebenträger-Verbindungen mit Vollgewindeschrauben nach 30 min und 60 min Brandbeanspruchung

Haupt-Nebenträger-Verbindung	Restquerschnitt Nebenträger		Schraubenverfärbung vom Kopf beginnend	Restabstand $a_{4,c}$
	b [mm]	h [mm]		
30-6.1	40	55	80	10
30-6.3	50	60	70	20
30-6.5	40	60	60	20
60-6.5`	0	0	90	0
30-12.1	85	155	80	15
30-12.3	85	160	80	25
30-12.5	92	170	75	40
60-6.1	0	0	100	0
60-6.2	45	40	90	0
60-6.3	40	30	65	0
60-6.4	45	23	65	5
60-6.5	45	30	55	25
60-12.1	102	155	120	5
60-12.3	95	155	95	10
60-12.4	90	170	85	40
60-12.5	95	155	75	50

4.4 Auswertung

4.4.1 Schlussfolgerung und Empfehlungen aus Versuchsergebnissen für Balkenschuhe

- Verbindungsmittel mit 50 mm Länge erscheinen ungeeignet, da sie zu kurz sind, um nach 30 min ETK-Beanspruchung noch in ausreichend tragfähigem Holz einzubinden. Sie erhitzen sich auf ihrer gesamten Länge deutlich über die Abbautemperatur von Holz, was auch gut an der vollständigen Verkohlung im Bereich der Verbindungsmittel erkennbar ist. (vgl. Abbildung 4-25)
- Untersuchte Verbindungsmittel mit 70 und 75 mm Länge scheinen auf Basis der Voruntersuchungen gut für weitere Untersuchungen geeignet zu sein, sie binden auch nach der Brandbeanspruchung von 30 Minuten noch deutlich (ca. 35 mm) in weitgehend unbeschädigtes Holz ein. (vgl. Abbildung 4-20, Abbildung 4-23, Abbildung 4-25)
- Schrauben der Abmessung 5 x 70 mm zeigen ein deutlich günstigeres Verhalten als die Rillennägel der Dimension 4 x 75 mm. Das zeigen sowohl die gemessenen Spitzentemperaturen als auch die visuell festgestellte, wesentlich geringere Verkohlung im Spitzenbereich der Verbindungsmittel. Zudem ist bei den Schrauben aufgrund ihres ausgeprägten Gewindes eine höhere Restauszugsfestigkeit als bei einem entsprechend großen Rillennagel zu erwarten. Die Schrauben waren von der Spitze aus ca. 35 mm blank, während die Rillennägel auf ihrer ganzen Länge dunkel verfärbt waren.
- Breiten des Nebenträgers von 100 mm erwiesen sich als zu schmal, da hier im Anschlussbereich durch die Verbindungsmittel eine Verkohlung mit weitgehendem Festigkeitsverlust über dem gesamten Querschnitt auftritt. Grund hierfür ist der zusätzliche Temperatureintrag durch die Verbindungsmittel im Bereich des Anschlusses. Sinnvoll erscheinen Mindestbreiten des Nebenträgers entsprechend der zweifachen Mindest-Verbindungsmittellänge, d. h. beispielsweise 140 mm. Ein möglicher Einhänge- und Auflagereffekt des Nebenträgers auf dem Bodenblech wurde innerhalb dieser Betrachtungen noch nicht berücksichtigt.
- Die Lage der Blechlaschen am Hauptträger (innen/außen) zeigte keinen signifikanten Einfluss auf das Verhalten der Verbindung am Nebenträger.
- Die Verbindung am Hauptträger mit innenliegenden Laschen ist günstiger als die Verbindung mit außenliegenden Laschen, da das Blech und die Verbindungsmittel besser geschützt sind. Eine ausreichende Resttragfähigkeit erscheint auf Basis der

Voruntersuchung auch mit außenliegenden Laschen gewährleistet, da die Verbindung zum Nebenträger einen deutlich höheren Zerstörungsgrad aufwies.

- Auf Basis der bisherigen Ergebnisse kann für diese Verbindung der Anschluss vom Nebenträger zum Balkenschuh als kritischste Punkt angesehen werden. Hier liegt infolge des vorhandenen Spaltes zwischen Haupt- und Nebenträger eine mehr oder weniger dreiseitige Brandbeanspruchung vor, was in Verbindung mit dem erhöhten Temperatureintrag im Bereich der Verbindungsmittel zum stärksten Abbrand führt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, den Abstand zwischen Haupt- und Nebenträger so gering wie möglich zu halten. Brandschutztechnisch günstig wäre es, den Nebenträger ohne Spalt an den Hauptträger auszuführen. Dies erscheint jedoch als nicht praxisgerecht und ist nur mit hohem Aufwand möglich.
- Es wurde nur die Blechdicke 2,0 mm untersucht. Es ist aber nicht zu erwarten, dass höhere Blechdicken wie z. B. beim Typ 05/2,5 Kombi sich negativ auswirken.
- Größere Höhen der Balkenschuhe wirken sich günstig auf das für das Brandverhalten aus. Grund sind die mit der Höhe relativ abnehmenden ungünstigen Einflüsse aus Rand- und Seitenbeanspruchungen. Vergrößerungen der Breite erscheinen dagegen ab einem gewissen Mindestbreitenmaß nicht als sinnvoll, da dies nichts mehr an den maßgebenden Beanspruchungen im Anschlussbereich ändert.
- Der Spalt zwischen Nebenträger und Hauptträger sollte so gering wie möglich sein, praktisch sinnvoll wären z. B. 3 oder 5 mm. Dieses Spaltmaß sollte zur Vergleichbarkeit der Versuche einheitlich verwendet und eingehalten werden.

4.4.2 Schlussfolgerung und Empfehlung aus Versuchsergebnissen für Vollgewindeschrauben

- Um eine geringe Verkohlungstiefe zu erhalten, sollten lange Schrauben mit kleinen Durchmessern benutzt werden. Die Wärme, die über den Schraubenkopf eingetragen wurde, kann über eine große Schraubenlänge besser abgeführt werden, da mehr Kontaktfläche zum Holz entsteht. Bei kleinen Durchmessern (d_{nom}) wirkt sich das Verhältnis zwischen der Kreisfläche (A) der Schraube und deren Umfang (U), das mit der Gleichung $A=U \cdot d/4$ beschrieben werden kann, weniger stark aus als bei großen Durchmessern. Demnach steigt bei größer werdendem Durchmesser die Fläche und somit die erwärmte Schraubenmasse schneller an, als der Umfang der Schraube, über welchen die Temperatur ins Holz abgeleitet werden kann.

- Schrauben aus Edelstahl weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf als Schrauben aus Kohlenstoffzähl, was zu einem geringeren Wärmeeintrag in die Verbindung führt.
- Je größer der Randabstand $a_{4,c}$ gewählt wird, desto geringer wird der Einfluss des Wärmeeintrags über den Schraubenkopf.
- Bei Verwendung eines Randabstandes von $a_{4,c} = 3 \cdot d_{\text{nom}} + (\beta_n \cdot t + k_0 \cdot d_0) / 2$ für eine 30 minütige Brandbeanspruchung und $a_{4,c} = 3 \cdot d_{\text{nom}} + (\beta_n \cdot t + k_0 \cdot d_0)$ (gemäß DIN EN 1995-1-2) für eine 60 minütige Brandbeanspruchung entstehen bei ungeschützten Schraubenkopf Temperaturen von weniger als 220°C auf mittlerer Länge der Schrauben.
- Um eine gleichmäßige Temperaturbeanspruchung entlang der Schraube zu erhalten, muss der Schraubenkopf durch zusätzliche Holzbekleidung, Holzwerkstoffplatten oder Gipsplatten geschützt werden.

5 Belastete Brandversuche und zugehörige Ermittlung der Kalttragfähigkeit

5.1 Grundlagen

5.1.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Zu Beginn der Planung der belasteten Brandversuche waren grundlegende Randbedingungen des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung festzulegen. Dies erfolgte insbesondere für die folgenden Punkte:

- Einheitliche Geometrie für die Brand- und Kaltversuche, um eine Vergleichbarkeit herzustellen
- Berücksichtigung von Möglichkeiten der Lastaufbringung und von Einbaumöglichkeiten in die Prüfeinrichtungen im Laboratorium der MPA BAU der TUM und der Brandversuchsstelle der MFPA Leipzig GmbH
- Gabellagerung der Prüfkörper, auch im Brandversuchsofen
- Entscheidung bezüglich einer drei- oder vierseitigen Brandbeanspruchung
- Entscheidung bezüglich des Fugenspalt zwischen Haupt- und Nebenträger
- Prüfung von jeder Verbindung einzeln, um das Tragverhalten getrennt erfassen und beurteilen zu können.
- Längsverschieblichkeit des Nebenträgers

Der letzte Punkt zur Verschieblichkeit des Nebenträgers wurde in Literaturangaben und Prüfungen in der Vergangenheit unterschiedlich gehandhabt. In Versuchen aus dem Jahr 1977 zur Brandtragfähigkeit von BMF-Balkenschuhverbindungen [19] wurde z. B. eine Geometrie gewählt, bei der eine Längsverschiebung der Nebenträger behindert oder sogar vollständig verhindert wird (Abbildung 5-1). In anderen Versuchen (Abbildung 5-2, Abbildung 5-3) wurde die Auflagersituation so gewählt, dass eine zwängungsfreie Längsverschiebung ermöglicht wird.

Das typische Versagensbild von Balkenschuhverbindungen ist ein Herausrutschen des Nebenträgers schräg nach unten. Auch bei Verbindungen mit Vollgewindeschrauben kommt es zu einer Spaltbildung zwischen Haupt- und Nebenträger, sofern diese nicht durch die Auflagersituation behindert wird. Im Falle einer behinderten Längsverschiebung ist demzufolge mit einer erhöhten Steifigkeit und Tragfähigkeit zu rechnen.

In praktischen Anwendungen von Haupt-Nebenträgerverbindungen sind die Nebenträger häufig längsverschieblich angeordnet. Im Interesse einer allgemeinen Aussagefähigkeit der Ergebnisse wurden daher Versuchsaufbauten gewählt, die diese Verformungsart zulassen.

Die Spaltbreite und der Einfluss eines möglichen Fugenspalt zwischen Haupt- und Nebenträger bei Balkenschuhverbindungen wurden intensiv diskutiert. Schraubenverbindungen werden spaltfrei montiert.

Je größer der Spalt gewählt wird, umso mehr treten negative Einflüsse auf das Tragverhalten aus der Temperaturbeanspruchung des Hirnholzes des Nebenträgers auf. Im Sinne einer möglichst hohen Tragfähigkeit im Brandfall sollten die Bauteile daher spaltfrei montiert oder der Spalt mit Dichtungsmaterialien verfüllt werden. Dem stehen praktische Erfordernisse bei der Montage entgegen, seitens der Arbeitsgruppe wurde auch geäußert, dass eine gewisse Spaltbreite zum Ausgleich von Toleranzen im Zuschnitt erforderlich sei. Balkenschuhtypen mit innenliegenden Laschen erfordern zudem prinzipbedingt eine Spaltbreite mindestens in der Blechdicke zuzüglich der Dicke der Verbindungsmittelköpfe.

In Literaturangaben ([37], [36], [18], [19]) wurde diese Frage unterschiedlich gehandhabt, gewählt wurden in der Regel Spaltbreiten zwischen null und fünf Millimetern.

Für dieses Vorhaben wurde in Abstimmung mit der Arbeitsgruppe eine einheitliche Spaltbreite von 4 mm für alle Versuche mit Balkenschuhen gewählt. Dieses Maß ergibt sich aus dem Mindestspalt der Balkenschuhe mit innenliegenden Laschen und berücksichtigt gleichzeitig die praktischen Erfordernisse hinsichtlich der Baustellenmontage.

Grundsätzlich war zu entscheiden, ob eine drei- oder vierseitige Brandbeanspruchung der Verbindungen gewählt werden sollte. In vielen praktischen Anwendungen befindet sich oberseitig eine Abdeckung auf den Holzbauteilen, z. B. in Form von Decken- oder Dachaufbauten. Es ist mit einer deutlichen Erhöhung der Tragfähigkeit im Brandfall für einen oberseitigen Schutz zu rechnen. Es gibt demgegenüber allerdings auch eine große Zahl von Einbausituationen, bei denen die Verbindungen allseitig freiliegen. Ein Beispiel hierfür sind z. B. räumliche Stabwerke von Hallenkonstruktionen. Im Interesse einer allgemeinen Anwendbarkeit der Ergebnisse wurde für die Balkenschuhverbindungen entschieden, auf eine Abdeckung zu verzichten. Die Schraubenverbindungen wurden teilweise mit oberseitigem Schutz ausgeführt, da dies auch in nahezu allen praktischen Fällen so ausgeführt wird.

Alle Bauteile wurden in den Kalt- und Brandversuchen gegen Verdrehen um die Stablängsachsen durch Gabellagerungen fixiert.

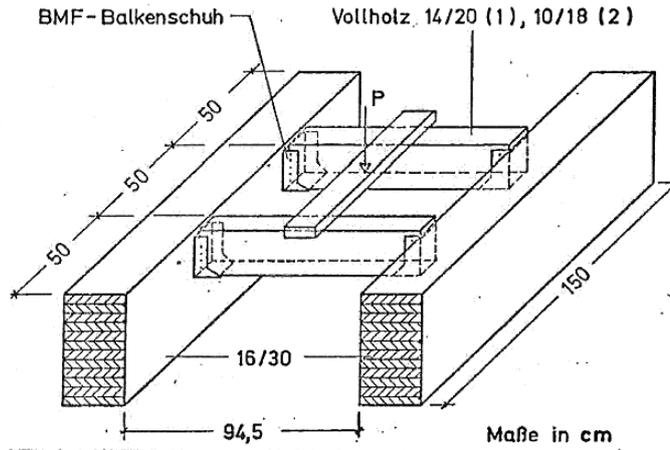


Bild 1: Isometrische Darstellung der Probekörper (Schema)

Abbildung 5-1: Isometrie des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Brandtragfähigkeit von Balkenschuhen, entnommen aus [19]

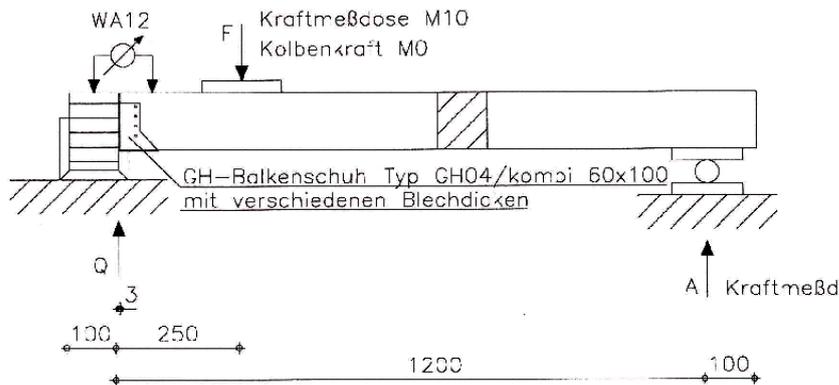


Abbildung 5-2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Balkenschuhen im Kaltbemessungsfall, Seitenansicht, entnommen aus [38]

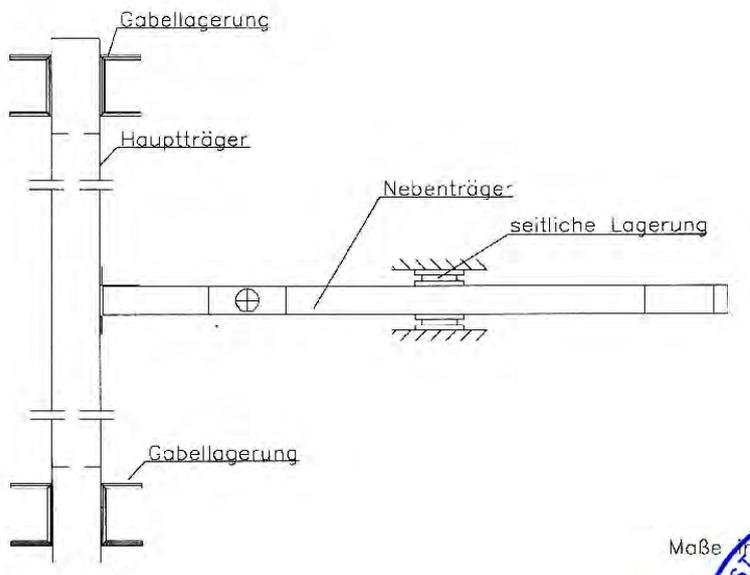


Abbildung 5-3: wie Abbildung 5-2, Aufsicht, entnommen aus [38]

5.1.2 Aufbau der Prüfkörper

5.1.2.1 Allgemeines

Die Prüfkörper waren T-förmig aus je einem Haupt- und Nebenträger zusammengesetzt. Die Länge des Hauptträgers betrug bei allen Ausführungen 2000 mm, die des Nebenträgers 1200 mm. Die Verbindung der Holzquerschnitte erfolgte mit Balkenschuhen oder über paarweise schräg eingedrehte Vollgewindeschrauben. Die Holzquerschnitte wurden je nach Verbindungstyp variiert.

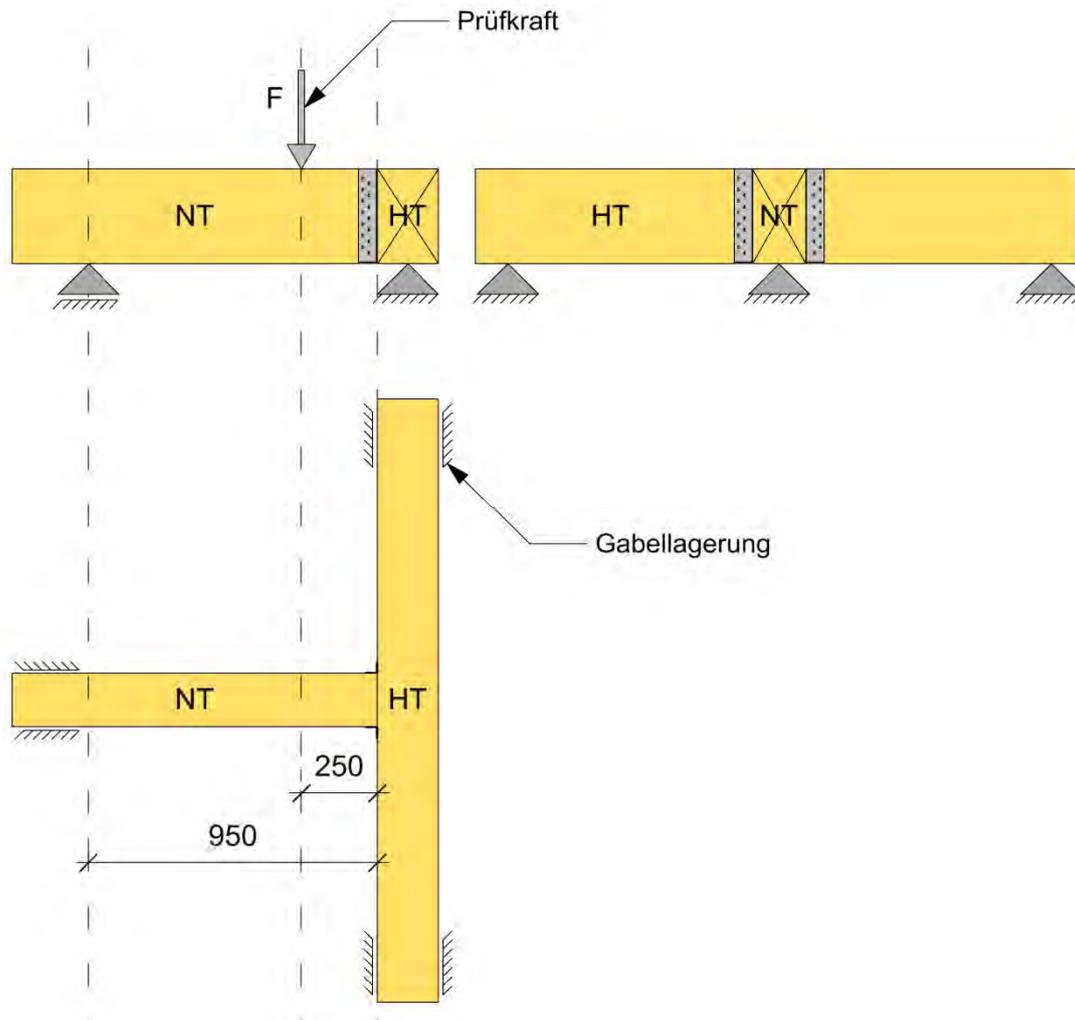


Abbildung 5-4: Grundaufbau der belasteten Versuche

Die Berechnung der Querkraft wird mit Hilfe des durch den Versuchsaufbau vorgegebenen Momenten-Gleichgewichtes berechnet.

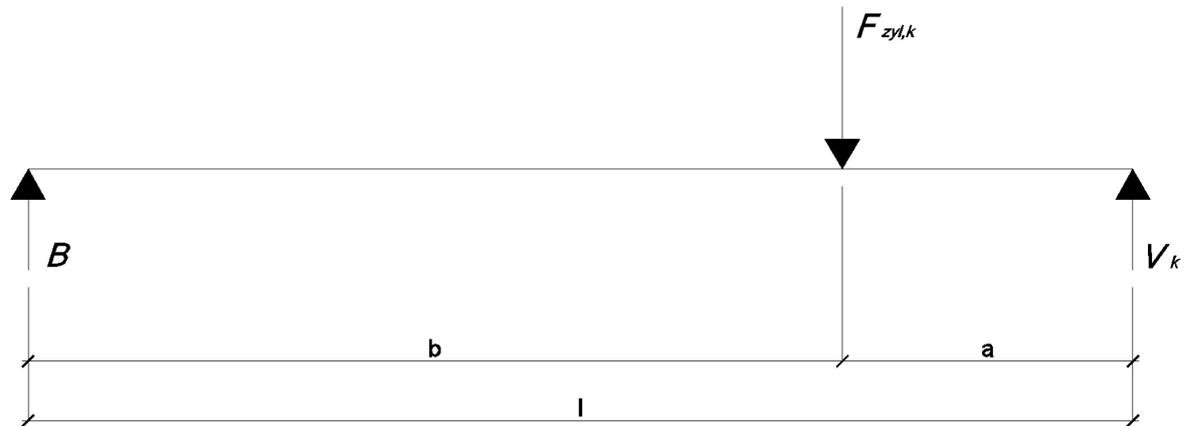


Abbildung 5-5: Darstellung der Hebelarme und Kraftkomponenten

$$l=950 \text{ mm}$$

$$a=250 \text{ mm}$$

$$b=700 \text{ mm}$$

$$V_k = \frac{F_{zyl,k} \cdot b}{l} = F_{zyl,k} \cdot \frac{0,7}{0,95} = 0,737 \cdot V_k \quad (11)$$

mit:

V_k aufnehmbare Querkraft der Haupt-Nebenträger-Verbindung in der Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger in kN

$F_{zyl,k}$ Zylinderkraft in einem Abstand a von der Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger [kN]

B Auflagerkraft am Nebenträger [kN]

l Länge zwischen dem Anschluss von Haupt-Nebenträger (V_k) bis zum Auflager des Nebenträgers (B) [m]

a Länge zwischen dem Anschluss von Haupt-Nebenträger (V_k) bis Einleitung der Zylinderkraft ($F_{zyl,k}$) [m]

b Länge zwischen der Einleitung der Zylinderkraft ($F_{zyl,k}$) bis zum Auflager des Nebenträgers (B) [m]

Durch Multiplikation der errechneten Zylinderkraft mit dem Faktor von 0,737 wird die Querkraft bestimmt.

5.1.2.2 Holzfeuchten und Rohdichten

Bei allen Bauteilen wurden die Holzfeuchten und Rohdichten gemessen. Die Holzfeuchten aller Prüfkörper lagen zwischen 13,1 M-% und 14,9 M-%. Die Rohdichten und Abmessungen sind aus Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 ersichtlich. Die Nummerierung und Zuordnung der Bauteile ist wie folgt: Alle Hölzer für die Balkenschuhverbindungen erhalten eine Nummer aus den Buchstaben „B“ und einer fortlaufenden Ziffer für die Seriennummer sowie einer Nummer für die Prüfkörpernummer. Alle Bauteile für die Schraubenverbindungen erhalten die gleiche Systematik mit dem Buchstaben „S“.

Tabelle 5-1: Abmessungen und Rohdichten der Prüfkörper für die Kaltversuche

Nr.	HT-Abmessung [mm]	HT-Rohdichte [kg/m ³]	NT-Abmessung [mm]	NT-Rohdichte [kg/m ³]
B1-1	160 x 240 x 600	435,8	120 x 160 x 1000	433,7
B1-2	160 x 240 x 600	435,8	120 x 160 x 1000	429,7
B1-3	160 x 240 x 600	465,1	120 x 160 x 1000	470,1
B2-1	200 x 320 x 700	430,8	120 x 240 x 1200	428,2
B2-2	200 x 320 x 700	424,1	120 x 240 x 1200	425,3
B2-3	200 x 320 x 700	439,7	120 x 240 x 1200	436,9
B2-4	200 x 320 x 700	451,4	120 x 360 x 1200	451,4
B3-1	200 x 320 x 700	446,4	140 x 200 x 1200	500,0
B3-2	200 x 320 x 700	453,1	140 x 200 x 1200	497,0
B3-3	200 x 320 x 700	450,9	140 x 200 x 1200	503,0
B3-4	200 x 320 x 700	451,5	140 x 360 x 1200	451,5
B4-1	200 x 320 x 700	455,4	140 x 200 x 1200	517,9
B4-2	200 x 320 x 700	453,1	140 x 200 x 1200	503,0
B4-3	200 x 320 x 700	453,1	140 x 200 x 1200	514,0
S3-1	100 x 156 x 700	485,0	79 x 156 x 1200	489,0
S3-2	100 x 156 x 700	527,0	79 x 156 x 1200	413,0
S3-3	100 x 156 x 700	473,0	79 x 156 x 1200	502,0
S4-1	200 x 300 x 600	451,0	176 x 300 x 1200	445,0
S4-2	200 x 300 x 600	445,0	176 x 300 x 1200	452,0
S4-3	200 x 300 x 700	444,0	176 x 300 x 1200	436,0

Tabelle 5-2 Abmessungen und Rohdichten der Prüfkörper für die Brandversuche

Nr.	HT-Abmessung [mm]	HT-Rohdichte [kg/m ³]	NT-Abmessung [cm]	NT-Rohdichte [kg/m ³]
B1	200 x 320 x 2000	438,3	120 x 160 x 1200	455,0
B2	200 x 320 x 2000	428,1	120 x 240 x 1200	422,5
B3	200 x 320 x 2000	439,1	140 x 200 x 1200	526,8
B3a	200 x 300 x 2000	438,4	140 x 200 x 1200	450,3
B4	200 x 320 x 2000	432,8	140 x 200 x 1200	544,6
S1	87 x 161 x 2000	452,5	87 x 161 x 1200	459,1
S2	144 x 188 x 2000	436,5	144 x 188 x 1200	437,5
S3	90 x 156 x 2000	460,0	90 x 156 x 1200	447,1
S4	176 x 315 x 2000	444,3	176 x 315 x 1200	439,8

5.1.2.1 Erforderliche Tragfähigkeiten im Brandfall und bei Normaltemperatur

Für die Beurteilung der Tragfähigkeit von Bauteilen und Verbindungen im Brandfall ist es notwendig, das rechnerisch erforderliche Tragfähigkeitsniveau zu definieren. Dieses liegt immer wesentlich unter der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur, da es sich um einen außergewöhnlichen Bemessungsfall handelt und reduzierte Sicherheitsfaktoren angesetzt werden dürfen (vgl. DIN EN 1990 [41]).

Das erforderliche Tragfähigkeitsniveau lässt sich aus dem Vergleich der Nachweisgleichungen in DIN EN 1995-1-1 (Bemessung bei Normaltemperatur) und DIN EN 1995-1-2 (Bemessung im Brandfall) bestimmen.

Wenn die Tragfähigkeit einer Holzbauverbindung unter Normaltemperatur rechnerisch zu 100% ausgenutzt ist, muss deren Design-Tragfähigkeit im Brandfall 28 % - 51% des charakteristischen Wertes unter Normaltemperatur erreichen, um den Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall erfüllen zu können. Dieses Verhältnis ergibt sich aus folgender Überlegung:

Bemessung der Tragfähigkeit unter Normaltemperatur nach DIN EN 1995-1-1:

$$E_d \leq k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M} = (0,6 \dots 1,1) \cdot \frac{R_k}{1,3} = (0,46 \dots 0,85) \cdot R_k \quad (15)$$

mit:

E_d Bemessungswert der Beanspruchungen bei Normaltemperatur für die Grundkombination der Einwirkungen, siehe DIN EN 1990

R_k charakteristische Widerstand der Verbindung in kN

k_{mod} Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt (variiert im Bereich zwischen 0,6 und 1,1 je nach Länge der Lasteinwirkungsdauer und der Nutzungs-kategorie)

γ_M Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft, unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten und von geometrischen Abweichungen

Bemessung der Tragfähigkeit im Brandfall nach DIN EN 1995-1-2:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d = 0,6 \cdot E_d \leq k_{mod,fi} \cdot \frac{k_{fi} \cdot R_k}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot \frac{1,05 \cdot R_k}{1,0} \approx 1,0 \cdot F_{V,k} \quad (16)$$

mit:

$E_{d,fi}$ Einwirkung auf die Verbindung/ das Bauteil im Brandfall

$k_{mod,fi}$ Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt im Brandfall 1,0

$\gamma_{M,fi}$ Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft im Brandfall 1,0

k_{fi} Koeffizient zur Ermittlung des 20 %-Fraktilwertes (hier bezogen auf Verbindungsmittel)

η_{fi} Abminderungsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall (üblich 0,6 im Holzbau bei Wohn- und Büronutzung)

Einsetzen der Gleichung (15) in (16):

$$E_{d,fi} = E_{k,fi} = 0,6 \cdot (0,46 \dots 0,85) \cdot R_k = (0,28 \dots 0,51) \cdot R_k \quad (17)$$

mit:

Der Bereich zwischen 28 % und 51 % ergibt sich aus den unterschiedlichen anzusetzenden Werten für k_{mod} in der Bemessung bei Normaltemperatur. Zudem können sich Variationen ergeben durch die Art der Nutzung und damit das Verhältnis zwischen ständiger Last und Nutzlasten.

Unter der Annahme von $k_{mod} = 0,8$ und Nutzung des Bauteils in einem Wohngebäude ergibt sich ein erforderliches Lastniveau von rund 37 % zwischen den charakteristischen Tragfähigkeiten im Brandfall und bei Normaltemperatur. Ein im Kaltzustand voll ausgelastetes Bauteil muss daher im Brandfall mindestens dieses Lastniveau erreichen, um beide Nachweise zu erfüllen.

In Fällen, bei denen bestimmte Bauteile nicht das geforderte Tragfähigkeitsniveau im Brandfall erreichen, kann daher der Nachweis im Kaltzustand nicht voll ausgenutzt werden.

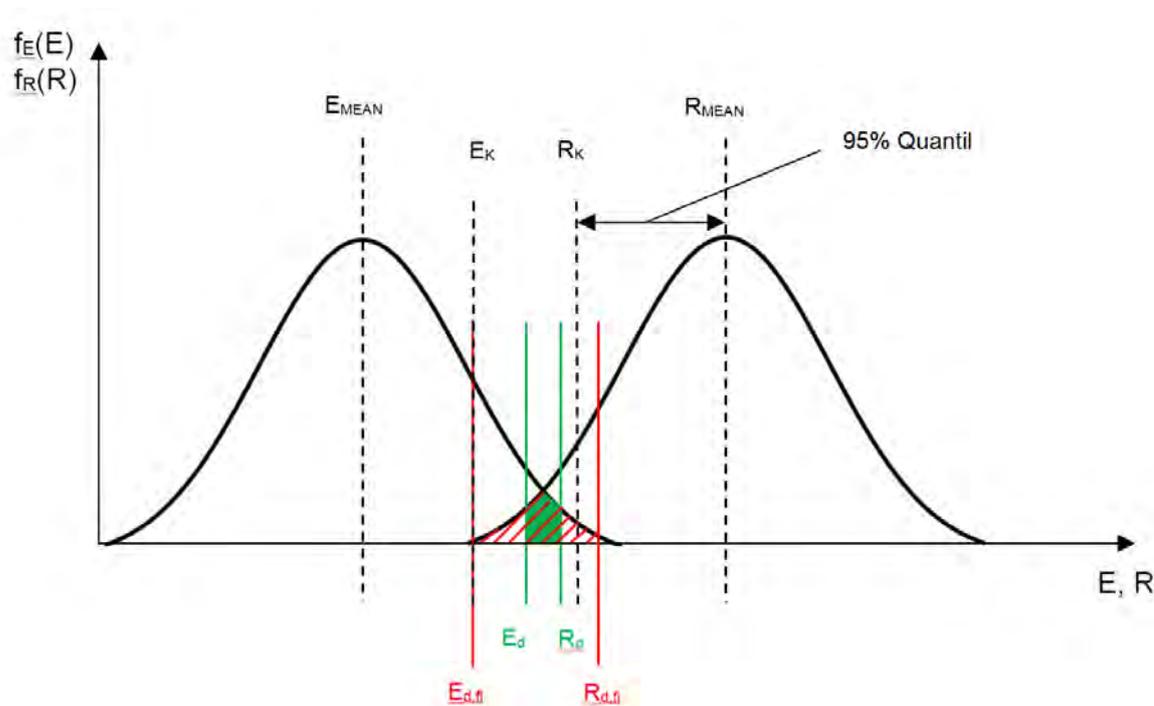


Abbildung 5-6: Gegenüberstellung der Einwirkungen und Widerstände unter Normaltemperatur und im Brandfall

5.1.2.2 Balkenschuhe

Alle Hauptträgerquerschnitte wurden einheitlich mit 200 x 300 mm gewählt. Es wurden die folgenden Verbindungstypen untersucht:

Tabelle 5-3: Abmessungen der untersuchten Querschnitte mit Balkenschuhen

Nr.	Balkenschuhtyp	Verbindungsmittel	NT-Querschnitt [mm]	HT-Querschnitt [mm]
B1	Typ 04 außen	Rillennägel 4 x 60 mm	120 x 160	200 x 320
B2	Typ 05 außen	Schrauben 5 x 60 mm	120 x 240	200 x 320
B3	Typ 05 außen	Schrauben 5 x 70 mm	140 x 200	200 x 320
B4	Typ 05 außen	Rillennägel 4 x 75 mm	140 x 200	200 x 320

Verwendet wurden Balkenschuhe des Fabrikats „G&H Baubeschläge“, Typen 04 und 05 gemäß ETA-08/0264. Die Balkenschuhe werden aus bandverzinktem Stahlblech der Stärke 2,0 mm durch Kaltumformen hergestellt. Die Abmessungen entsprachen jeweils denen der Nebenträgerquerschnitte. Alle Verbindungen wurden gemäß Zulassung voll ausgenagelt bzw. –geschraubt. Diese Vollaussnagelung nach Zulassung bedeutet in der Regel nicht, dass in alle eingestanzten Löcher Verbindungsmittel eingebracht werden. Die „überzähligen“ Löcher haben produktionstechnische Gründe, das zusätzliche Einbringen von Verbindungsmitteln erhöht die rechnerische Tragfähigkeit im Kaltbemessungsfall nicht. In einigen der Brand-

versuche wurden dagegen alle vorgestanzten Löcher der Balkenschuhe mit Verbindungsmitteln versehen, was in der Zulassung zur Erzielung der vollen Tragfähigkeit nicht gefordert ist. Die Auswahl der Balkenschuhkonfigurationen wurde mit dem Ziel vorgenommen, eine möglichst gute Bandbreite von Aussagen auf Basis der beschränkten Versuchsanzahl treffen zu können. Hierzu fand eine Abstimmung mit der Arbeitsgruppe statt, in der neben den Auswahlkriterien auf Basis der unbelasteten Brandversuche auch praktische und wirtschaftliche Überlegungen beachtet wurden. Aus diesem Grund wurde z. B. der Balkenschuh B1 (Typ GH 04) aufgrund seiner hohen praktischen Anwendungshäufigkeit und dementsprechenden wirtschaftlichen Bedeutung mit untersucht.

5.1.2.3 Vollgewindeschrauben

Die Anordnung von gekreuzten Vollgewindeschrauben unter 45° Einschraubwinkel führt zur größten erwarteten Querkrafttragfähigkeit der Verbindung. Die Prüfkörper wurden, wie in den unbelasteten Brandversuchen, in der Art ausgeführt, dass jeweils die erste Schraube über den Hauptträger und die zweite Schraube über den Nebenträger eingedreht wurde (vgl. Abbildung 1-2 und Abbildung 5-18).

Um kleinstmögliche Querschnitte mit maximaler Querkrafttragfähigkeit durch gekreuzte Vollgewindeschrauben zu erhalten, wurden möglichst kleine Randabstände $a_{4,c}$ und a_3 und Abstände zwischen den Schrauben a_2 gewählt (vgl. Abbildung 5-18).

Die Randabstände wurden in Abhängigkeit der abgeschätzten Auszugsfestigkeit der Vollgewindeschrauben im Brandfall festgelegt. Diese wurde mit Hilfe eines Abminderungsfaktors für die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung abgeschätzt (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die entsprechenden Temperaturen hinter bestimmten Holzüberdeckungen wurden entweder durch die Temperaturwerte aus den unbelasteten Brandversuchen oder durch die Berechnung der Temperatur unter Voraussetzung eines eindimensionalen Wärmeeintrags (Gleichung (18)) bestimmt. Die Ausziehfestigkeiten sollten dabei so groß gewählt werden, dass sich ein Verhältnis zwischen der Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur von ca. 0,5 bis 0,6 ergeben sollte.

Bei einem abgeschätzten Verhältnis von 0,5 bis 0,6 liegt die Querkrafttragfähigkeit der Verbindung im Brandfall in allen Fällen höher als die Einwirkung im Brandfall (vgl. Abschnitt 5.1.2.1).

Hinter einer Holzüberdeckung von ca. 29 mm ist bei einer Brandbeanspruchung von 30 Minuten mit Temperaturen von ca. 100°C bei Verwendung von Brettschichtholz zu rechnen und daher mit einem Verhältnis zwischen der Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur von ca. 0,5. Bei einer Überdeckung von 33 mm sollten nur noch etwa 80°C vorliegen. Bei 80°C sollte in etwa ein Verhält-

nis von 0,6 entstehen. Bei einer 60 minütigen Brandbeanspruchung herrschen etwa 80°C bei einer Holzüberdeckung von 61 mm.

$$T_{(\ddot{u})} = 20 + 180 \cdot \left(\beta_n \cdot \frac{t}{\ddot{u}} \right)^{0,025 \cdot t + 1,75} \quad (18)$$

mit:

- T Temperatur in bestimmter Holztiefe bei eindimensionalen Wärmeeintrag hervorgerufen durch eine Beanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve [°C]
- β_n Bemessungswert der ideellen Abbrandrate, einschließlich der Auswirkungen von Eckausrundungen und Rissen
- t Dauer der Brandbeanspruchung in min
- \ddot{u} Dicke der Holzüberdeckung/ Tiefe des Messpunktes im Holz

Die Länge der Schrauben wurde in Abhängigkeit der geforderten Randabstände $a_{4,c}$ und $a_{3,c}$ (vgl. Tabelle 2-1 und Abbildung 2-9) bestimmt.

Im Gegensatz zu den benötigten Randabständen bei geschützten Schraubenköpfen nach DIN EN 1995-1-2 Abschnitt 6.4 wurde die Überdeckung der Schraubenspitze a_3 in den belasteten Brandversuchen gleich groß wie die seitliche Überdeckung der Schraube ($= a_{4,c} - \frac{d}{2}$) angeordnet. Dieses Vorgehen führt zu einer reduzierten Querschnittshöhe im Vergleich zur Bemessung nach DIN EN 1995-1-2.

Es wurden folgende Verbindungen untersucht:

Tabelle 5-4: Abmessungen der untersuchten Querschnitte mit Vollgewindeschrauben

Nr.	Verbindungsmittel	NT-Querschnitt [mm]	HT-Querschnitt [mm]
S1	Vollgewindeschrauben Ø 6 mm x 180 mm, 45°	87 x 161	100 x 161
S2	Vollgewindeschrauben Ø 6 mm x 180 mm, 45°	143 x 188	120 x 188
S3	Vollgewindeschrauben Ø 6 mm x 180 mm, 45°	90 x 156	100 x 156
S4	Vollgewindeschrauben Ø 12 mm x 350 mm, 45°	176 x 315	160 x 315

S2 stellt die einzige Verbindung dar, die einer Brandbelastung von 60 Minuten ausgesetzt ist. Alle anderen Versuchskörper wurden für 30 Minuten Branddauer konzipiert.

Die Abmessungen der Haupt- und Nebenträger entsprechen nicht den Standardabmessungen für Querschnitte im Holzbau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bestimmte Mindestrandabstände $a_{4,c}$ in Kombination mit vorgegebenen Abstände zwischen den Schrauben a_2 sowie Mindestüberdeckungen der Schraubenspitze a_3 untersucht werden sollten, die zu unüblichen Breiten und Höhen führten.

Bei den Versuchen zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur weichen die Querschnitte (vgl. Tabelle 5-1) von den Versuchskörpern in Tabelle 5-4 geringfügig ab.

Bei der Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur spielen die unterschiedlichen Randabstände $a_{4,c}$ nur eine untergeordnete Rolle, sofern der Mindestrandabstand unter Normaltemperatur nach Zulassung [48] von $a_{4,c} = 3 \cdot d$ eingehalten wurde. Daher wurde zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit mit Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 6 mm und einer Länge von 180 mm nur eine Versuchsreihe mit einem einheitlichen Querschnitt für den Haupt- und auch den Nebenträger vorgenommen (vgl. Tabelle 5-1). Die Querschnittsbreite von 79 mm ergab sich durch die Addition der beiden Randabstände $a_{4,c}$, die wie beim Versuchskörper S3 mit 32 mm gewählt wurde, und einem Mindestabstand a_2 zwischen den Schrauben von 15 mm ($a_2 = 2,5 \cdot d$). Die Querschnittshöhe betrug wie bei Versuchskörper S3 156 mm.

Für den Brandversuch der Verbindung S3 wurde im Gegensatz dazu der Abstand a_2 zwischen den Schrauben und demzufolge die Querschnittsbreite des Nebenträgers auf 90 mm erhöht, um zu verhindern, dass der Nebenträger im Brandfall auf Schub versagt, bevor die Verbindung ihre volle Tragfähigkeit zur Geltung bringen kann.

Zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur der Verbindung mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 350 mm wurden nahezu die gleichen Querschnitte wie für S4 verwendet. Da die Überdeckung der Schraubenspitze im Vergleich zu den Brandversuchen keine Rolle zur Ermittlung der Tragfähigkeit spielt, wurde statt einer unüblichen Querschnittshöhe von 315 mm eine standardisierte Höhe von 300 mm verwendet. Im Vergleich zum Prüfkörper S4 (vgl. Tabelle 5-4) betrug die Breite des Hauptträgers 200 mm anstatt 160 mm. Die Erhöhung der Breite des Hauptträgers führt zu keiner Veränderung der Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur.

5.2 Ermittlung der Tragfähigkeit im Kaltzustand

5.2.1 Zweck der Versuche

Von allen für die belasteten Brandversuche ausgewählten Versuchskörpern wurden vorab die Tragfähigkeiten im Kaltzustand experimentell bestimmt. Hierzu wurde von jedem Typ

eine Serie von drei identischen Versuchskörpern hergestellt und in der Versuchshalle der MPA BAU der TUM die Beanspruchbarkeit geprüft.

Zweck der Versuche war die Bestimmung der tatsächlichen Tragfähigkeit im Kaltzustand, um nachfolgend anhand der Beanspruchbarkeit der Brandversuchskörper einen „Abstand“ zwischen den Mittelwerten der Tragfähigkeit unter Normaltemperatur und unter Brandbeanspruchung angeben zu können.

Die rechnerische Bestimmung der charakteristischen Tragfähigkeit im Kaltzustand beruht auf empirischen Formeln basierend auf Versuchsergebnissen. Die berechneten Tragfähigkeiten entsprechen daher nicht unbedingt den tatsächlich erreichbaren Werten, diese werden häufig erheblich unterschätzt. Aus diesem Grund erschien die Durchführung von praktischen Versuchen zur Bestimmung des Mittelwertes der Tragfähigkeit als sinnvoll.

5.2.2 Ermittlung der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit aus Versuchen

Die Ermittlung des charakteristischen Wertes (5% Quantile) aus den Versuchen erfolgt nach DIN EN 14358 [53]. Hierfür müssen jedoch mindestens drei Versuchskörper des gleichen Typs vorliegen, um den entsprechenden charakteristischen Wert ermitteln zu können.

Mittelwert:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad (19)$$

Standardabweichung:

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \cdot 0,05 \cdot \bar{y} \right. \quad (20)$$

Charakteristischer Wert:

$$V_k = \bar{y} - k_s \cdot s_y \quad (21)$$

mit

\bar{y} = Mittelwert [N/mm²]

m_i = Querkrafttragfähigkeit im einzelnen Versuch [N/mm²]

n = Probenanzahl

s_y = Standardabweichung des Ausziehfestigkeit [N/mm²]

V_k = Charakteristischer Wert der Querkrafttragfähigkeit [N/mm²]

k_s = 5%-Quantilwert nach DIN EN 14358 Tabelle.1 (hier 3,15 für 3 Versuche)

5.2.3 Versuchsaufbau und -durchführung

5.2.3.1 Versuchsaufbau

Die T-förmigen Versuchskörper wurden mit Halterungen aus Stahlbauteilen gabelgelagert auf dem Maschinentisch der Prüfmaschine befestigt. Die Lasteinleitung erfolgte durch eine Kugelkalotte, der Nebenträger wurde auf einem Rollenlager längsverschieblich gelagert (vgl. Abbildung 5-7).

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte durch die Projektbearbeiter und Mitarbeiter des MPA BAU der TUM. Aufgezeichnet wurden die Maschinenkraft und der Maschinenweg der Prüfmaschine und die Relativverschiebung zwischen Haupt- und Nebenträger.

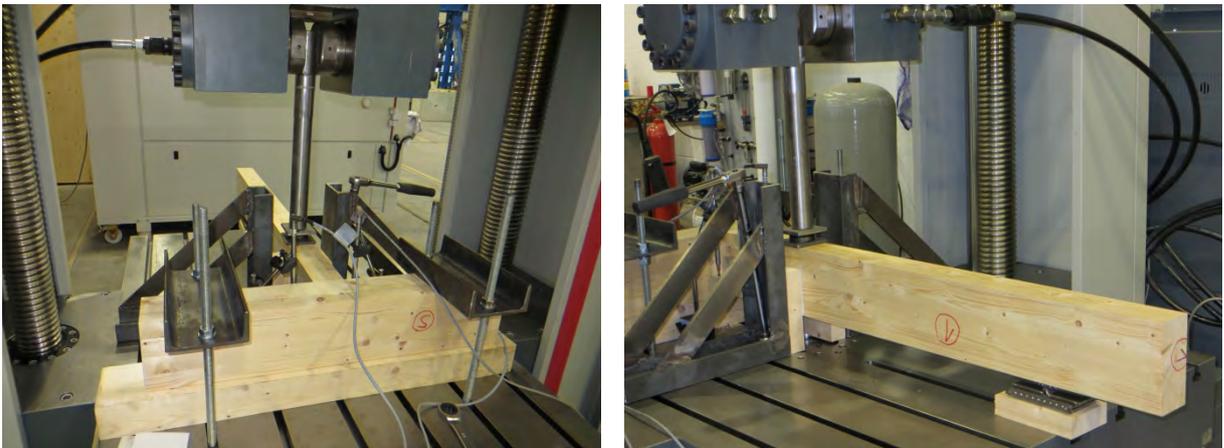


Abbildung 5-7: Versuchsvorrichtung

5.2.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer Universalprüfmaschine „Zwick-Roell“ durchgeführt. Hierbei wurde jeweils der erste Versuchskörper weggesteuert bis zum Bruch belastet. Zur Festlegung der Belastungsgeschwindigkeit wurde der jeweilige Tragfähigkeitswert rechnerisch abgeschätzt und die Geschwindigkeit so gewählt, dass nach drei Minuten voraussichtlich der Bruch erreicht wurde. Anhand der so ermittelten Tragfähigkeit wurde anschließend die Belastungsgeschwindigkeit der folgenden kraftgesteuerten Versuche festgelegt. Die Durchführung entsprechenden Versuche erfolgte nach DIN EN 26891 [54] unter Einbeziehung einer Entlastungsphase mit Hysterese. DIN EN 26891 definiert die Höchstlast als diejenige Last, die vor oder bei einer Verschiebung der Verbindung in Kraftrichtung von 15 mm gemessen wird. Diese Kraft ist in den folgenden Tabellen wiedergegeben.

5.2.1 Versuchsergebnisse und Beobachtungen

5.2.1.1 Ergebnisse Balkenschuhe

Die aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang 11.6.1 dargestellt. Die daraus entnommenen Kraftwerte bei Relativverschiebungen von 15 mm wurden auf die Kraft in der Verbindung umgerechnet (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) und sind in den folgenden Tabellen wiedergegeben. Die jeweils zweite Spalte der Tabellen enthält die rechnerische charakteristische Bruchlast auf Basis der jeweils vorher bestimmten Rohdichten des Holzes. In der rechten Spalte der Tabellen ist der jeweils aus den einzelnen Versuchswerten ermittelte charakteristische Tragfähigkeitswert enthalten.

Tabelle 5-5: Querkrafttragfähigkeit Balkenschuhe Serie B1 (bei 15 mm Verformung)

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
B1-1	45,6	38,3	
B1-2	49,4	38,0	
B1-3	44,7	41,1	
Mittelwert	46,6	39,1	38,7
Standardabweichung	2,5		
Varianz	6,2		

Tabelle 5-6: Querkrafttragfähigkeit Balkenschuhe Serie B2 (bei 15 mm Verformung)

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
B2-1	(95,7)	95,3	
B2-2	(85,8)	94,9	
B2-3	(100,2)	96,2	
B2-4	118,2	97,8	
Mittelwert	(118,2)	96,1	(-)

Tabelle 5-7: Querkrafttragfähigkeit Balkenschuhe Serie B3 (bei 15 mm Verformung)

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
B3-1	(86,8)	83,2	
B3-2	94,5	83,0	
B3-3	(89,5)	83,5	
B3-4	93,1	79,1	
Mittelwert	(93,8)	82,2	(-)

Tabelle 5-8: Querkrafttragfähigkeit Balkenschuhe Serie B4 (bei 15 mm Verformung)

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
B4-1	(76,5)	72,7	
B4-2	87,3	70,5	
B4-3	80,9	72,1	
Mittelwert	(85,9)	71,8	(-)

Bei den Versuchsserien B2, B3, B4 ist folgende Problematik in der Ausführung aufgetreten: Bereits vor dem Versagen der Verbindung kam es zu Versagenszuständen im Nebenträger, insbesondere durch Überschreiten der Biegefestigkeit oder der Querdruckfestigkeit an der Lasteinleitung. Die Messwerte waren daher nicht verwertbar, sie sind in den obenstehenden Tabellen durch in Klammern gesetzte Werte gekennzeichnet. Im Falle der Serie B2 und B3 wurde nachträglich noch je ein Versuch durchgeführt mit doppelter Nebenträgerhöhe und einer Querdruckverstärkung im Lasteinleitungsbereich. Hierbei konnten sehr gut aussagefähige Messwerte ermittelt und ein Versagen im Verbindungsbereich herbeigeführt werden (vgl. Abbildung 5-8, Abbildung 5-9). Für die Versuchsserien B2, B3, B4 konnte aufgrund des Verhaltens der Versuchskörper kein statistisch abgesicherter charakteristischer Wert der Tragfähigkeit bestimmt werden. Um verlässliche Daten zu erzeugen, müssten die Versuche unter Verwendung angepasster Versuchskörper wiederholt werden. Da für die Beurteilung der Brandtragfähigkeit die rechnerischen charakteristischen Werte herangezogen werden, wurde darauf verzichtet.

Es ist festzustellen, dass die Tragfähigkeit der Balkenschuhverbindungen im Vergleich zu der Tragfähigkeit der angeschlossenen Querschnitte sehr hoch ist. Für den Großteil der praktischen Anwendungen werden daher die maximalen Tragfähigkeiten der Balkenschuhe nicht erreicht, bzw. ausgenutzt.

Alle Balkenschuhverbindungen weisen wie erwartet ein ausgeprägt duktileres Tragverhalten auf. Auch nach dem Erreichen der normativ als Grenzwert vorgegeben 15 mm Relativver-

schiebung waren teilweise noch deutliche Tragfähigkeitsreserven vorhanden (Nr. B2-4 und B3-4).

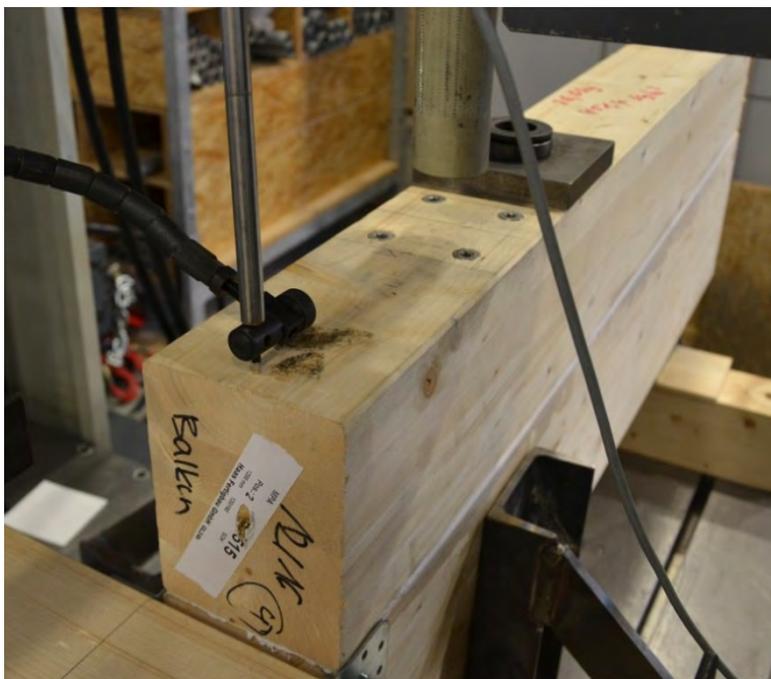


Abbildung 5-8: Prüfung einer Balkenschuhverbindung (B3) mit doppelter Querschnittshöhe des Nebenträgers und zusätzlicher Querdruckverstärkung (vier Vollgewinde-Schrauben an der Lasteinleitungsstelle)



Abbildung 5-9: Bruchbild des Versuchskörpers B2-4 nach 15 mm Relativverschiebung



Abbildung 5-10: Versagensbilder von Balkenschuhverbindungen, Serie B1. Bei dem vorderen Prüfkörper ist ein Versagen der Verbindung nach Aufreißen des Bleches zu erkennen, bei dem in Bildmitte erkennbaren Bauteil trat Versagen durch Überschreiten der Biegefestigkeit im Lasteinleitungsbereich auf.

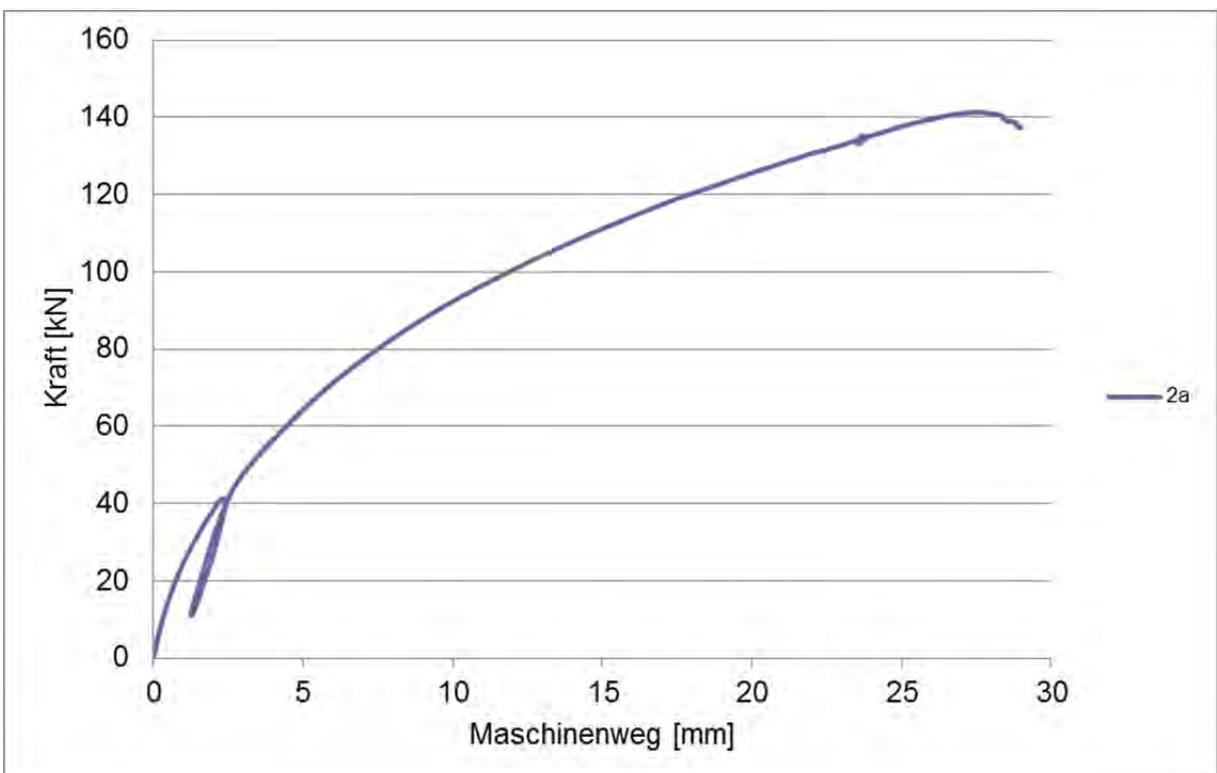


Abbildung 5-11: Typischer Kraft-Weg-Verlauf einer Balkenschuhverbindung.

5.2.1.1 Ergebnisse Vollgewindeschrauben

Die aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang 11.6.2 dargestellt. Die daraus entnommenen Zylinderkraftwerte wurden mit den Faktor 0,737 multipliziert, um die entsprechende Querkrafttragfähigkeit zu erhalten, und sind in den folgenden Tabellen wiedergegeben. Die jeweils zweite Spalte der Tabellen enthält die rechnerische charakteristische Bruchlast auf Basis der jeweils vorher bestimmten Rohdichten des Holzes. Die Ermittlung von $F_{k,Rechnung}$ erfolgte unter Verwendung der in der Zulassung Z-9.1-519 angegebenen Bemessungsformeln, siehe auch Abschnitt 2.2.3.1. In der rechten Spalte der Tabellen ist der jeweils aus den einzelnen Versuchswerten ermittelte charakteristische Tragfähigkeitswert enthalten.

Tabelle 5-9: Querkrafttragfähigkeit der Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 6 mm und der Länge von 180 mm

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
S3-1	17,4	14,4	
S3-2	19,9	13,5	
S3-3	17,6	13,7	
Mittelwert	18,3	13,9	13,9
Standardabweichung	1,4		
Varianz	2,0		

Tabelle 5-10: Querkrafttragfähigkeit der Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 12 mm und der Länge von 350 mm

Nr.	R_{Versuch} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	$R_{k, \text{Versuch}}$ [kN]
S4-1	43,5	46,0	
S4-2	48,6	46,0	
S4-3	47,9	45,2	
Mittelwert	46,7	45,7	38,0
Standardabweichung	2,8		
Varianz	7,8		

Bei der Gegenüberstellung der charakteristischen Werte der Verbindung mit dem Durchmesser von 6 mm und einer Länge von 180 mm aus den Versuchen mit den Werten nach Berechnung wird deutlich, dass die Versuchswerte in etwa den berechneten Werten entsprechen.

Beim Vergleich des aus den Versuchen ermittelten charakteristischen Wertes für Schrauben des Durchmessers von 12 mm und der Länge von 350 mm mit dem charakteristischen Wert der Berechnung wird ersichtlich, dass die Versuchswerte sich um den Faktor 0,83 von den Rechenwerten unterscheiden. Diese Abweichung ist vermutlich auf die geringe Anzahl der Proben zurückzuführen. Schon bei geringen Abweichungen des Einschraubwinkels beim Einbau kann zu deutlich niedrigeren Ausziehfestigkeiten führen. Dieser Effekt könnte ebenfalls die Ursache der Abweichungen zwischen Berechnung und Versuch erklären.

In allen Versuchen war nach Erreichen der maximal aufnehmbaren Querkraft der Verbindung ein Ausziehen der Vollgewindeschraube, die über den Hauptträger eingeschraubt wurde, aus dem Nebenträger zu beobachten. In der Schraube die über den Nebenträger eingedreht wurde (Druckschraube), war eine Biegung der Schraube in der Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger zu erkennen (siehe Abbildung 5-12). Die Verbindung zeigte wie erwartet kaum Duktilität auf.



Abbildung 5-12: Versagensbild der Haupt-Nebenträgerverbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben

5.3 Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall

5.3.1 Versuchskonzept

5.3.1.1 Möglichkeiten der Lastaufbringung

Für die Versuchsplanung der belasteten Brandversuche war es u. a. notwendig, den Versuchsablauf hinsichtlich der Lastaufbringung festzulegen. Es bestehen grundsätzlich zwei mögliche Varianten:

- 1) Es wird eine Last aufgebracht und kraftgesteuert über die Versuchszeit konstant gehalten. Der Versuch endet, wenn der Prüfkörper infolge der Brandeinwirkung die Last nicht mehr aufnehmen kann und deswegen versagt. Je nach Höhe des gewählten Lastniveaus ist dies bei sonst gleichen Randbedingungen zu unterschiedlichen Zeiten

der Fall. Übliche Werte für das Lastniveau bewegen sich zwischen 15 % und 40 % der jeweiligen charakteristischen Tragfähigkeit im Kaltzustand [11]. Ergebnis des Versuchs ist die Zeit, die der Prüfkörper unter Brandeinwirkung eine bestimmte Last aufnehmen kann.

- 2) Es wird eine Vorlast aufgebracht und kraftgesteuert über die erforderliche Zeit der Feuerwiderstandsdauer konstant gehalten. Diese Vorlast liegt unter der erwarteten Tragfähigkeit nach Ablauf der jeweiligen Brandeinwirkungsdauer. Am Ende der Prüfzeit wird die Last in Anlehnung an DIN EN 26891 bis zum Bruch gesteigert und dabei die Kraft aufgezeichnet. Ergebnis des Versuchs ist der Mittelwert der Tragfähigkeit nach einer bestimmten Brandeinwirkungsdauer.

Bei Variante 1) besteht der Nachteil, dass die tatsächlich zur angestrebten Brandeinwirkungsdauer aufnehmbare Kraft nicht bestimmt werden kann. Es kann lediglich der Nachweis geführt werden, dass eine vorher gewählte konstante Belastung aufnehmbar ist. In wie weit sich diese von der maximal aufnehmbaren Belastung zum Klassifikationszeitpunkt der standardisierten Feuerwiderstandsdauer unterscheidet, bleibt jedoch unklar.

Je nach Verbindungstyp sind unterschiedliche aufnehmbare Lastniveaus nach der Brandeinwirkung zu erwarten (z. B. verhalten sich Typen mit verdeckten Verbindungsbauteilen anders als solche mit freiliegenden Verbindungsbauteilen). Es ist daher schwer vorausszusagen, welches Lastniveau möglichst genau mit der geprüften Feuerwiderstandsdauer (i. d. R. 30 oder 60 Minuten) zusammentrifft.

Ein Vorteil dieser Methode liegt darin, dass mit einer konstanten Kraft gearbeitet wird, und daher die technische Einrichtung zur Belastung und Messung einfacher gestaltet werden kann (z. B. durch Verwendung von Gewichten anstelle von hydraulischen Prüfzylindern).

Variante 2) ermöglicht die genaue Bestimmung der Beanspruchbarkeit nach der angestrebten Brandeinwirkungsdauer. Mit diesen so gewonnenen Werten lassen sich auf einfache Weise „Reduktionsfaktoren“ zur Ermittlung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung gegenüber der Tragfähigkeit unter Normaltemperatur bestimmen. Für den Versuchsaufbau ist eine Belastungseinrichtung mit kraftgesteuerter Lastaufbringung erforderlich. Außerdem müssen jeweils geeignete Werte für die Höhe der Vorlast und die Belastungsgeschwindigkeit nach Erreichen der Klassifikationszeit gewählt werden. Die Belastungsgeschwindigkeit sollte so gewählt werden, dass das Versagen der Verbindung in möglichst kurzer Zeit nach Erreichen der Klassifikationszeit eintritt.

5.3.1.2 Gewähltes Verfahren

Für die Durchführung der belasteten Brandversuche wurde die oben beschriebene Variante 2) ausgewählt. Es wurden die folgenden Eckdaten der Art der Lastaufbringung ausgewählt, bzw. festgelegt:

Balkenschuhe

Nach Auswertung der Literatur ([37], [36], [38], [18], [19], [27]) war eine Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung der Balkenschuhverbindungen nach 30 min Brandeinwirkung in Höhe von 30 % bis 40 % der charakteristischen Kalttragfähigkeit zu erwarten.

Das Lastniveau der Vorlast wurde mit dem 0,4-fachen dieses Wertes festgelegt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde in Anlehnung an EN 26891 mit 20 % der erwarteten Tragfähigkeit pro Minute gewählt. Somit ist das Versagen der Verbindung i.d.R. zwei Minuten nach Beginn der Laststeigerung zu erwarten. Es wurde weiterhin vereinbart, die Laststeigerung eine Minute vor Ablauf der Prüfzeit zu beginnen, so dass der erwartete Zeitpunkt des Versagens i.d.R. eine Minute nach Ablauf der Klassifikationszeit liegt.

Schraubenverbindungen

Nach Abschätzung aufgrund der Vorversuche und der ermittelten temperaturabhängigen Auszugsparameter (vgl. Abschnitt 3 und 4.3.2) liegt die erwartete Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung nach 30 oder 60 Minuten bei 50 % bis 60 % der charakteristischen Tragfähigkeit unter Normaltemperatur.

Das Vorlastniveau wurde wie bei den Balkenschuhen mit dem 0,4-fachen dieses Wertes gewählt, die Belastungsgeschwindigkeit und der Zeitpunkt des Beginns der Laststeigerung ebenso.

5.3.2 Versuchsaufbau- und Versuchsdurchführung

5.3.2.1 Aufbau des Prüfofens

Die Brandprüfungen wurden in einem kombinierten Wand-Deckenprüfofen mit Belastungseinrichtung durchgeführt. Die Durchführung der Versuche erfolgte an der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH. In den Wänden des Prüfofens waren Fenster eingebaut, durch die eine Beobachtung der Verbindungen während der Brandprüfung möglich war.

Die T-förmigen Prüfkörper wurden an den Auflagerpunkten der Hauptträger und Nebenträger gabelgelagert in den Prüföfen eingebaut. Die Belastung erfolgte durch eine kraftgesteuerte hydraulische Belastungseinrichtung über einen Druckstempel von oben. Die Nebenträgerbauteile wurden im Bereich der Auflagerung und der Lasteinleitung durch den Druckstempel durch 18 mm Gipskartonfeuerschutzplatten vor Brandeinwirkung an bestimmten Bereichen geschützt.

Die Nebenträger waren einheitlich 1200 mm lang, die Hauptträger 2000 mm. Die Querschnitte hatten unterschiedliche Abmessungen für die jeweiligen Versuche bzw. untersuchten Verbindungstypen (vgl. Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4).

Hinweise zu detaillierten Angaben zum Versuchsaufbau und der Durchführung finden sich im Prüfbericht [57], [58].

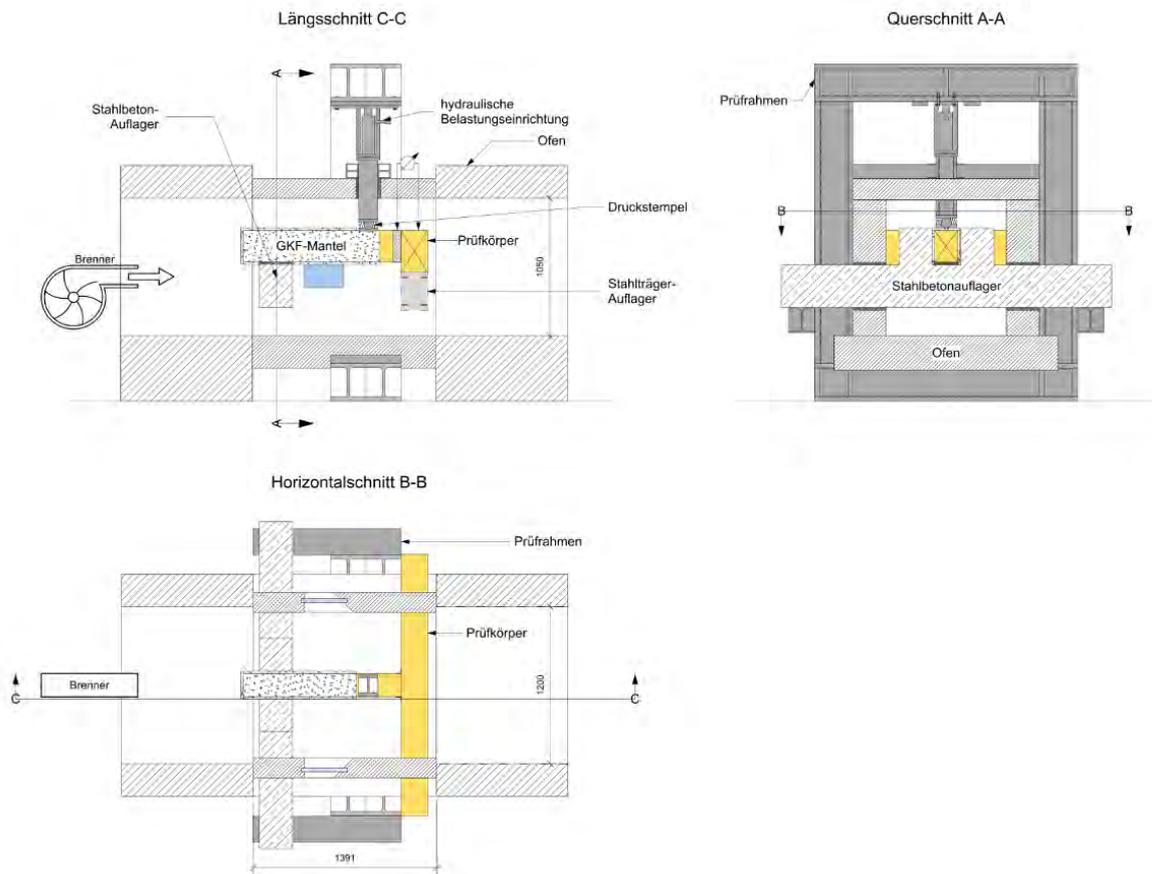


Abbildung 5-13: Zeichnung des Prüfofens mit Belastungsrahmen und eingebautem Prüfkörper (gelb dargestellt).

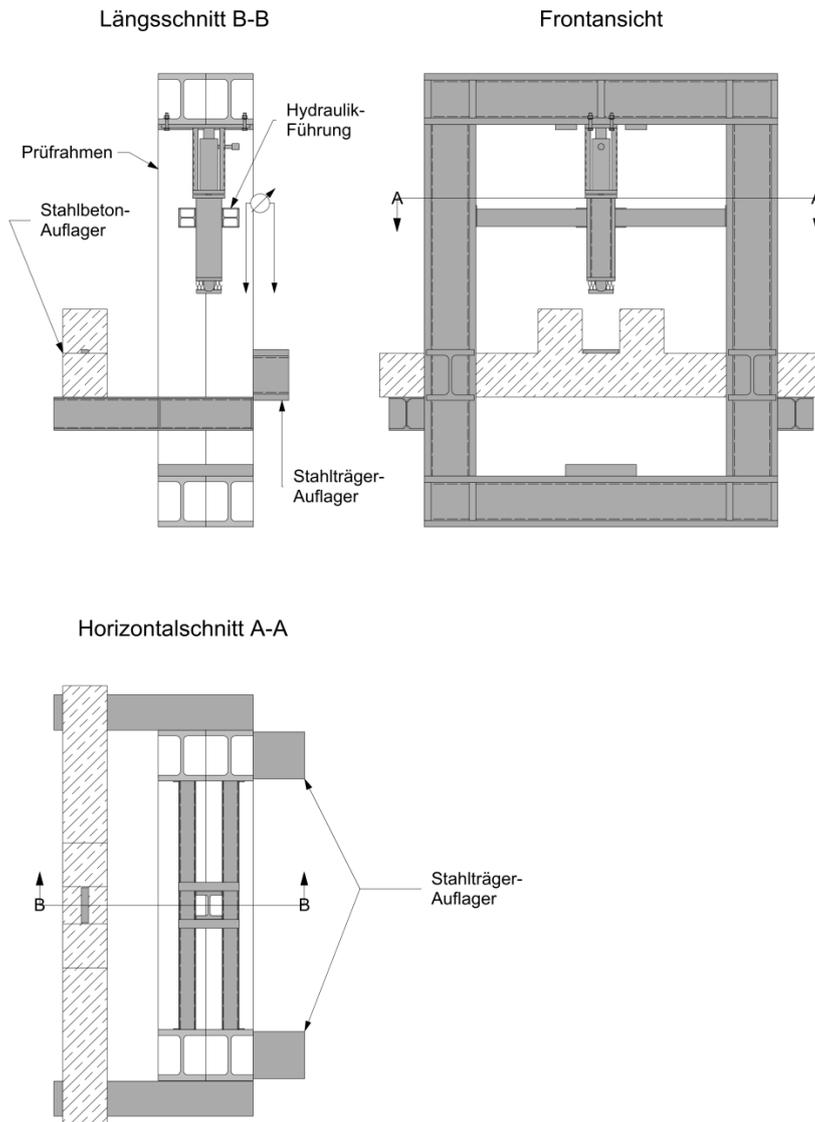


Abbildung 5-14: Zeichnung des Belastungsrahmens mit Hydraulikzylinder und Wegmessenrichtung. Das Auflager des Nebenträgers wurde über den Quer im Ofen eingebauten Betonbalken realisiert, das Auflager des Hauptträgers über die an den Grundrahmen angeschweißten Knaggen (vgl. auch Abbildung 5-13).



Abbildung 5-15: Gesamtansicht des Versuchstandes

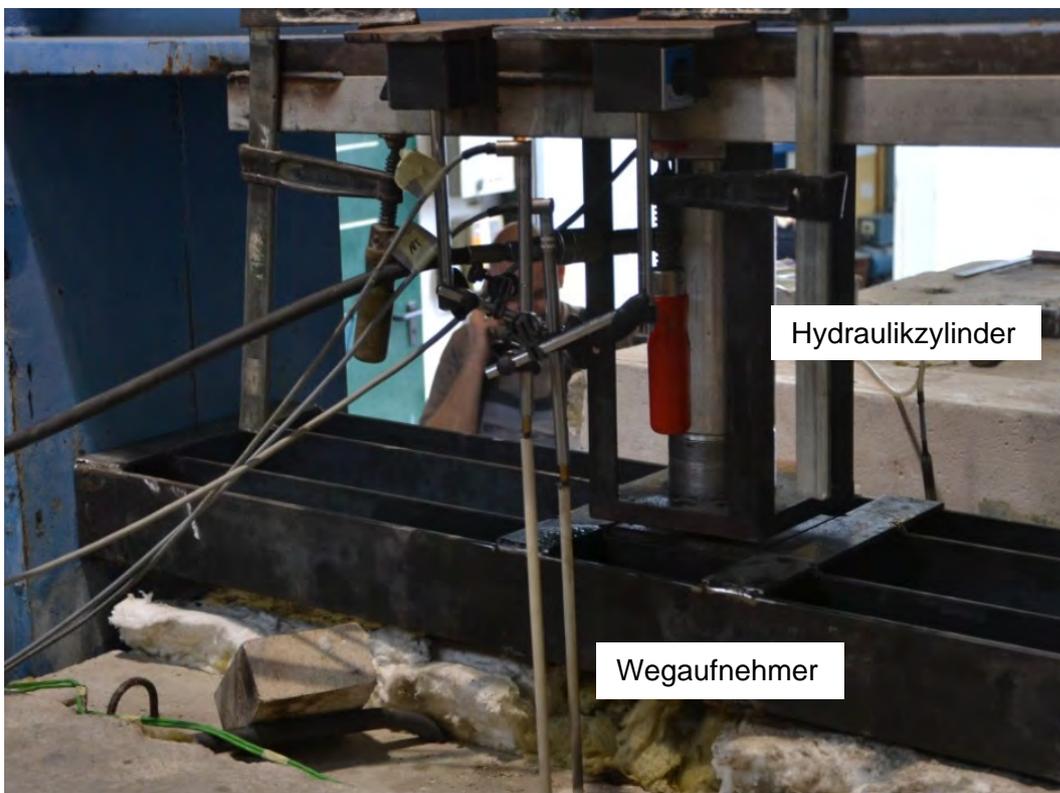


Abbildung 5-16: Hydraulikzylinder im Belastungsrahmen



Abbildung 5-17: In Ofen eingebauter Prüfkörper mit Lasteinleitungsplatte. Die Ofendecke, der Druckstempel zur Lasteinleitung und die Einrichtung zur Wegmessung sind noch nicht montiert.

5.3.2.2 Eigenschaften der Prüfkörper

Die Nebenträgerquerschnitte wurden durch angeschraubte Gipskartonfeuerschutzplatten teilweise vor Abbrand geschützt. Die Anbringung der Platten erfolgte im Bereich der Lasteinleitung sowie des hinteren Auflagers mit dem Zweck, ein Versagen des Holzquerschnittes vor dem Versagen der Verbindung sicher auszuschließen. Der Verbindungsbereich war bei allen Versuchskörpern ungeschützt ausgeführt und frei von schützenden Einflüssen aus den angrenzenden Bereichen.

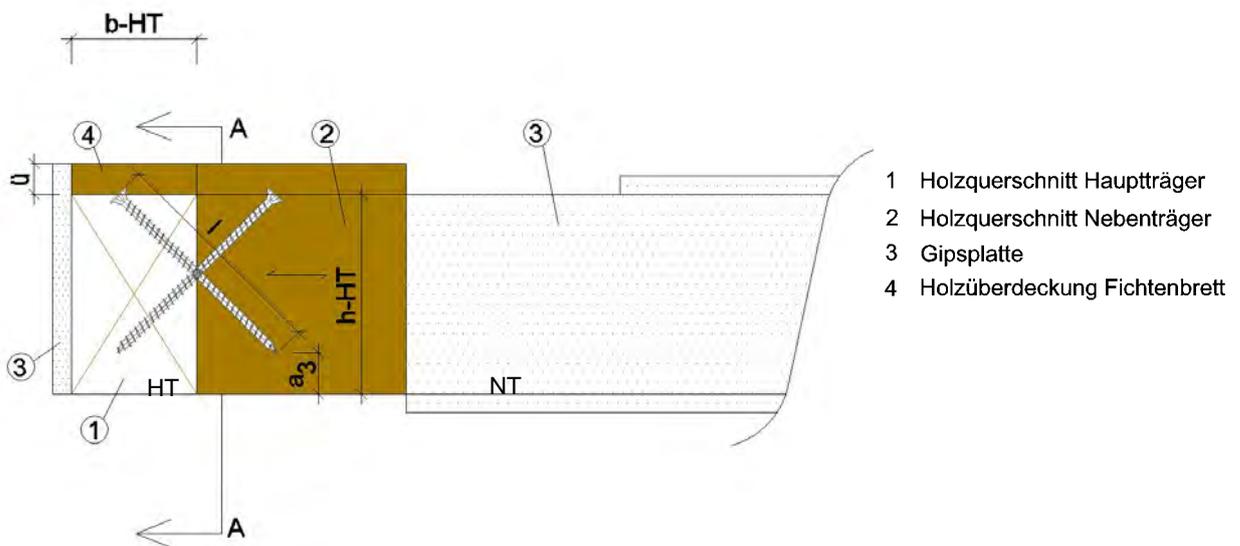
Die Abmessungen und Rohdichten der Prüfkörper sind aus Tabelle 5-2 zu entnehmen. Es wurden die folgenden Versuche durchgeführt:

Tabelle 5-11: Bezeichnung der Balkenschuhprüfkörper

Nr.	Typ der Balkenschuhe	Verbindungsmittel	Verbindungsmittelanordnung
B1	Typ 04/2 außen	Rillennägel 4 x 60 mm	voll nach ETA [50]
B2	Typ 05/2 außen	Schrauben 5 x 60 mm	voll nach ETA
B3	Typ 05/2 außen	Schrauben 5 x 70 mm	voll nach ETA
B3a	Typ 05/2 außen	Schrauben 5 x 70 mm	alle Löcher verwendet
B4	Typ 05/2 außen	Rillennägel 4 x 75 mm	alle Löcher verwendet

Tabelle 5-12: Bezeichnung der Prüfkörper mit Vollgewindeschrauben

Nr.	Vollgewindeschrauben d x l	Überdeckung ü des Schraubenkopfes	$a_{4,c}$ [mm]	a_3 [mm]
S1	6 x 180 mm	Ja, durch 25 mm Vollholzbrett	36	33
S2	6 x 180 mm	Ja, durch 25 mm Vollholzbrett und 15 mm Gipskartonplatte	64	61
S3	6 x 180 mm	Ja, durch 25 mm Vollholzbrett	32	29
S4	12 x 350 mm	nein	73	67



Schnitt A-A:

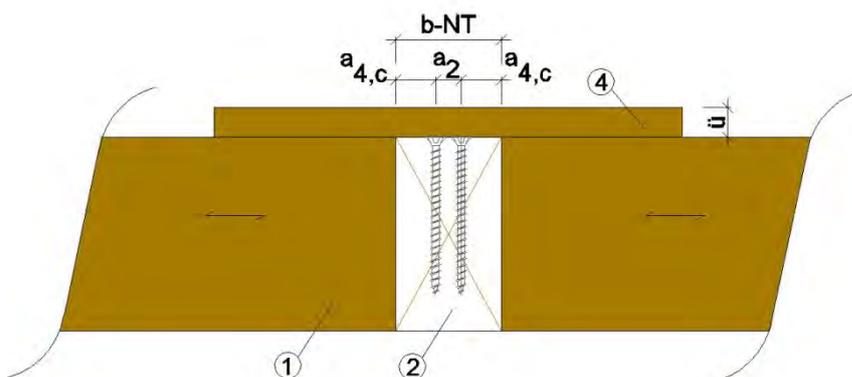


Abbildung 5-18: Haupt-Nebenträger-Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben und Abdeckung des Schraubenkopfes

5.3.2.3 Anordnung der Temperaturmessstellen in den Prüfkörpern

Zur Beurteilung der Temperaturen an den Verbindungen wurden die Prüfkörper an ausgewählten Stellen mit Thermoelementen versehen. So wurden die Temperaturen zwischen den Balkenschuhstegen und dem Hauptträger auf halber Höhe gemessen. Zusätzlich wurde die

Temperatur in der Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger aufgezeichnet, um den Einfluss des Spaltes nachvollziehen zu können.

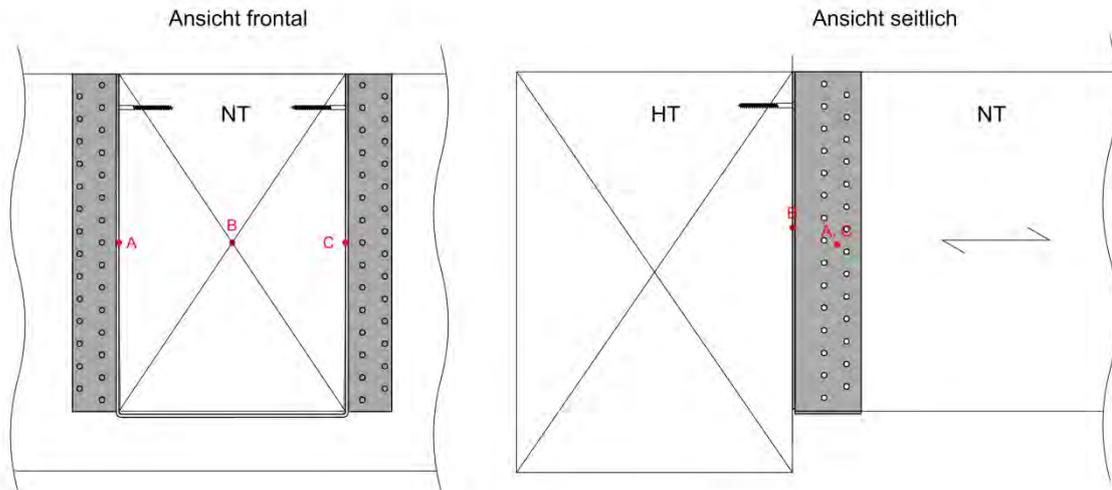
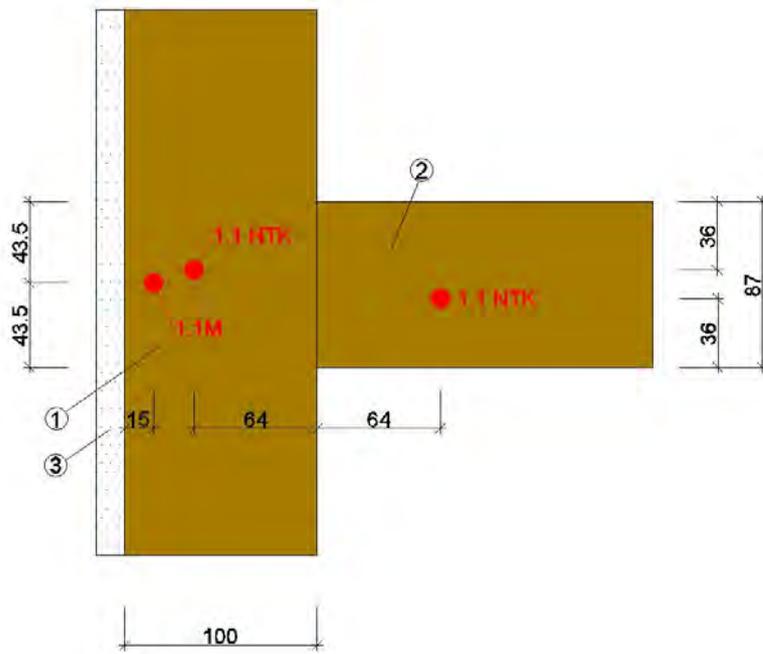


Abbildung 5-19: Messstellen an den belasteten Balkenschuhen

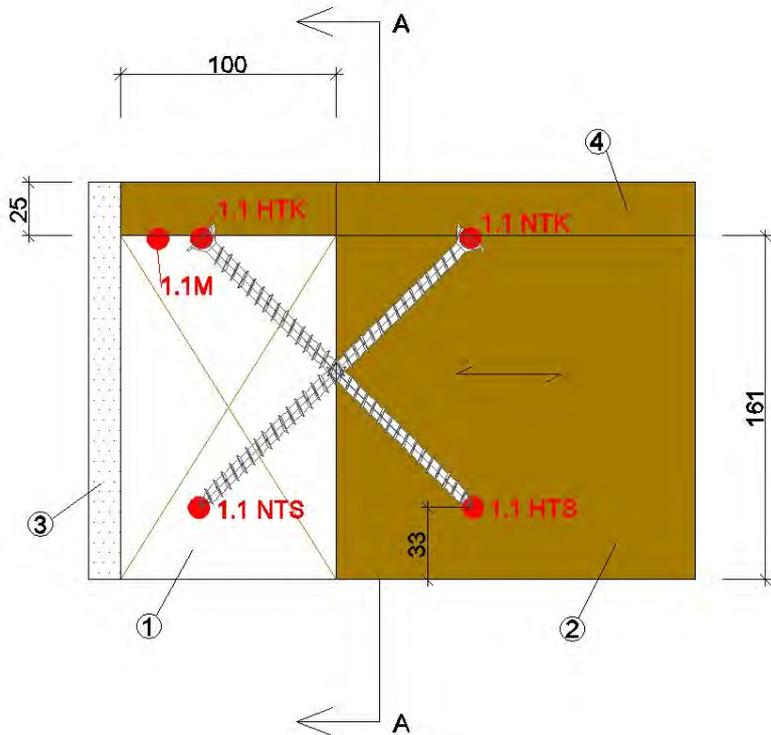
Die Ermittlung der Temperaturen an den Vollgewindeschrauben erfolgte an zusätzlichen Prüfkörpern im Brandofen. Der Grund dafür lag in der Vermeidung einer möglichen Reduktion des Auszieh Widerstandes an den belasteten Prüfkörpern. Die zusätzlichen Prüfkörper verfügten über identische Querschnitte, Anordnungen der Schrauben und Schutzmaßnahmen wie die entsprechenden belasteten Prüfkörper und erhielten die Bezeichnungen S 1.1; S 2.1; S 3.1 und S 4.1. Einziger Unterschied lag in einer auf 300 mm verkürzten Länge des Hauptträgers und des Nebenträgers (siehe Abbildung 5-17). Über Thermoelemente, die an gleicher Stelle am belasteten und unbelasteten Prüfkörper angebracht wurden (1M und 1.1 M), konnte ein Vergleich des Temperaturverlaufs zwischen beiden Prüfkörpern erfolgen. Ferner wurden die einwirkenden Ofentemperaturen am unbelasteten Prüfkörper durch Mantelthermoelemente überprüft, die etwa 100 cm entfernt von der Fuge auf beiden Seiten des Nebenträgers angebracht wurden. Diese Werte wurden den Mantel- und Ofenthermoelementen des belasteten Prüfkörpers gegenübergestellt, um Rückschlüsse auf eventuelle Unterschiede in der Temperaturbeanspruchung ziehen zu können.

Draufsicht unbelasteter Prüfkörper S1.1:



- 1 Holzquerschnitt Hauptträger
- 2 Holzquerschnitt Nebenträger
- 3 Gipsplatte

Seitenansicht (mit angedeuteten Schrauben):



Schnitt A-A:

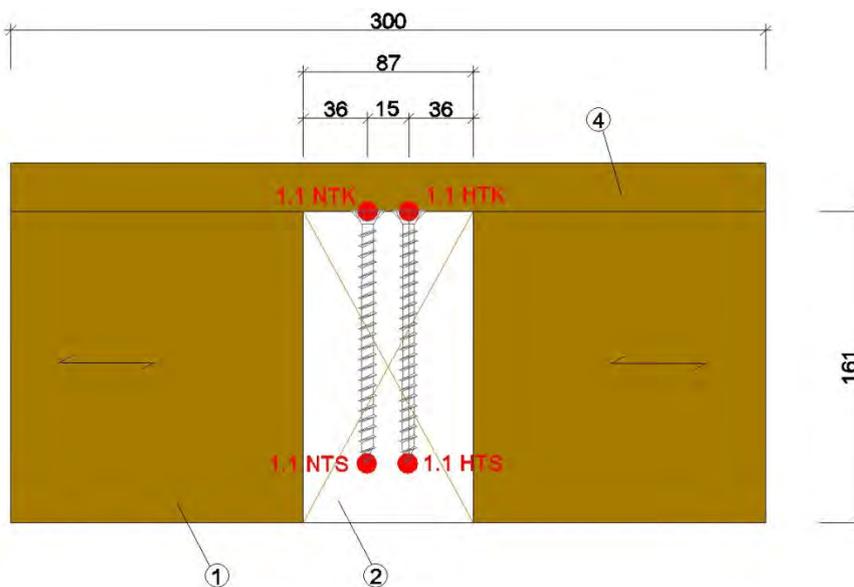


Abbildung 5-20: Messstellen an Prüfkörper S 1.1

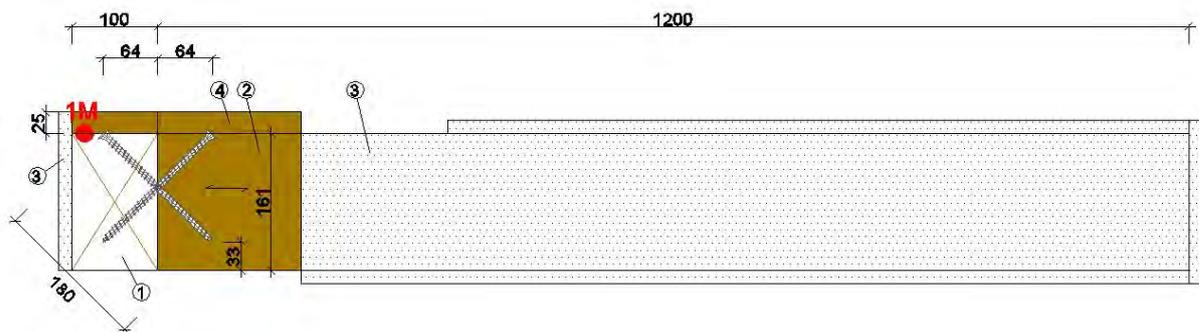


Abbildung 5-21: Abbildung des Messelementes am belasteten Prüfkörper zum Vergleich der Temperaturen zwischen S1 und S1.1

Die Anordnung der Thermoelemente an weiteren Versuchskörpern erfolgt in gleicher Weise wie bei Versuchskörper S1 und S1.1.

5.3.2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Die Prüfkörper wurden am MPA BAU der TU München gefertigt und in der Brandprüfstelle von den dortigen Facharbeitern in Zusammenarbeit mit den Projektbearbeitern in den Prüfofen eingebaut. Der Ofen wurde mit Ölbrennern beheizt, die Temperaturregelung erfolgte manuell über die Regelung der Brennerleistung. Als Zeit-Temperatur-Kurve wurde die ETK nach DIN EN 1363-1 verwendet. Die Dauer der Brandeinwirkung betrug je nach Versuchskörpertyp 30 oder 60 Minuten.

Die Versuchsdurchführung erfolge für alle Versuchskörper nach dem gleichen Ablauf:

- 1) Montage des Prüfkörpers, Anschluss der Thermoelemente wo zutreffend
- 2) Aufbringen einer Vorlast von 40 % der erwarteten Tragfähigkeit nach Brandeinwirkung. ($F_{\text{vor, Zylinder}}$ [kN]), Last konstant halten
- 3) Start des Brenners, 29 bzw. 59 min Brandeinwirkung nach ETK bei konstanter Last (kraftgesteuert), Beginn der Wegmessung, Beginn der Temperaturlaufzeichnung
- 4) Eine Minute vor Ablauf der Brandeinwirkungsdauer Beginn der Laststeigerung. Belastungsgeschwindigkeit gemäß DIN EN 26891 mit 20 % der erwarteten Tragfähigkeit ($F_{\text{Zylinder, Fi}}$) pro Minute; Wegmessung und Aufzeichnung über der Maschinenkraft
- 5) Voraussichtlich eine Minute nach Ende der Brandeinwirkung: Versagen der Verbindung, Versuchsende. Möglichst schnelles Ablöschen der Versuchskörper, Ausbau aus dem Ofen, Lagerung der Prüfkörper zur weiteren Untersuchung und Begutachtung

5.3.3 Versuchsergebnisse und Beobachtungen Balkenschuhe

5.3.3.1 Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten

Das typische Versagensverhalten der Balkenschuhverbindungen unter Brandeinwirkung kann wie folgt beschrieben werden:

- Wenige Minuten nach Beginn der Brandeinwirkung trat eine zunehmende Verformung ein. Nach den ersten ca. 15 Minuten wuchs die Verformungsgeschwindigkeit merklich an (vgl. Abbildung 5-22).
- Gegen Ende der Versuchszeit, jedoch noch vor Beginn der Laststeigerung wiesen alle untersuchten Verbindungstypen Relativverschiebungen in der Größenordnung von 30 mm auf.
- Der Bruch der Verbindung trat in allen Fällen bei hohen Relativverschiebungen von über 40 mm ein. Teilweise konnten die Verschiebungen dabei nicht mehr vollständig aufgezeichnet werden, da die verwendeten Wegaufnehmer einen Messbereich von 50 mm hatten. Hierbei kam es insbesondere zu starken Verformungen der Verbindungsmittel, welche infolge des Abbrandes des Holzes einen zunehmenden Abstand (in der Größenordnung von 20 mm bis 25 mm) zwischen tragfähigem Rest-Holzquerschnitt und Blechlaschen zu überbrücken haben.

- Es tritt ein ausgeprägter Einhängeeffekt auf, bei dem die Verbindungsmittel nach starker Verformung zunehmend auf Herausziehen anstatt auf Abscheren beansprucht werden.
- Versagen trat durch Herausziehen der Verbindungsmittel im Nebenträger (Versuch B1, B2, B3, B3a) und teilweise auch durch Herausziehen der Verbindungsmittel an oberen Rand des Hauptträgers ein (Versuch B4).
- In einem Fall (Versuchskörper B3a) war zusätzlich ein Schubversagen des Restquerschnittes des Nebenträgers im Anschlussbereich erkennbar.
- Gleichzeitig wurden dabei die Bleche und Verbindungsmittel stark verformt.
- Es kam in keinem Fall zu einem Abreißen des Bleches.

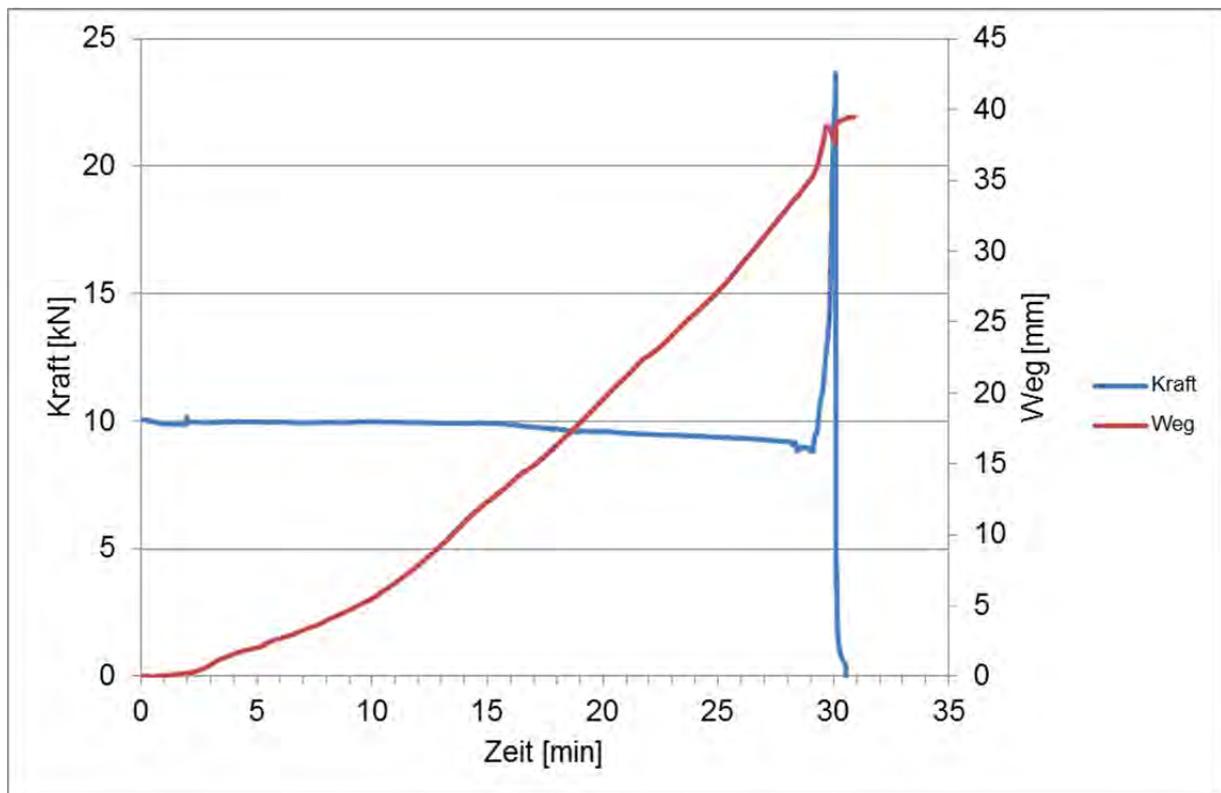


Abbildung 5-22: Typisches Last-Verformungsdiagramm einer Balkenschuhverbindung im Brandversuch. Gut zu erkennen ist die Zunahme der Verformungen während der Versuchszeit unter konstanter Last. (B3 140/200mm², Schrauben 5 x 70mm, Vollausschraubung)



Abbildung 5-23: Ansicht einer Balkenschuhverbindung während des Brandversuchs (Versuchskörper B3a), nach ca. 20 min Brandeinwirkung.



Abbildung 5-24: links: Versuchskörper unmittelbar nach dem Versuchsende und dem Ablöschen sowie Entfernen der Ofendecke und Belastungseinrichtung. rechts: Nach dem Brandversuch abgelöster Balkenschuh. Gut erkennbar ist die starke Verformung des Bleches und der Verbindungsmittel. (Versuchskörper B4).

5.3.3.2 Maximale Beanspruchbarkeiten

Die maximal erreichten Tragfähigkeiten der Balkenschuhverbindungen sind in Tabelle 5-13 zusammengestellt. Die jeweils zugehörigen Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang 11.7.1 enthalten. Die Tabelle enthält zudem die auf Basis der jeweiligen Rohdichten der Haupt- und Nebenträger ermittelten charakteristischen rechnerischen Kalttragfähigkeiten der Verbindungen. Die rechte Spalte enthält das Verhältnis dieser beiden Werte.

Tabelle 5-13: Beanspruchbarkeiten der Balkenschuhverbindungen

Nr.	Branddauer [min]	R_{fi} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	Verhältnis μ_{fi} $R_{fi} / R_{k, \text{Rechnung}}$
B1	30	0	39,9	0
B2	30	7,7	94,6	0,08
B3	30	17,8	85,4	0,21
B3a	30	26,2	79,0	0,33
B4	30	14,9	76,6	0,19

Es zeigt sich deutlich, dass die Versuche B1 und B2 keine nennenswerten (B1) oder nur eine im Verhältnis zur Kalttragfähigkeit sehr geringe Kraft (B2) nach der Brandeinwirkung aufnehmen konnten. Die Versuchsergebnisse B3, B3a und B4 bewegen sich in Bereichen, in denen praktisch sinnvoll anwendbare Resttragfähigkeiten vorhanden sind.

Sehr gut zu erkennen ist, dass Verbindungen mit Rillennägeln (B4) deutlich weniger Resttragfähigkeit als ansonsten baugleiche mit Schrauben (B3a) aufweisen.

Weiterhin ist festzustellen, dass Verbindungen mit der notwendigen Verbindungsmittelzahl nach Zulassung (B3) eine geringere Tragfähigkeit erreichen als solche mit einer vollen Ausnutzung aller vorgestanzten Löcher und damit maximalen Anzahl an Verbindungsmitteln (B3a).

Tabelle 5-14: Beanspruchbarkeiten je Verbindungsmittel im Brandfall und bei Normaltemperatur

Nr.	R_{fi} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	Anzahl Verbindungsmittel n_j	R_{fi}/n_j	$R_{k, \text{Rechnung}}/n_j$
B1	0	39,9	14	0	2,6
B2	7,7	94,6	30	0,02	3,15
B3	17,8	85,4	22	0,81	3,88
B3a	26,2	79,0	38	0,69	2,08
B4	14,9	76,6	38	0,39	2,02

Aus dem Vergleich der erreichten Tragfähigkeiten je Verbindungsmittel (Tabelle 5-14) ergibt sich folgendes:

Die höchste Last je Verbindungsmittel wurde bei Versuch B3 erreicht. Versuch B3a ergab eine deutlich höhere Gesamttragfähigkeit als Versuch B3, je Verbindungsmittel war die Last jedoch etwas niedriger. Dies kann damit begründet werden, dass in Versuch B3a die Tragfähigkeit des Holz-Restquerschnittes erreicht wurde (Schubversagen), während in B3 die Verbindungsmittel selbst versagt haben (Herausziehen).

Unter der Voraussetzung eines ausreichend tragfähigen Restquerschnittes kann von einer maximalen Beanspruchbarkeit von 0,81 kN je Verbindungsmittel (Schraube \varnothing 5 mm x 70 mm) ausgegangen werden.

Die erreichten Resttragfähigkeiten lagen insgesamt eher niedriger als solche aus Literaturangaben. Hierfür kommen vor allem drei Gründe als Erklärung in Betracht:

- Die Art der Lagerung der Versuchskörper war anders ausgeführt als bei älteren Versuchen. Insbesondere bestand durch die hier genutzte längsverschiebliche Lagerung die Möglichkeit, dass die Nebenträger schräg nach unten aus den Balkenschuhen herausrutschen konnten. Dies war in Prüfungen aus der Literatur bisher oft nicht der Fall, da eine längs unverschiebliche Lagerung gewählt wurde.
- Der Spalt zwischen Haupt- und Nebenträger betrug 4 mm, es lag daher eine Temperatureinwirkung an der Stirnfläche des Nebenträgers vor. Dies wurde in älteren Versuchen oft anders ausgeführt, indem spaltlose Konstruktionen gewählt wurden.
- Es ist denkbar, dass die Einbausituation, Strömungsgeschwindigkeit der Brandgase sowie die Sauerstoffkonzentration im Prüfofen die Beanspruchung der Prüfkörper beeinflusst, obwohl die Einheits-Temperatur-Zeitkurve eingehalten wird. Der Einbau der Versuchskörper im Prüfofen war so gewählt, dass die Prüfkörper allseits frei von den Heizgasen umströmt wurden. Es herrschte im Ofen eine starke Strömung der Brandgase.

5.3.3.3 Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern

Die Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang 11.7.1 enthalten, Bilder der Versuchskörper befinden sich in Abschnitt 11.5.1.

Versuch B1

Dieser Versuchskörpertyp erreichte keine rechnerisch ansetzbare Resttragfähigkeit. Es musste bereits während der Versuchsdauer mehrfach die Last reduziert werden, um ein vorzeitiges Versagen zu vermeiden. Versagen trat auf durch Herausrutschen des NT-Restquerschnittes nach schräg unten bei gleichzeitigem Herausziehen der Verbindungsmittel. Die Resttragfähigkeit am HT war sehr gering, der Balkenschuh ließ sich nach Versuchsende zusammen mit den Verbindungsmitteln leicht mit geringer Handkraft vom Holz ablösen. Die Restquerschnittsbreite im Anschlussbereich betrug ca. 45 mm.

Versuch B2

Auch bei diesem Versuchskörper musste mehrfach während der Versuchszeit die Last reduziert werden, es war aber eine – wenn auch geringe – Resttragfähigkeit vorhanden. Die

Restquerschnittsbreite im Anschlussbereich betrug ca. 50 mm. Versagen trat durch Herausrutschen des Nebenträgers schräg nach unten und gleichzeitigem Herausziehen der Verbindungsmittel ein. Der Balkenschuh wurde am HT nur wenig verformt und hatte an diesem Anschluss noch eine hohe Resttragfähigkeit.

Versuch B3

Die Last wurde über die Versuchszeit konstant gehalten und am Ende planmäßig gesteigert. Versagen trat durch Herausrutschen des Nebenträgers schräg nach unten und gleichzeitigem Herausziehen der Verbindungsmittel ein. Der Balkenschuh und die Verbindungsmittel wurden hierbei erheblich verformt. Der Balkenschuh hatte am Anschluss zum Hauptträger noch eine hohe Resttragfähigkeit. Die Restquerschnittsbreite im Anschlussbereich betrug trotz höherer Verbindungsmittellanzahl ca. 80 mm.

Versuch B3a

Die Last wurde über die Versuchszeit konstant gehalten und am Ende planmäßig gesteigert. Das Versagensverhalten war deutlich unterschiedlich zu den anderen Versuchen: Versagen trat durch Schubversagen des Holzes im Anschlussbereich ein. Das Herausziehen der Verbindungsmittel war sekundär, der Balkenschuh selbst wurde nur relativ wenig verformt. Der Balkenschuh hatte am Anschluss zum HT noch eine hohe Resttragfähigkeit. Die Restquerschnittsbreite im Anschlussbereich betrug ca. 80 mm.

Versuch B4

Die Last wurde über die Versuchszeit konstant gehalten und am Ende planmäßig gesteigert. Versagen trat durch Herausrutschen des Nebenträgers schräg nach unten und gleichzeitigem Herausziehen der Verbindungsmittel ein. Zusätzlich wurden die Verbindungsmittel im oberen Bereich des Balkenschuhs aus dem HT herausgezogen. Die Verformungen des Bleches waren aus diesem Grund erheblich stärker als bei den anderen Versuchen. Die Restquerschnittsbreite im Anschlussbereich betrug ca. 80 mm.

5.3.3.4 Temperaturmessungen

Anhand der Temperaturlaufzeichnungen ist festzustellen, dass unter den Blechlaschen der Nebenträger bei allen Prüfkörpern nahezu einheitlich nach ca. 15 min Temperaturen von rund 600° C aufgetreten sind (vgl. Anhang 11.2.2). Dies stimmt gut mit den Messwerten aus den unbelasteten Vorversuchen (vgl. Anhang 11.2.1) überein und deckt sich auch mit den beobachteten Glühfarben der Bleche. Hierbei ist mit einer Abminderung der Fließgrenze ca. um den Faktor 0,4 zu rechnen. Diese Grenze definiert den oberen Wert der erreichbaren Tragfähigkeit im Brandfall. (vgl. Abbildung 1-8, Abbildung 5-23).

Die Temperaturmessungen in den Fugenspalten zwischen Haupt- und Nebenträger stiegen nach jeweils ca. 15 min signifikant an und erreichten an Ende der Versuchszeit Werte um 600 °C (vgl. Anhang 11.2.2). Dies lässt sich nicht mit den Messungen aus den unbelasteten Brandversuchen in Einklang bringen (vgl. Anhang 11.2.1). Die dort gemessenen Temperaturen waren mit bis zu ca. 150 °C deutlich geringer. Die visuell festgestellten Verfärbungen bzw. Verkohlungen des Holzes an der Schnittfläche der Nebenträger lassen ebenfalls nicht den Schluss zu, dass hier Temperaturen in der Größenordnung von 600 °C vorlagen (vgl. Bilder in Anhang 11.5.1). Es ist daher davon auszugehen, dass hier Messfehler vorliegen. Eine wahrscheinliche Begründung dafür liegt darin, dass die Drähte der Thermoelemente im Brandraum auf ca. 100 mm Länge freilagen und somit direkt der Brandbeanspruchung ausgesetzt wurden.

5.3.4 Versuchsergebnisse und Beobachtungen Vollgewindeschrauben

5.3.4.1 Allgemeine Beobachtungen zum Verformungs- und Versagensverhalten

Das typische Versagensverhalten der Vollgewindeschrauben unter Brandeinwirkung kann wie folgt beschrieben werden:

- Während der Versuche war keine Verformung der Verbindung zu erkennen. Eine Relativverschiebung von ca. 35 mm bis 40 mm setzte erst bei Erreichen der Maximallast ein. Diese Verformung ist auf das Herausziehen bzw. Verformen der Schraube zurückzuführen (vgl. Abbildung 5-25).
- Ausnahme im Verformungsverhalten bildete die Verbindung S2, die 60 Minuten beansprucht wurde. Von der 40. Minute bis zur 60. Minute der Brandbeanspruchung wurde eine Relativverschiebung von 5 mm aufgezeichnet. Die weitere Verschiebung von 40 mm trat erst mit Erreichen der Maximallast ein.
- Versagen trat durch Herausziehen der Vollgewindeschrauben, die über den Hauptträger eingeschraubt wurde, ein. Hierbei war entweder das Herausziehen aus dem Hauptträger oder das Herausziehen aus dem Nebenträger zu beobachten. Die zweite Vollgewindeschraube, die über den Nebenträger eingeschraubt wurde, zeigte eine starke Verformung oder ein Abreißen der Schraube in der Fuge auf.

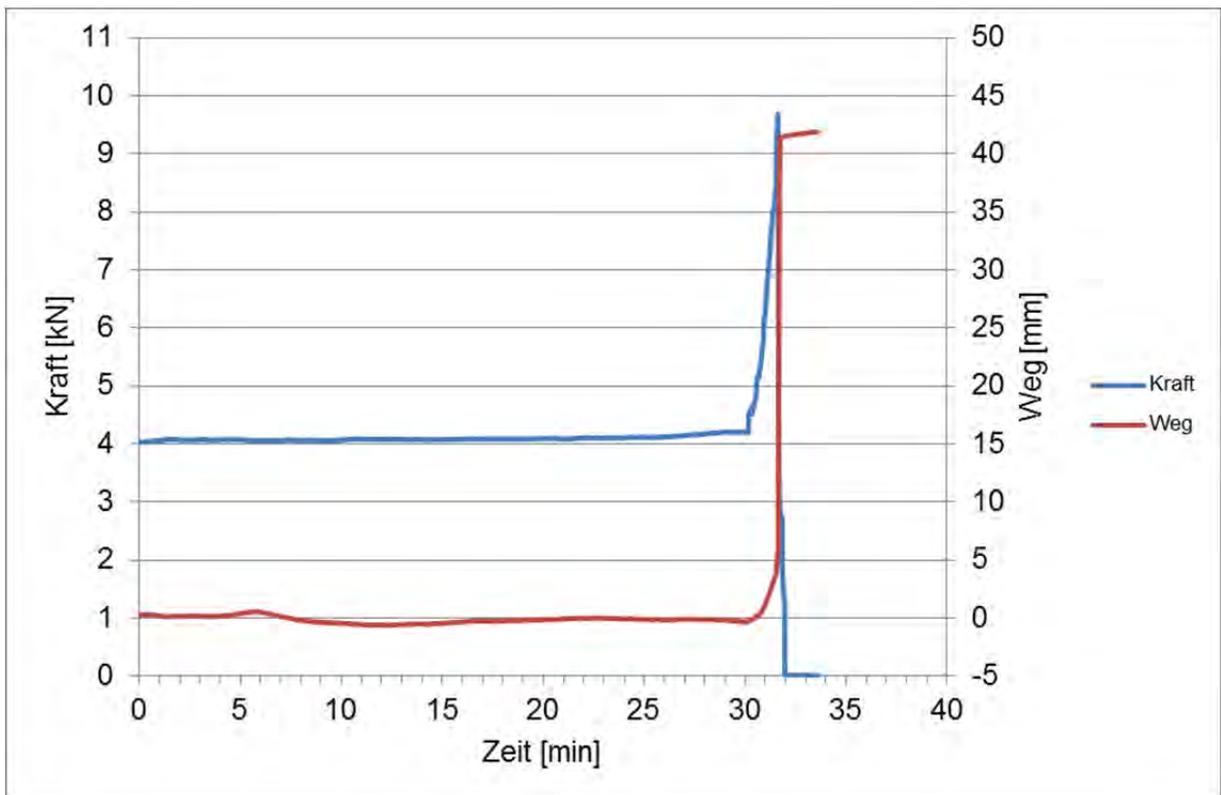


Abbildung 5-25: Kraft-Zeit und Weg-Zeit- Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung S3 mit gekreuzten Vollgewindeschrauben (\varnothing 6 mm, Länge 180 mm, 45°) unter 30 minütiger Brandbeanspruchung



Abbildung 5-26: Ansicht einer Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben während des Brandversuchs (Versuchskörper S3), nach ca. 29 min Brandeinwirkung.



Abbildung 5-27: Versuchskörper unmittelbar nach Erreichen der Maximallast. (Versuchskörper S3). Gut erkennbar ist die Relativverschiebung des Nebenträgers mit einhergehendem Spalt zwischen Haupt- und Nebenträger



Abbildung 5-28: Versuchskörper unmittelbar nach dem Versuchsende und dem Ablöschen sowie Entfernen der Ofendecke und Belastungseinrichtung. (Versuchskörper S4)



Abbildung 5-29: Nach dem Brandversuch herausgezogene Vollgewindeschrauben, Versuchskörper S3.



Abbildung 5-30: Schnitt durch die Längsachse der Schraube, die im Hauptträger eingeschraubt wurde. Versuchs-körper S3. Hierbei wird ersichtlich, dass die Schraube durch das Holz gezogen wurde

5.3.4.2 Maximale Beanspruchbarkeiten

Die maximal erreichte Zylinderkraft in den einzelnen Versuchen wurden um das Eigengewicht des Stempels ($=0,38$ kN bei S4 und $0,47$ kN bei S1,S2 und S3) erhöht und abschließend mit den Faktor $0,737$ multipliziert, um die entsprechende Querkrafttragfähigkeit zu erhalten. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5-15 wiedergegeben. Die dritte Spalte der Tabellen enthält die rechnerische charakteristische Tragfähigkeit auf Basis der jeweils vorher bestimmten Rohdichten der Holzbauteile. Die Berechnung erfolgte unter Verwendung der in der Zulassung Z-9.1-519 angegebenen Bemessungsformeln, siehe auch Abschnitt 2.2.3.1. In der rechten Spalte der Tabellen ist das Verhältnis zwischen im Versuch ermittelter Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der charakteristischen rechnerischen Querkrafttragfähigkeit unter Raumtemperatur aufgeführt.

Die zugehörigen Kraft-Weg-Diagramme sind in Anhang 11.7.2 zu entnehmen.

Tabelle 5-15: maximale Querkrafttragfähigkeit der Verbindung mit Vollgewindeschrauben unter Raumtemperatur und im Brandfall

Nr.	Branddauer [Minuten]	R_{fi} [kN]	$R_{k, \text{Rechnung}}$ [kN]	Verhältnis μ_{fi} R_{fi}/R_k
S1	30	7,21	12,4	0,58
S2	60	5,89	11,6	0,51
S3	30	7,46	12,7	0,59
S4	30	35,20	42,1	0,84

Es zeigt sich deutlich, dass die Versuche S1 und S3 nahezu gleiche Verhältnisse von Querkrafttragfähigkeit im Brandfall F_{fi} zur Kalttragfähigkeit F_k aufweisen.

Durch die reduzierte Holzüberdeckung in S3 wurde mit erhöhten Temperaturen entlang der Verbindung und demzufolge mit einer verringerten Querschnittstragfähigkeit gerechnet. Die gemessenen Temperaturen an den Prüfkörpern zeigen jedoch in beiden Versuchen ähnliche Temperaturen entlang der Schraube. Diese Gegebenheit führt zu gleichen Ausziehungswiderständen der Schrauben in beiden Versuchen und daher zu gleichen Verhältnissen zwischen F_{fi} zu F_k .

Die erreichten Resttragfähigkeiten der Verbindungen S1 und S3 mit geschützten Schraubenköpfen lagen insgesamt höher als vergleichbare Werte, die sich durch die Bemessung nach DIN EN 1995-1-2 ergeben. Bei einer seitlichen Holzüberdeckung von 29 mm bei einer Brandbeanspruchung von 30 Minuten ergibt sich nach DIN EN 1995-1-2 ein Verhältnis von F_{fi}/F_k von 0,50. Im Versuch wurde jedoch ein Verhältnis F_{fi}/F_k von 0,59 erreicht.

Sehr gut zu erkennen ist, dass die Verbindung S2, die 60 Minuten beansprucht wurde, weniger Resttragfähigkeit als Verbindung S1 aufweist, obwohl etwa gleiche Temperaturen entlang der Schraube vorlagen. Im Versuch S2 konnte nur ein Verhältnis F_{fi}/F_k von 0,51 erzielt werden. Bei gleicher seitlicher Holzüberdeckung von 61 mm führt die Bemessung nach DIN EN 1995-1-2 zu einem Verhältnis F_{fi}/F_k von 0,61.

Verbindung S4 weist ein sehr hohes Verhältnis von F_{fi}/F_k auf, was auf die große Länge der Schrauben zurückzuführen ist. Trotz des Eintrags der Wärme über den Kopf konnte die Temperatur über die Länge der Schraube recht gut ins Holz weitergeleitet werden, weshalb über eine große Länge der Schraube große Ausziehungswiderstände vorlagen.

5.3.4.3 Beobachtungen an den einzelnen Versuchskörpern

S1

Dieser Versuchskörpertyp erreichte die erwartete Resttragfähigkeit.

Nach der Laststeigerung setzte eine Relativverschiebung von etwa 7 mm ein. Diese Verschiebung wurde durch das Herausziehen der Vollgewindeschraube verursacht. Diejenige Schraube, die über den Hauptträger eingeschraubt worden war, wurde aus dem Nebenträger gezogen und die Schraube, die über den Nebenträger eingedreht wurde, wurde aus dem Nebenträger gedrückt. Nach der Laststeigerung spaltete sich außerdem der Nebenträger (vgl. Abbildung 5-31).



Abbildung 5-31: Spalten des Nebenträgers (S1)

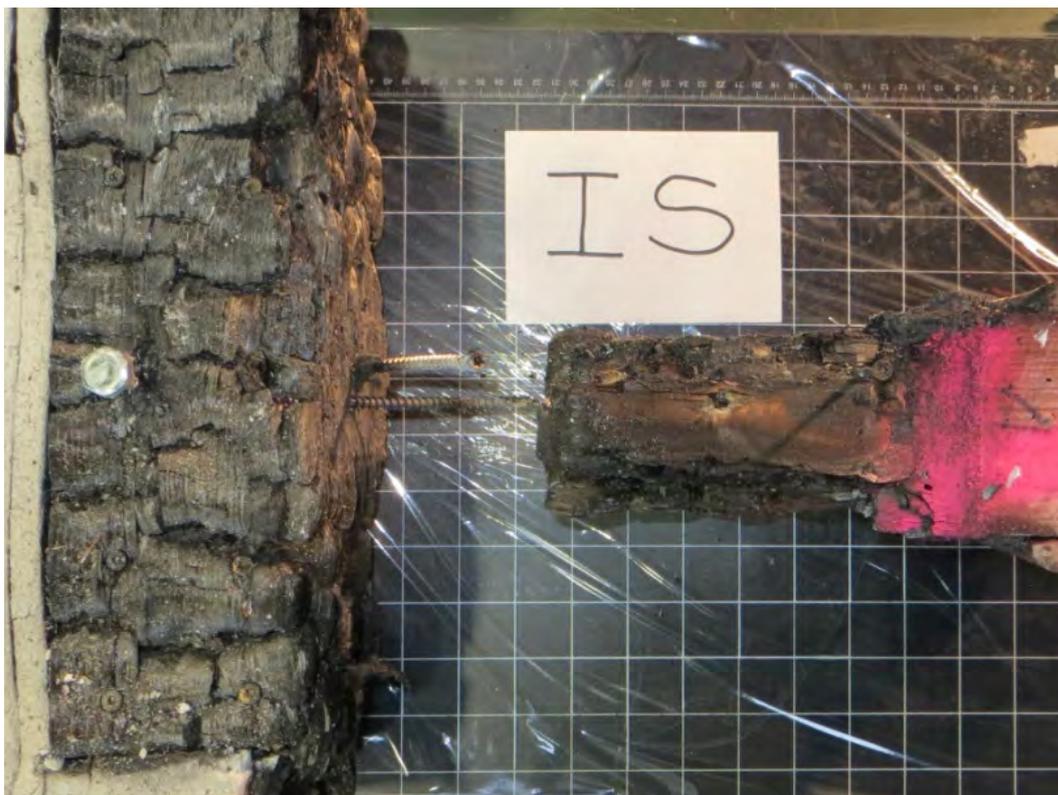


Abbildung 5-32: Aus dem Nebenträger ausgezogene Schrauben (S1)

S2

Bei diesem Versuchskörper konnte nur eine geringere Resttragfähigkeit als erwartet erzielt werden. Ab der 40. Minute begann sich der Nebenträger zu verschieben und erreichte nach ca. 59 Minuten eine Relativverschiebung von 5 mm. Nach Laststeigerung wurde der Nebenträger um weitere 40 mm verschoben. Das Versagen der Verbindung wurde durch das Herausziehen der Vollgewindeschraube, die über den Hauptträger eingedreht wurde, aus dem Hauptträger eingeleitet. Die zweite Schraube verformte sich dabei stark und riss ab.

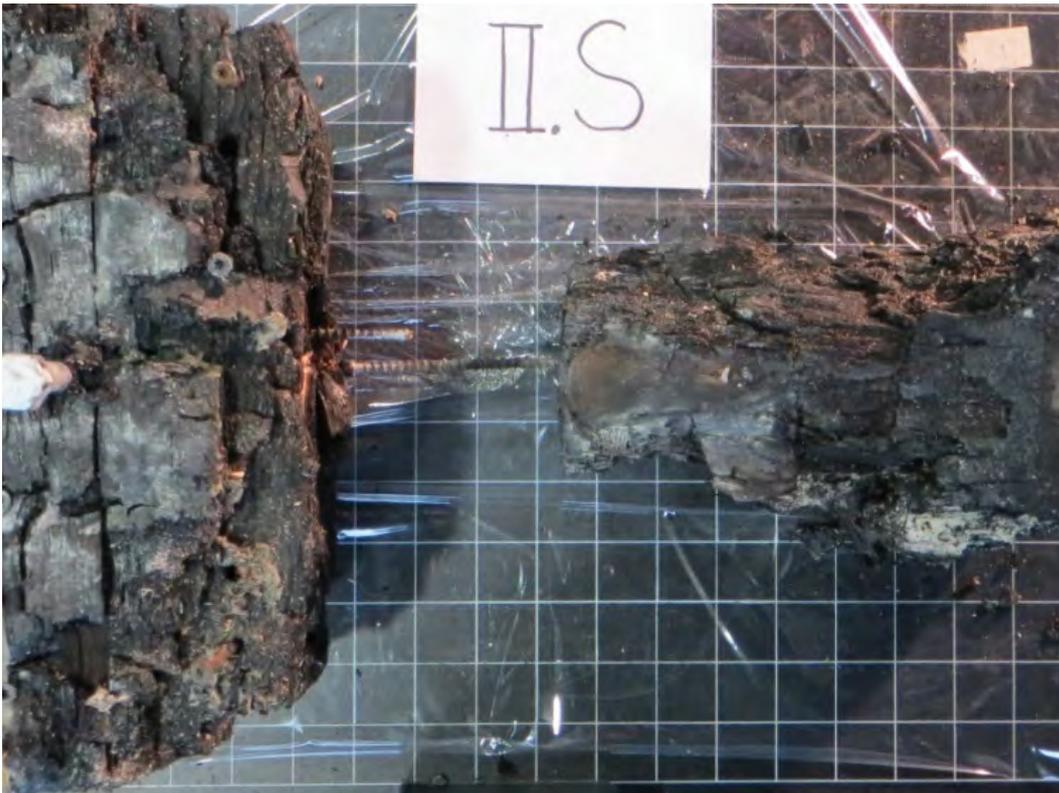


Abbildung 5-33: Herausziehen der Schraube aus dem Hauptträger (S2)

S3

Dieser Versuchskörpertyp erreichte mehr als die erwartete Resttragfähigkeit.

Nach der Laststeigerung setzte eine Relativverschiebung von etwa 40 mm ein. Diese Verschiebung wurde durch das Herausziehen der Vollgewindeschraube, die über den Hauptträger eingeschraubt worden war, aus dem Nebenträger erzeugt. Die Schraube, die über den Nebenträger eingedreht wurde, zeigte nur geringe Verformungen auf und riss anschließend ab (vgl. Abbildung 5-29).

S4

Dieser Versuchskörpertyp erreichte eine überaus hohe Resttragfähigkeit.

Nach der Laststeigerung setzte eine Relativverschiebung von etwa 35 mm ein. Diese Verschiebung wurde durch das Herausziehen der Vollgewindeschrauben eingeleitet. Dabei wurde diejenige Schraube, die über den Hauptträger eingeschraubt worden war, aus dem Nebenträger herausgezogen und die zweite Schraube, die über den Nebenträger eingedreht worden war, wurde aus dem Nebenträger gezogen. Eine Verkohlung entlang der Schraube konnte nur in den ersten 30 mm aufgezeichnet werden (vgl. Abbildung 5-35). Für diesen Bereich kann von keinem Auszieh Widerstand der Schrauben aus dem Holz ausgegangen werden.



Abbildung 5-34: Ausgezogene Vollgewindeschrauben aus dem Haupt- und Nebenträger (S4)



Abbildung 5-35: Verfärbung der Vollgewindeschrauben aus S4 mit ungeschütztem Kopf: Schwarzfärbung nur in ca. 30 mm Tiefe vom Kopf aus vorhanden (Bereich mit $T > 300^{\circ}\text{C}$)- Zugschrauben oben, Druckschraube unten

5.3.4.4 Temperaturmessungen

Die Anordnung und Bezeichnung der Messstellen ist Abschnitt 5.3.2.3 zu entnehmen.

Es ist festzustellen, dass sich die Ofentemperaturen der Mantelthermoelemente bei den belasteten Prüfkörper (MW MT) und seinem unbelasteten Double zur Messung der Temperaturen (MW 3.1) um max. 80°C unterschieden (vgl. Abbildung 5-36).

Auch die Temperaturmessstellen an der Oberkante des Hauptträgers des belasteten (z.B. Messstelle 3 M) und des unbelasteten Temperatur-Prüfkörpers (z.B. Messstelle 3.1 M) zeigen, dass beiden Prüfkörper einer ähnlicher Temperaturbeanspruchung unterliegen (vgl. Abbildung 5-36). Prüfkörper S1 zeigt hierbei eine Ausnahme. Die Temperatur am belasteten

Prüfkörper S1 (Messstelle 1 M) weist etwa 100 °C niedrigere Temperaturwerte auf als der unbelastete Prüfkörper S1.1 (Messstelle 1.1 M) (vgl. Abbildung 11-38).

Aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zwischen dem belasteten Prüfkörper und unbelasteten Prüfkörper wird davon ausgegangen, dass die aufgezeichneten Temperaturen mit geringen Abweichungen auch für die belasteten Prüfkörper repräsentativ sind.

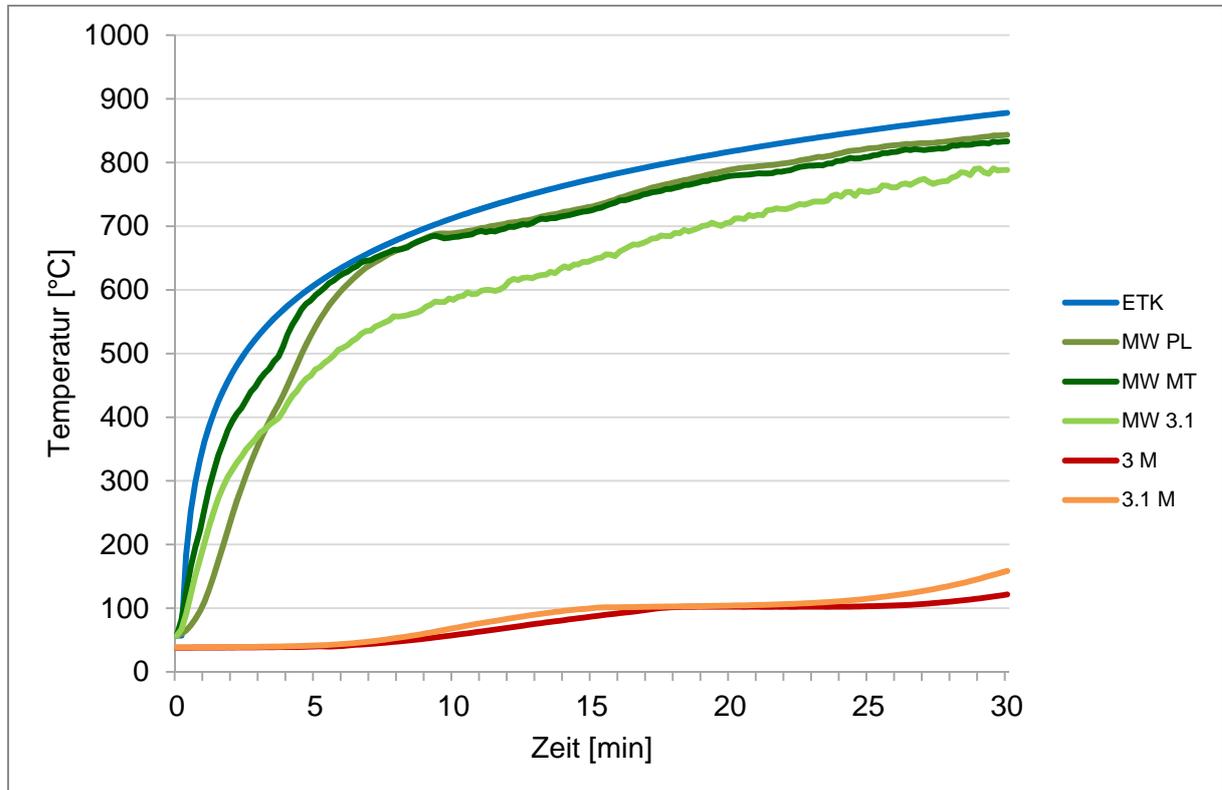


Abbildung 5-36: Temperaturwerte am belasteten Prüfkörper und dem zusätzlichen Prüfkörper zur Überprüfung der Temperaturen entlang der Verbindung (Versuchskörper (S3 und S3.1))

Weitere Diagramme zum Vergleich der Ofentemperaturen und der Temperaturwerte entlang der Vollgewindeschrauben sind Abschnitt 11.3.2 zu entnehmen.

Die Maximaltemperaturen an den Köpfen (HTK und NTK) und Spitzen (HTS und NTS) der Vollgewindeschrauben der Prüfkörper S1.1, S2.1, S3.1 und S4.1 sind in Tabelle 5-16 zusammengefasst.

Tabelle 5-16: Maximaltemperaturen an Schraubenkopf und -spitze der Vollgewindeschrauben im Brandversuch

Prüfkörper	HTK [°C]	NTK [°C]	HTS [°C]	NTS [°C]
S1.1	100	120	120	80
S2.1	120	108	70	80
S3.1	120	128	115	90
S4.1	~900	~900	20	20

Der Vergleich der Messwerte an den geschützten Köpfen der Vollgewindeschrauben (HTK und NTK) der Prüfkörper S1.1, S2.1 und S3.1 zeigt auf, dass die Schraubenköpfe durch eine maximale Temperatur von 128°C beansprucht wurden. Die Schraubenköpfe der Prüfkörper S1.1 und S3.1 wurden jeweils durch 25 mm dicke Fichtenbretter vor einer 30 minütigen Brandbeanspruchung geschützt. Die Schutzmaßnahme des 60 Minuten lang beanspruchten Prüfkörpers S2.1 bestand aus einer Abdeckung der Schraubenköpfe durch ein 25 mm dickes Fichtenbrett und einer zusätzlichen 15 mm dicken Gipskartonplatte. Die seitliche Überdeckung hingegen variierte bei den verschiedenen Prüfkörpern.

Die Temperaturmessstellen an den ungeschützten Köpfen des Prüfkörpers S4.1 zeigen am Schraubenkopf am Hauptträger (HTK) und am Nebenträger (NTK) ca. 900 °C an. Diese Werte entsprechen in etwa den Ofentemperaturen.

Die Schraubenspitzen waren durch unterschiedliche Randabstände zur Seite und nach unten geschützt. Die Überdeckung der Spitze des Prüfkörpers S1.1 betrug 33 mm und sollte direkt mit den Messwerten der Spitze des Prüfkörpers S3.1 mit einer Überdeckung von 29 mm verglichen werden. Zu erwarten wäre eine um etwa 30°C höhere Temperatur an der Schraubenspitze des Prüfkörpers S3.1 gewesen, die auf die geringere Überdeckung zurückzuführen wäre. Tatsächlich waren die aufgezeichneten Werte an den Schraubenspitzen der Prüfkörper S1.1 und S3.1 nahezu gleich. Diese Gegebenheit ist nach Ansicht der Autoren auf die unterschiedliche Temperaturbeanspruchung, Rohdichte und Feuchteunterschiede der beiden Versuchskörper zurückzuführen. In Abbildung 5-37 wird deutlich, dass bei Prüfkörper S1.1 ein um etwa 100 °C höherer Temperaturverlauf als bei den Prüfkörpern S2.1 und S3.1 vorliegt. Durch die geringere Beanspruchung des Prüfkörpers S3.1 im Vergleich zu S1.1 entstehen auch geringere Temperaturmesswerte an den Schraubenspitzen trotz der geringeren Holzüberdeckung.

Die seitliche und untere Holzüberdeckung der Schraubenspitze des Prüfkörpers S4.1 von 67 mm führte zu keiner Temperaturerhöhung an der Schraubenspitze. Die einzige Temperaturbeanspruchung der Schrauben erfolgte über den ungeschützten Schraubenkopf.

Im Vergleich zur Beanspruchung der Prüfkörper S2.1 und S3.1 wurde der Prüfkörper S4.1 einer um etwa 200°C höhere Temperaturbeanspruchung ausgesetzt.

Die Abbrandraten nach DIN EN 1995-1-2 für Brettschichtholz stimmen mit der Verkohlungstiefe der Prüfkörper im ungestörten Bereich überein und können durch Messwerte an weiteren Thermolemente in verschiedenen Holztiefen (vgl. Prüfbericht [58]) bestätigt werden.

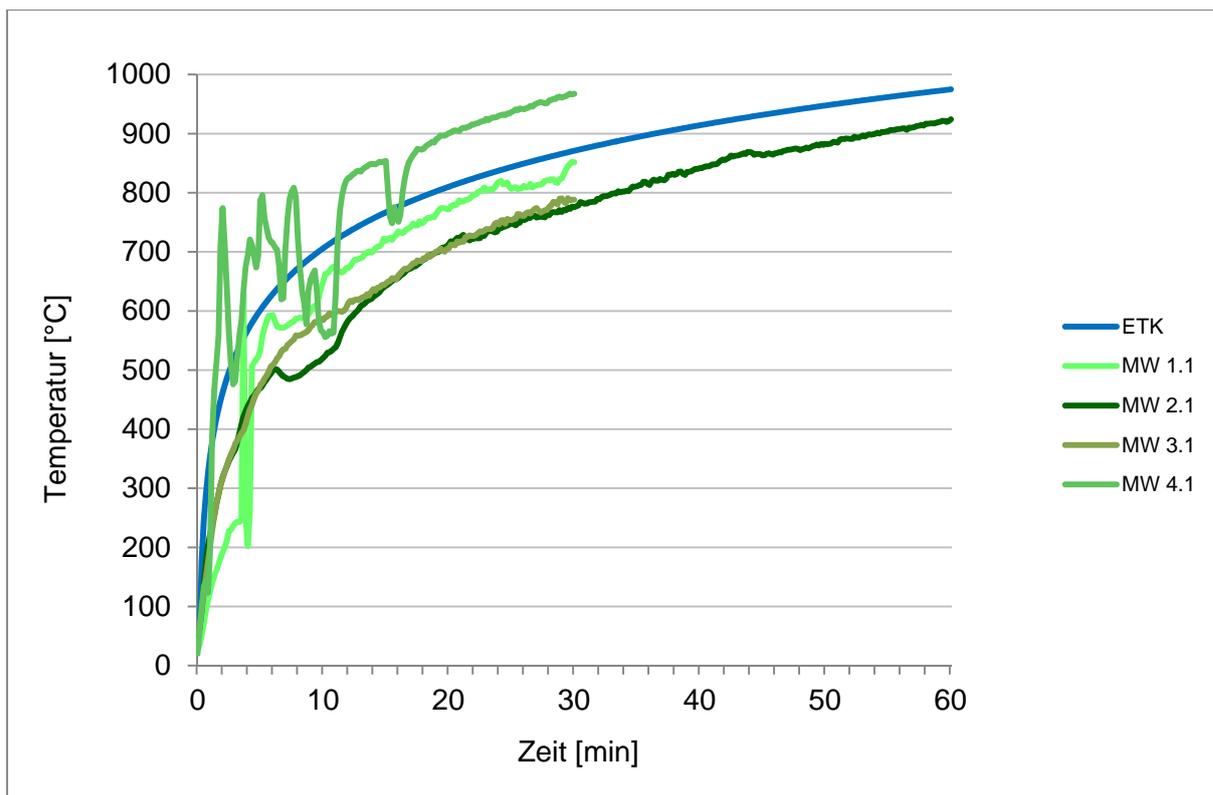


Abbildung 5-37: Vergleich der Ofentemperaturen am unbelasteten Prüfkörper mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)

6 Bewertung Schutzmaßnahmen

6.1 Balkenschuhe

6.1.1 Untersuchte Schutzmaßnahmen

Es wurden zwei Schutzmaßnahmen unter Verwendung eines Brandschutzanstriches untersucht. Verwendet wurde der Brandschutzanstrich „DBU Dispersion“ gemäß ETA 13/0165 [52]. Ausgeführt wurden beide Schutzmaßnahmen an einem Prüfkörper NT 140 mm x 200 mm mit Balkenschuh Typ 05/2 und Schrauben 5 x 60 mm, Vollausschraubung gemäß ETA (entsprechend Prüfkörper B3). Es wurde

- die Stirfläche des Nebenträgers mit zweimaligem Anstrich der Brandschutzmasse versehen (entsprechend 1000 g/m² Trockenanstrichmenge)
- das Blech des Balkenschuhs außenseitig vor Montage der Schrauben mit zweimaligem Anstrich der Brandschutzmasse versehen (entsprechend 1000 g/m² Trockenanstrichmenge).

Ziel war im ersten Fall der Schutz der Stirfläche des Nebenträgers vor Erhitzung und Abbrand, im zweiten Fall wurde eine Reduktion der Blechtemperaturen und Verbindungsmitteltemperaturen erwartet. Beide Versuchskörper wurden an einem gemeinsamen Hauptträger gegenüberliegend montiert und während Versuch B1 mit im Brandofen eingebaut. Die Anordnung der Temperturmeselemente entsprach derjenigen der belasteten Versuchskörper (vgl. Abbildung 5-19).

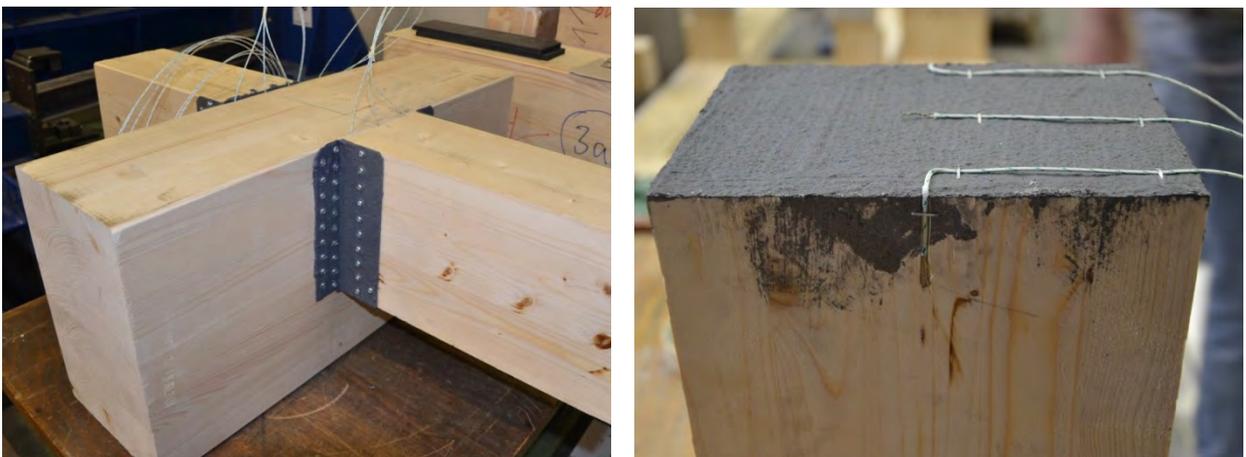


Abbildung 6-1: links: „Schutzmaßnahmen“ Versuchskörper im der Gesamtansicht, zu erkennen ist der Balkenschuh mit Anstrich auf dem Blech. rechts: Anstrich auf der Stirfläche des Nebenträgers

6.1.2 Ergebnisse

Der verwendete Anstrich zeichnet sich durch eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit aus. Dieser Effekt wurde bereits in [14] festgestellt und beschrieben. Bereits nach wenigen Minuten Brandeinwirkung bildet sich eine flockige Dämmschicht, welche aufgrund ihrer Isolierwirkung die Erwärmung des zu schützenden Untergrundes behindert, bzw. hinauszögert.

Aufgrund der Geometrie des Prüfofens war der Einbau nur dergestalt möglich, dass der Hauptträger quer zur Strömungsrichtung der Brandgase, und die Nebenträger längs angeordnet waren. Auf der brennerabgewandten Seite wurde der Nebenträger mit Anstrich auf dem Balkenschuh montiert, auf der brennerzugewandten Seite der Nebenträger mit Anstrich in der Fuge. An dieser Stelle hat sich ein erheblicher Einfluss der Orientierung und Einbaulage im Brandraum gezeigt. Auf der brennerabgewandten Seite waren die Schädigungen insgesamt unabhängig von der Art der Schutzmaßnahme deutlich geringer. Es lassen sich trotz dieses Einflusses die folgenden Schlüsse ziehen:

- Die Abdichtung des Fugenspalt mit einem Anstrich hat eine positive Schutzwirkung auf den Abbrand in der Fuge. Der Unterschied im Vergleich mit ungeschützten Ausführungen (Versuche B3, B3a, B4) ist jedoch als gering einzuschätzen. Die Temperaturmesswerte steigen vergleichsweise langsamer an, erreichen aber zum Ende Versuchszeit ähnliche Werte wie bei ungeschützten Ausführungen. (vgl. Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3)
- Der Anstrich des Bleches verzögert dessen Erwärmung erheblich. Auch der Fugenspalt bleibt deutlich kühler als bei ungeschützten Varianten. Zudem wird die Erwärmung der Verbindungsmittel verzögert, was zu einer geringeren Wärmeeinleitung in das Holz und daher zu einer geringeren Abbrandrate im Anschlussbereich führt. Dieser Effekt könnte noch durch einen Anstrich nach der Montage des Balkenschuhs verbessert werden, da auf diese Weise die Verbindungsmittelköpfe direkt mit geschützt würden (vgl. Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3).

Auffällig ist die stark unsymmetrische Form des Restquerschnittes (vgl. Abbildung 6-2). Diese ist zum einen wie oben beschrieben durch die asymmetrische Brandbeanspruchung begründet, zum anderen aber auch durch die unterschiedliche Wirkung der Schutzmaßnahmen. Der Anstrich des Balkenschuhs hat einen Abbrand unter dem Blech weitgehend verhindert, zudem wurde durch die Verbindungsmittel wesentlich weniger Wärme in das Holz eingeleitet als auf der gegenüberliegenden Seite. Hier wurde zwar der Fugenspalt abgedichtet, der erhöhte Abbrand infolge des Wärmeeintrags durch die Verbindungsmittel jedoch nicht vermindert.



Abbildung 6-2: Horizontalschnitt durch den Prüfkörper, links: mit Anstrich in der Fuge, rechts: mit Anstrich des Balkenschuhs



Abbildung 6-3: Herausgeschraubte Verbindungsmittel, links: mit Anstrich in der Fuge, rechts: mit Anstrich des Balkenschuhs

6.2 Vollgewindeschrauben

6.2.1 Untersuchte Schutzmaßnahmen

In den unbelasteten Brandversuchen (vgl. Abschnitt 4) wurden die ersten Schutzmaßnahmen untersucht. Hierbei wurde die Auswirkung unterschiedlicher Randabstände $a_{4,c}$ von gekreuzten Vollgewindeschrauben mit ungeschützten Schraubenköpfen und Spitzen beleuchtet.

Die belasteten Brandversuche (vgl. Abschnitt 5.3.4) verdeutlichen die unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen zwischen geschützten und ungeschützten Schraubenköpfen. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Versenktiefen von Schraubenköpfen und die Auswirkung eines Holzstößels über einem versenkten Schraubenkopf untersucht.

Hierfür wurde der in Abbildung 6-4 dargestellte Prüfkörper gefertigt, in welchen vier Schrauben des Durchmessers von 8 mm und vier Schrauben des Durchmessers von 12 mm mit

einer Länge von jeweils 200 mm und unterschiedlichen Versenktiefen einander gegenüber gestellt wurden.

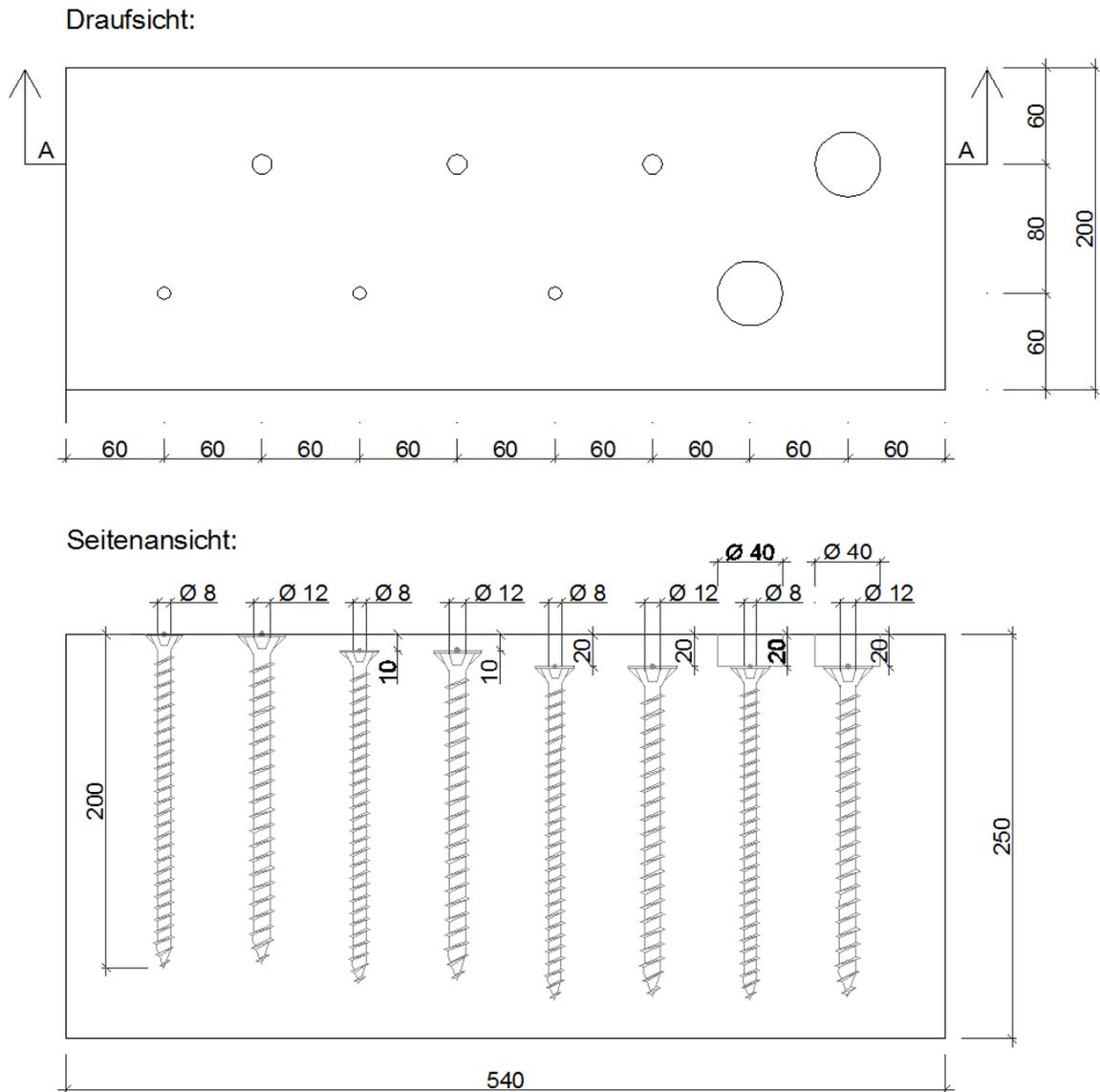


Abbildung 6-4: Prüfkörper zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Versenktiefen von Vollgewindeschrauben

Der Prüfkörper wurde einer 30 minütigen Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve gemäß DIN EN 1363-1 ausgesetzt.

Zur Aufzeichnung der Temperaturen an den Schrauben wurden die Schraubenköpfe und Schraubenspitzen mit Thermoelementen des Typs K (NiCr-Ni) versehen (vgl. Abbildung 6-5).

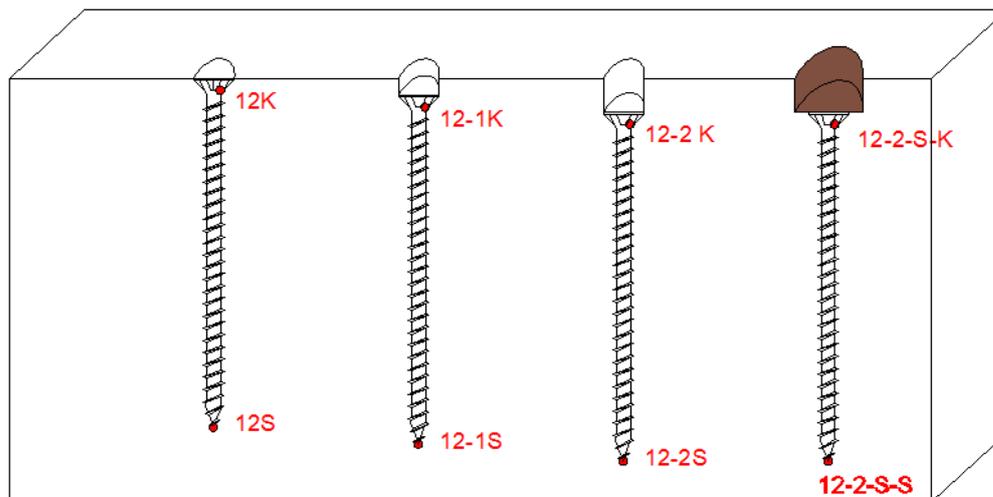


Abbildung 6-5: Schnitt A-A durch den Prüfkörper- Anordnung der Temperaturmessstellen am Beispiel der Schrauben mit dem Durchmesser von 12 mm

6.2.2 Ergebnisse

Der Vergleich des Effektes unterschiedlicher Versenktiefen erfolgte mit Hilfe der Temperaturmesswerte an den Köpfen und Spitzen der Schrauben und der Verkohlungstiefen entlang der Schrauben.

In Abbildung 6-6 wird ersichtlich, dass eine 10 mm tief versenkte Schraube im Vergleich zu einer bündig zur Oberkante des Holzes eingedrehten Schraube keinen deutlichen Unterschied im Temperaturverlauf am Schraubenkopf hervorruft. Die maximale Temperatur am Schraubenkopf der bündig eingedrehten Schraube (8K) entspricht in etwa der Temperatur der Einheitstemperaturkurve (ETK) nach 30 Minuten. Mit einer Versenktiefe von 10 mm bei einer Schraube mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 200 mm werden maximal 10 °C tiefere Temperaturen am Schraubenkopf (8-1K) aufgezeichnet. Eine Versenktiefe von 20 mm hingegen verursacht im Vergleich zum bündigen Einschrauben etwa 100 °C niedrigere Temperaturen am Schraubenkopf (8-2K) nach 30 Minuten Brandbeanspruchung. Erst der zusätzliche Schutz durch einen 20 mm dicken Holzstöpsel führt zu einer Maximaltemperatur von 350°C am Schraubenkopf (8-2-S-K).

Die Temperaturen an den Schraubenspitzen lagen mit Ausnahme der bündig eingedrehten Schraube bei etwa 20°C (vgl. 8-1S, 8-2S, 8-2-S-S). Die Temperaturmesswerte an der Schraubenspitze der bündig eingedrehten Schraube zeigten ca. 100°C an (8S).

Ähnliche Ergebnisse sind bei der Schraube mit dem Durchmesser von 12 mm vorzufinden (vgl. Abbildung 11-144).

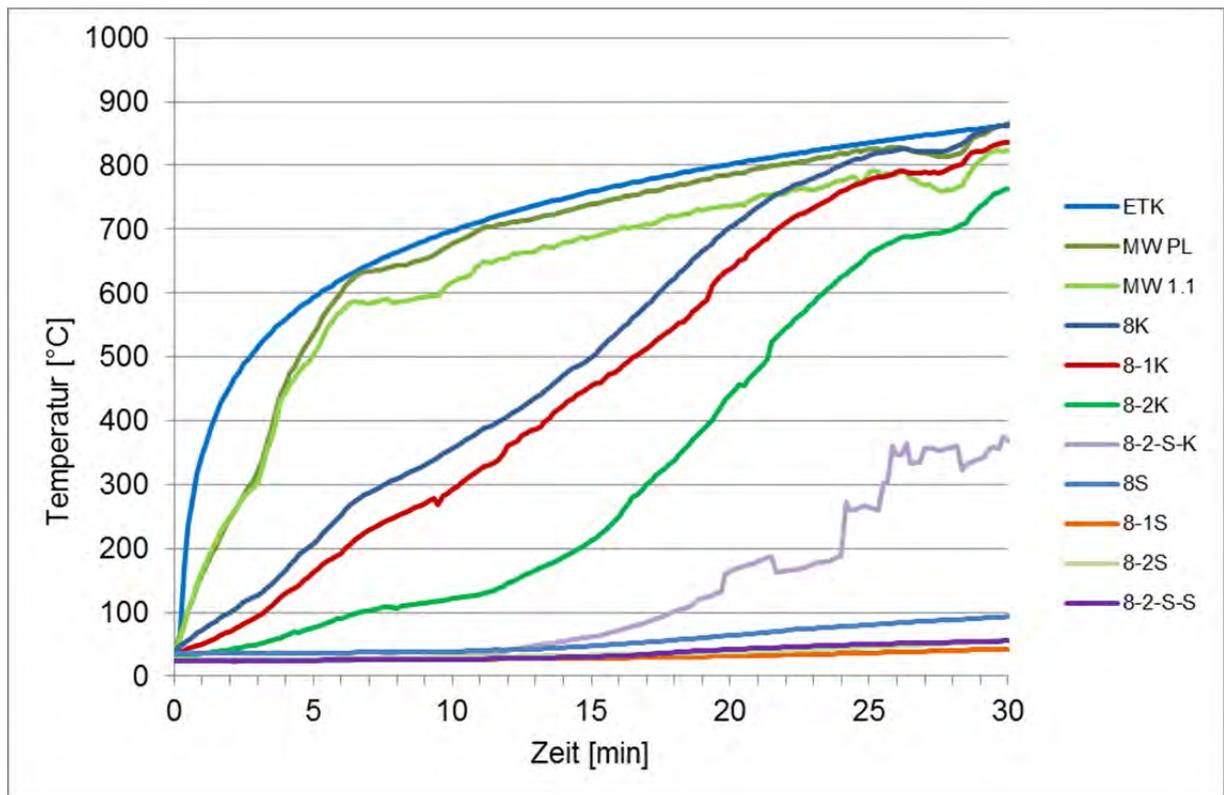


Abbildung 6-6: Vergleich der Schutzwirkung verschiedener Versenktiefen von Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 200 mm

Der Vergleich zeigt, dass baupraktisch gut auszuführende Versenktiefen von 10 mm kaum Vorteile im Vergleich zur üblichen bündigen Verschraubung bieten. Versenktiefen von 20 mm führen nach 30 Minuten zu ca. 100 °C tieferen Temperaturbeanspruchungen.

Die Abdeckungen des Schraubenkopfes führen zur geringsten Beanspruchung der Schraube. Somit kann auch die seitliche Überdeckung deutlich verkleinert werden und der benötigte Holzquerschnitt reduziert werden.

Im Schnitt (vgl. Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8) durch das Holz werden die verschiedenen Verkohlungstiefen bei unterschiedlichen Versenktiefen deutlich. Bei den Schrauben des Durchmessers von 8 mm entsteht bei bündigem Einschrauben eine Verkohlungstiefe entlang der Schraube von ca. 30 mm, die sich zusätzlich zum üblichen Abbrand des Holzquerschnitts ergibt. Bei einer Versenktiefe von 10 mm reduziert sich diese Verkohlungstiefe auf 20 mm (vgl. Abbildung 6-7). Eine Versenktiefe von 20 mm verkürzt die Verkohlungstiefe um weitere 10 mm. Die Schutzmaßnahme durch einen zusätzliche Holzstöpsel oberhalb des Schraubenkopfes bewirkt, dass keine Verkohlung mehr sichtbar wird (vgl. Abbildung 6-8). Ähnliche Verkohlungstiefen sind auch bei den Schrauben des Durchmessers von 12 mm zu beobachten (vgl. Abschnitt 11.8.1).

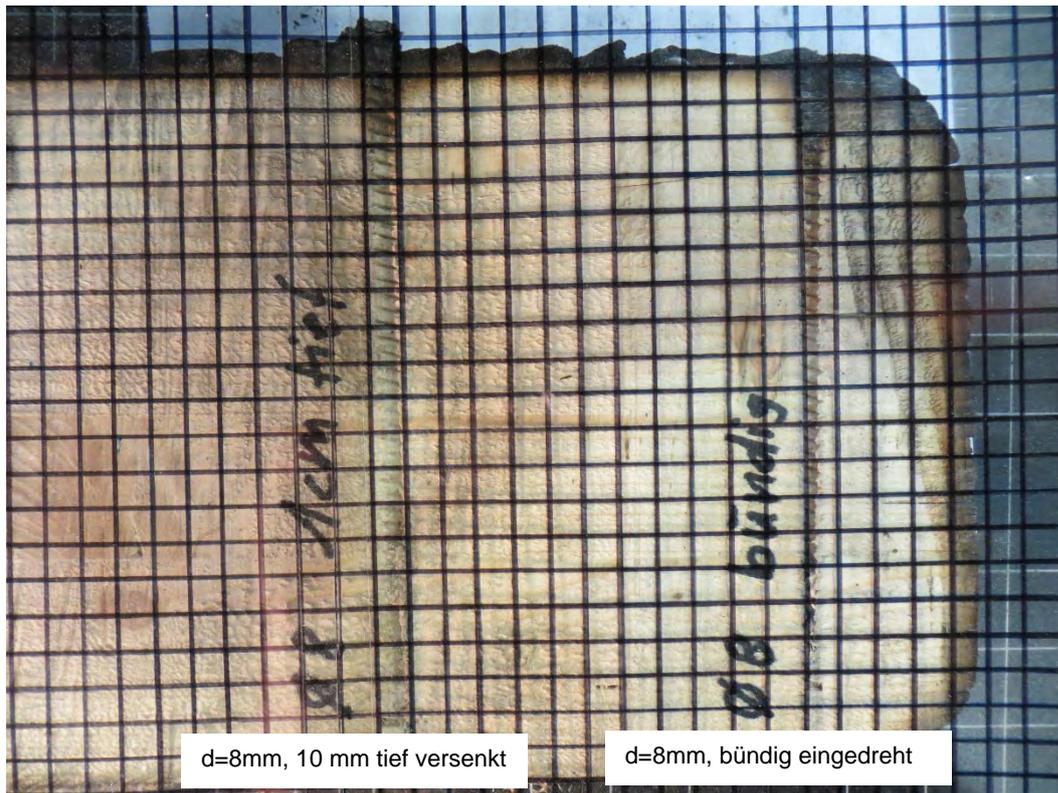


Abbildung 6-7: Schnitt durch den Holzquerschnitt bei ausgedrehten Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von 8 mm- verdeutlicht werden die unterschiedlichen Verkohlungstiefen In Abhängigkeit der Versenktiefe- hier 0 mm und 10 mm

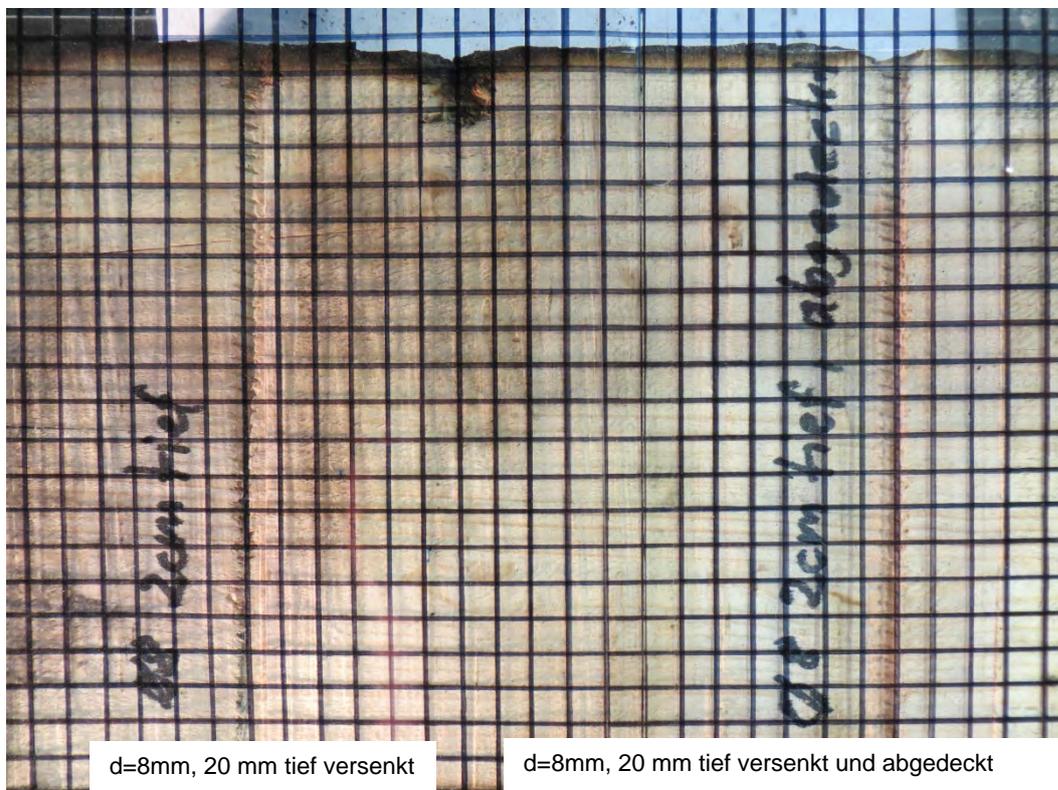


Abbildung 6-8: Schnitt durch den Holzquerschnitt bei ausgedrehten Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von 8 mm- verdeutlicht werden die unterschiedlichen Verkohlungstiefen In Abhängigkeit der Versenktiefe- hier 20 mm und 20 mm+ Holzstöpsel

7 Numerische Parameterstudien an Vollgewindeschrauben

7.1 Vorgehensweise

Um über die Ergebnisse aus den unbelasteten Brandversuchen (vgl. Abschnitt 4.3.2.1) hinaus die Einflüsse des Durchmessers, der Schraubenlänge, der Kopfart und der Beanspruchungsdauer von Vollgewindeschrauben untersuchen zu können sowie die Ergebnisse der belasteten Brandversuche mit ungeschützten Verbindungsmitteln erweitern zu können, wurden weiterführende Parameterstudien mit Hilfe von thermischen Simulationen durchgeführt. Hierfür wurde das Finite Elemente-Programm Ansys Version 15.4 verwendet. Zur Validierung des gewählten Simulationsmodells wurden die unbelasteten Brandversuche nachgebildet und mit den untersuchten Temperaturverläufen entlang der Schraube verglichen.

7.2 Verwendete Ausgangsparameter

7.2.1 Allgemeines

In der Durchführung von numerischen Simulationen müssen dem Simulationsmodell zur Bestimmung der Temperaturverteilung in brandbeanspruchten Bauteilen die temperaturabhängigen Materialkennwerte, wie Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie Emissivität aller verwendeten Baustoffe zugewiesen werden. Außerdem muss die Wärmeübergangsbedingung (Wärmestrahlung und Wärmeströmung) im Brandfall definiert werden. Eine weitere Voraussetzung zur Simulation ist die Zuordnung einer Temperaturbeanspruchung.

7.2.2 Rohdichte

Die DIN EN 1995-1-2 [45] gibt für Vollholz das Verhältnis der Rohdichte zur Darrrohichte in Abhängigkeit der Temperatur an. Die Rohdichte des untersuchten Holzes entspricht 480 kg/m^3 . Im gegebenen Dichteverhältnis von Rohdichte zu Darrrohichte der DIN EN 1995-1-2 wird für Temperaturen unter 100°C der Holzfeuchtegehalt mit berücksichtigt. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% und einer Temperatur von 20°C besitzt Nadelholz in etwa eine Gleichgewichtsfeuchte von 12 M-%. Demzufolge wurde eine Holzfeuchte von 12 M-% innerhalb des Eingangswertes für die Rohdichte von 480 kg/m^3 berücksichtigt. Die sich daraus ergebenden Werte in Abhängigkeit der Temperatur sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

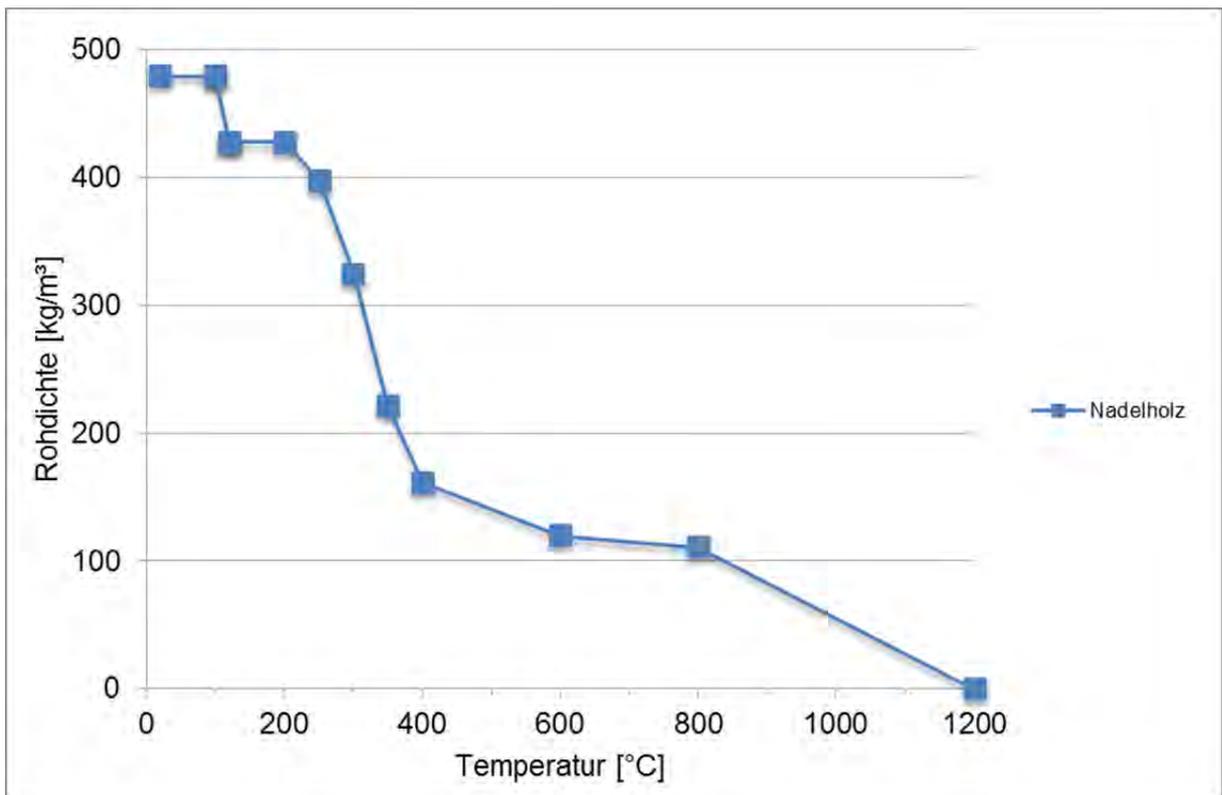


Abbildung 7-1: Rohdichte in Abhängigkeit von der Temperatur für Nadelholz (Darrrohdichte 480kg/m³; Holzfeuchtegehalt 12 M-%) nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 Anhang B

Die Rohdichte von Kohlenstoffstahl ist temperaturunabhängig. Sie beträgt konstant 7850 kg/m³ [43].

7.2.3 Spezifische Wärmespeicherkapazität

Die spezifische Wärmekapazität von Nadelholz und Kohlenstoffstahl wurden ebenfalls der DIN EN 1995-1-2 und DIN EN 1993-1-2 entnommen. Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Materialien sind die verwendeten spezifischen Wärmekapazitäten gemeinsam in Abbildung 7-2 dargestellt.

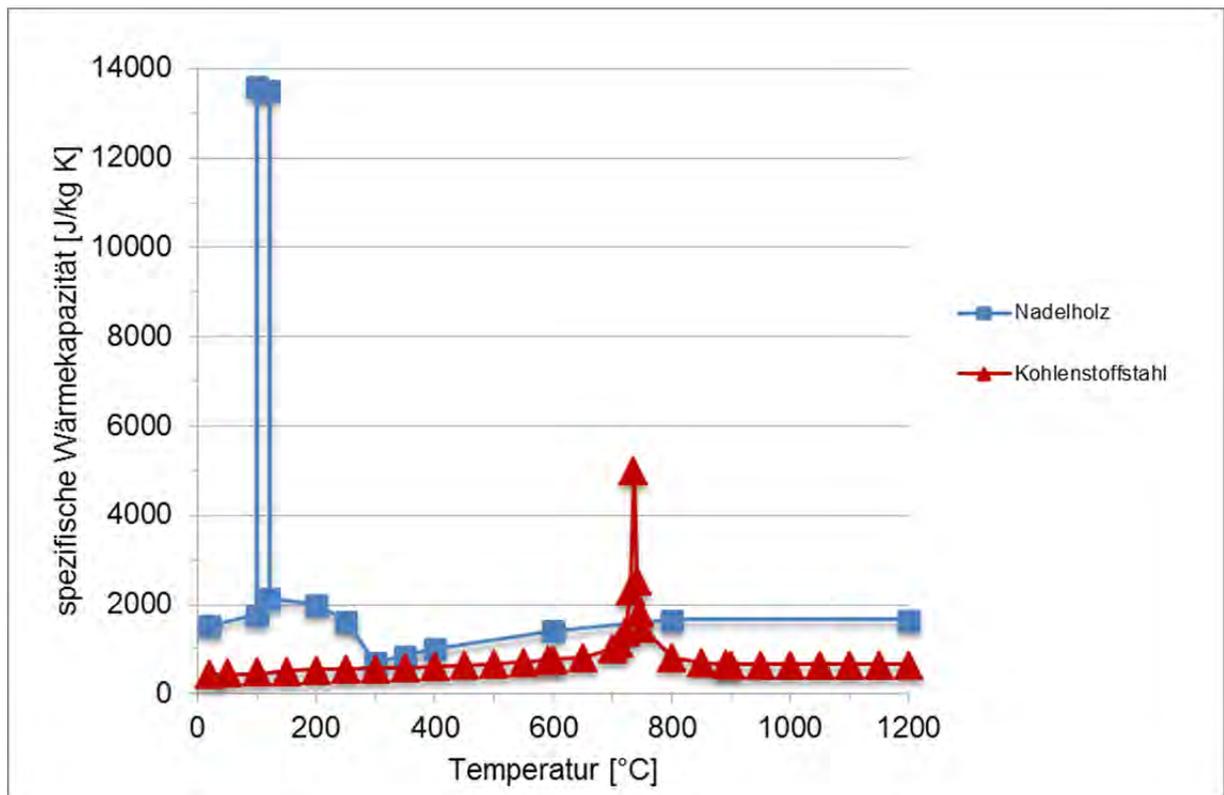


Abbildung 7-2: Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur für Nadelholz (DIN EN 1995-1-2:2010-12 Anhang B) und Kohlenstoffstahl (DIN EN 1993-1-2:2010-12 Kapitel 3)

7.2.4 Wärmeleitfähigkeit

Nadelholz weist im Gegensatz zu Kohlenstoffstahl ein anisotropes Verhalten auf. Die Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich radial, tangential und axial zur Faser.

Für das Simulationsmodell einer in Holz eingeschraubten Schraube wird ein dreidimensionales System genutzt. Daher muss die Wärmeleitfähigkeiten im dreidimensionalen Modell für jede Ausrichtung zur Faser separat angegeben werden.

Der DIN 1995-1-2 ist nur die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur für die radiale Holzrichtung zu entnehmen. Die Werte sind in Abbildung 1-10 dargestellt.

In der Literatur [33], [34] variieren die Werte der Wärmeleitfähigkeit sowohl tangential als auch axial zur Faser infolge der Untersuchungsrandbedingungen (Holzfeuchte, Messverfahren) stark. Um die Werte für das Modell festlegen zu können, wurde verschiedene Bereiche der Wärmeleitfähigkeit bei der Validierung des Simulationsmodells getestet:

Die Anwendung folgender Faktoren führte zu einer sehr guten Nachbildung der Versuche und entspricht in etwa dem Mittelwert der vorgefundenen Literaturwerte:

- $\lambda_{\text{tangential}} = 1,1 * \lambda_{\text{radial}}$
- $\lambda_{\text{axial}} = 2,4 * \lambda_{\text{radial}}$

Die Wärmeleitfähigkeit von Kohlenstoffstahl wird in Abbildung 1-10 aufgezeigt.

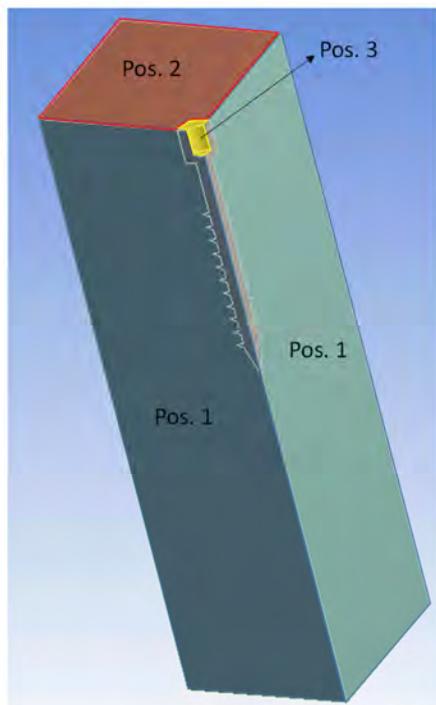
7.2.5 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung im Brandfall auf die zu untersuchenden Schraubverbindungen wird über die vorhandene Konvektion und das Emissionsvermögen der beiden Materialien beschrieben. Als Wärmeübergangskoeffizient wurde für die Simulation auf der beanspruchten Seite gemäß DIN EN 1991-1-2 ein Wert von $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ gewählt. Für Nadelholz wird eine Emissivität von 0,8 angenommen [45]. Für den Kohlenstoffstahl wurde ein Emissionsvermögen von 0,6 angesetzt.

7.2.6 Beanspruchung des Modells

Als Temperaturbeanspruchung wurde die Einheitstemperaturkurve nach DIN EN 1991-1-2 gewählt.

Das dreidimensionale Modell bildet nur ein Viertel der Schraube nach. Ausschließlich die Oberfläche des Holzes (vgl. Pos 2), über welche die Schraube eingedreht wurde, und ein Bereich des Schraubenkopfes (Pos 3) werden im Modell durch Konvektion und Strahlung thermisch beansprucht (vgl. Abbildung 7-3). Den Holzflächen des Modells (Pos 1) werden adiabatische Zustandsänderungen zugeordnet, da dort kein Wärmeaustausch symmetriebedingt vorliegt und erfolgt.



- Pos. 1 : Adiabat
- Pos. 2 : Konvektion (Wärmeübergangskoeffizient $25 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Strahlung (Emissionsvermögen 0,8)
- Pos. 3 : Konvektion (Wärmeübergangskoeffizient $25 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Strahlung (Emissionsvermögen 0,6)

Abbildung 7-3: Darstellung der Beanspruchungen im dreidimensionalen Modell

7.3 Validierung des gewählten Simulationsmodells

7.3.1 Allgemeines

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden unbelastete Brandversuche an Vollgewindeschrauben nachgebildet. Um die Versuche möglichst realitätsgetreu nachbilden zu können, wurde die tangentielle und axiale Wärmeleitfähigkeit iterativ angepasst. Zusätzlich wurde als Temperaturbeanspruchung nicht direkt die Einheitstemperaturzeitkurve, sondern die gemessenen Ofentemperatur, den Simulationen zugrunde gelegt.

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen wurden zwei Vorgehensweisen gewählt. Zum einen wurden die Temperaturen entlang der Schraube den Messwerten aus den Versuchen gegenübergestellt, zum anderen wurde die Lage der 300°C Isotherme des Modells mit der Verkohlungstiefe aus den Versuchen verglichen.

7.3.2 Vergleich der Schraubentemperaturen

Die Schrauben des Versuchskörpers wurden an den Schraubenköpfen und zusätzlich alle 100 Millimeter am Gewinde mit Thermoelementen versehen. Im Simulationsmodell wurden an gleichen Stellen Messstellen gesetzt. Die Ergebnisse der Messwerte wurden in Diagrammen gegenüber gestellt. Beispielhaft sind in Abbildung 7-4 die Ergebnisse für eine 100 mm lange Vollgewindeschraube mit einem Durchmesser von 8 mm dargestellt. Die Thermoelemente im Versuch waren hierbei sowohl am Schraubenkopf als auch an der Schraubenspitze angebracht.

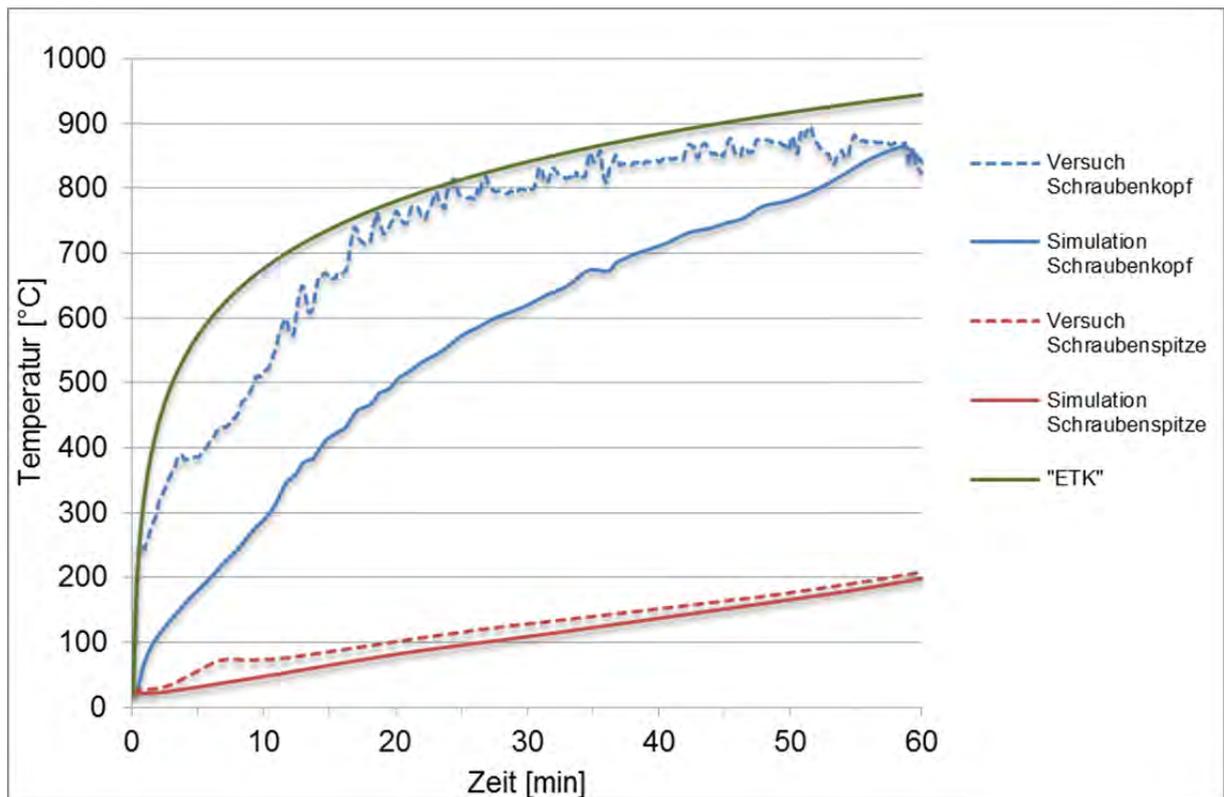


Abbildung 7-4: Vergleich der Temperaturen entlang der Schraube (Senkkopf, $d_{nom}=8$ mm, $l=100$ mm)

Die Temperaturen am Schraubenkopf des Modells zeigen im Gegensatz zu den Temperaturen an der Schraubenspitze eine weniger gute Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturen aus den Versuchen. Diese Diskrepanz ist zum einen auf die gewählten Ausgangsparameter und zum anderen auf die im Versuch verschobene Lage der Messstelle am Schraubenkopf zurückzuführen.

7.3.3 Vergleich der Verkohlungstiefen

Zur besseren Validierung des Modells wurde ein weiteres Versuchsergebnis der Simulation gegenübergestellt. Hierbei wurden die Verkohlungstiefen aus den Versuchen mit den ermittelten 300°C-Isothermen (vgl. Abbildung 7-5) verglichen.

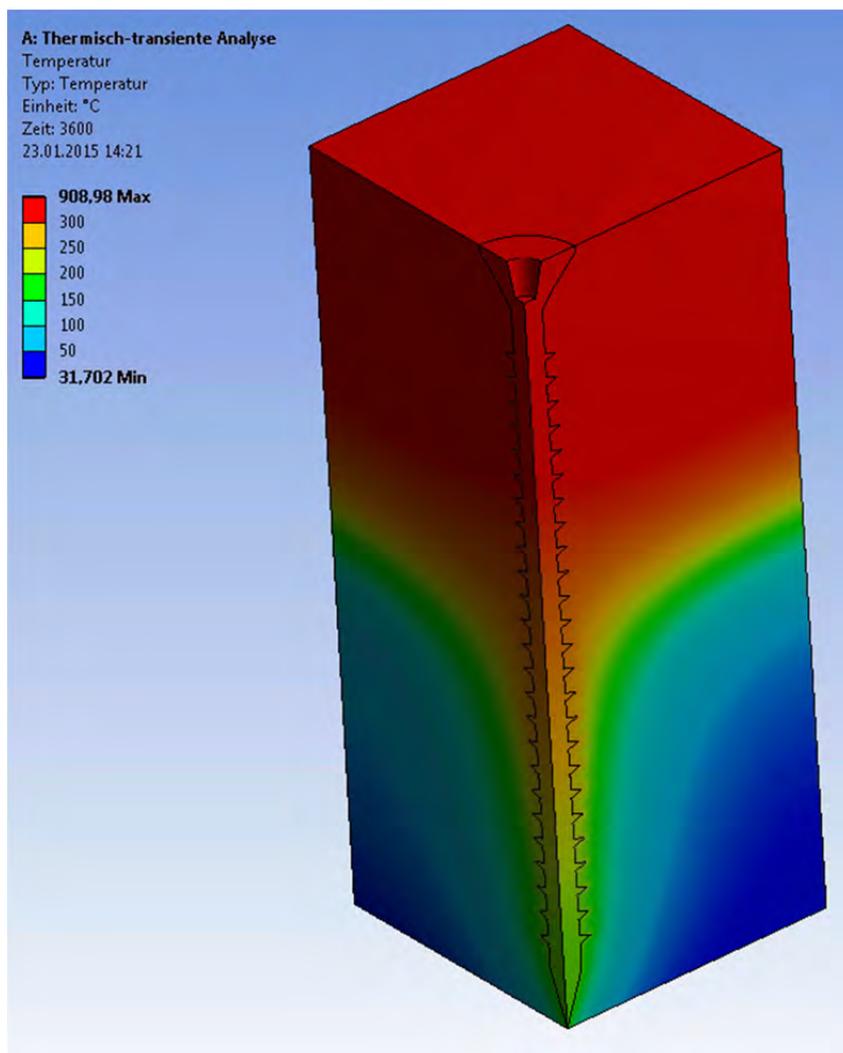


Abbildung 7-5: Isothermen entlang einer Schraube ($d_{\text{nom}}=8$ mm; $l=100$ mm) (Übergang rot-orange: 300 °C Isotherme)

Dies ist beispielhaft für die in Abbildung 7-6 dargestellte Senkkopfschraube ($d_{\text{nom}}=8$ mm; $l=100$ mm) dargestellt.

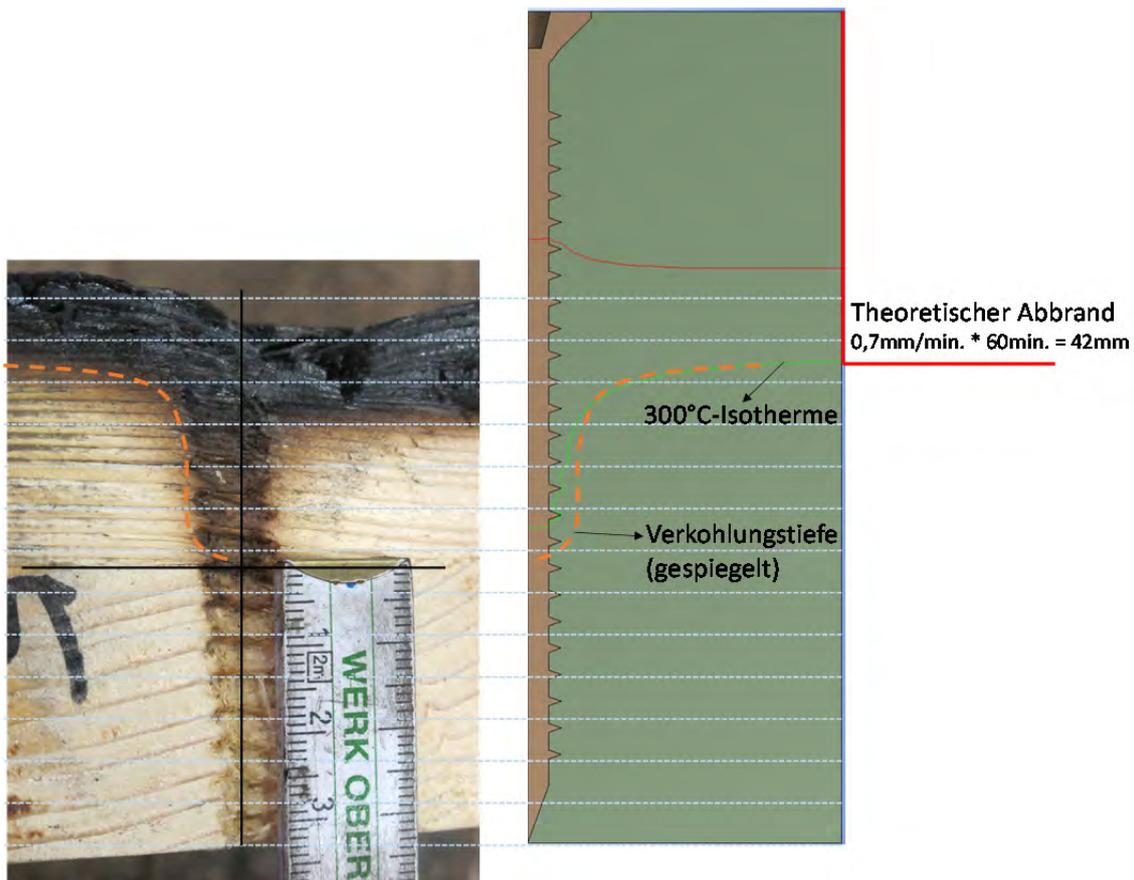


Abbildung 7-6: Vergleich der Verkohlungstiefen

Die Lage der 300°C Isotherme stimmt sehr gut mit den Verkohlungstiefen der Versuchskörper überein. Mit Hilfe der gewählten Eingangsparameter ist eine ausreichend gute Nachbildung der Versuche im Modell gewährleistet.

7.4 Parameterstudien

Im Weiteren wurden folgende Parameter für in Holz eingeschraubte Vollgewindeschrauben untersucht und in Modellen nachgebildet:

- Länge: 60 mm bis 220 mm (40 mm Schritte)
- Durchmesser: 4, 8 und 12 mm
- Schraubenkopfart: Senkkopf, Zylinderkopf und Tellerkopf
- Dauer der Beanspruchung: 30 und 60 Minuten

Die gewählten Grenzwerte sollen im Rahmen der Simulation eine durchgängige und vollständige Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Einflussgrößen ermöglichen. Einzelne Geometrievariationen wie $d_{\text{nom}} = 4\text{ mm}$ x $l = 220\text{ mm}$ liegen daher zwar außerhalb der praxisüblichen Abmessungen, sind jedoch zum Vergleich der Versuchsergebnisse und zur Darstellung der Tendenzen nötig.

Die grundlegenden Einflüsse der verschiedenen Parameter werden im Folgenden beschrieben.

- Parameter: Durchmesser

In Abbildung 7-7 ist beispielhaft die Auswertung der Simulationen für eine 140 mm lange Schrauben mit den Durchmessern 4 mm, 8 mm und 12 mm dargestellt. Gezeigt wird jeweils der Temperaturverlauf der Schraube vom Kopf (0 mm) bis zur Spitze (140 mm). Die Schraubenspitzen waren jeweils durch 80 mm Holz überdeckt.

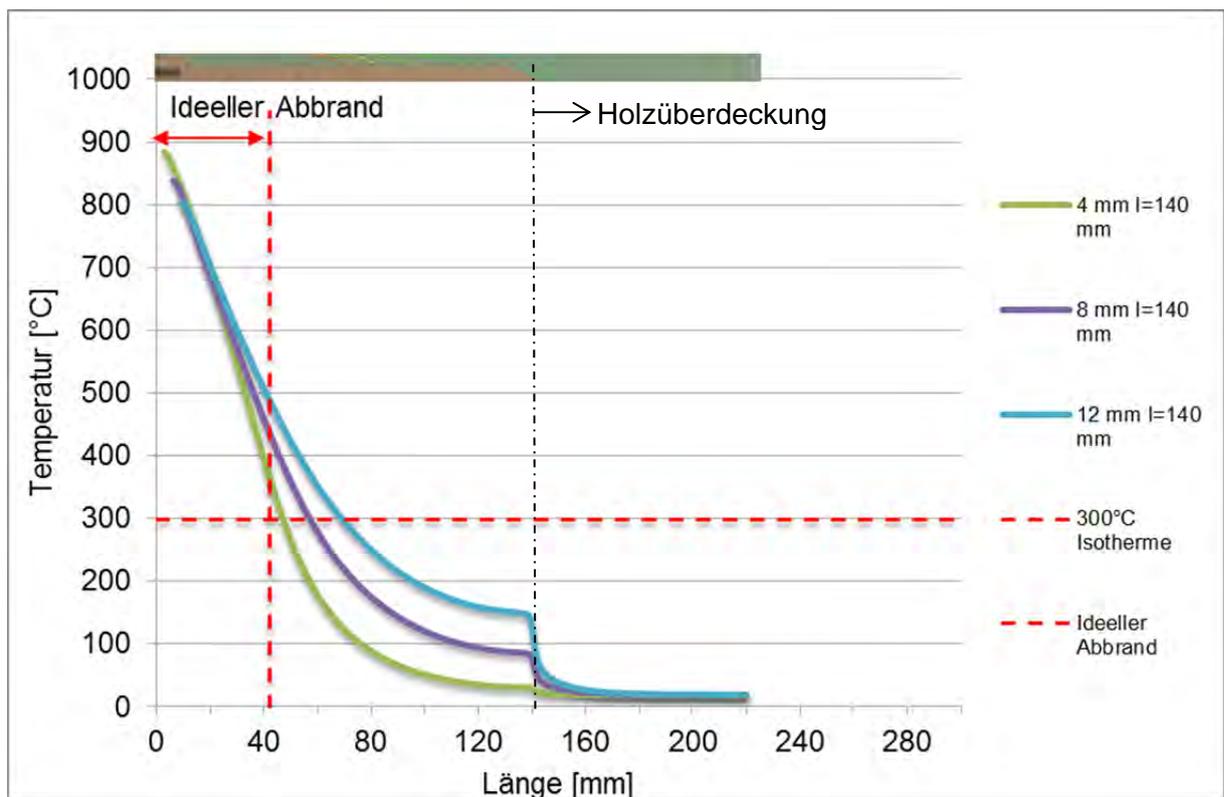


Abbildung 7-7: Untersuchung der Auswirkung verschiedener Durchmesser für eine 60 minütige Brandbeanspruchung

Vom Schraubenkopf beginnend bis in etwa 3 cm Tiefe liegen an den Schrauben mit unterschiedlichen Durchmessern annähernd gleich hohe Temperaturen vor. Je weiter man sich der Schraubenspitze nähert, desto größer wird der Temperaturunterschied zwischen den Schrauben mit unterschiedlichem Durchmesser. Weiter ist zu beobachten, dass die Schraubentemperatur umso größer ist, je größer der Durchmesser der jeweiligen Schraube ist. Der Kreuzungspunkt der beiden gestrichelten Linien gibt die Position der 300°C-Isotherme bei einem ungestörten Abbrand von Nadelholz an ($0,7 \text{ mm/min} \cdot 60 \text{ min} = 42 \text{ mm}$). Da die Schraubentemperaturen an dieser Stelle alle höher sind als 300°C wird ersichtlich, dass im Bereich der Schrauben die Verkohlungstiefe größer ist als beim ungestörten Holzabbrand.

- Parameter: Länge

Um den Einfluss der Länge ermitteln zu können, wurden in einem Abstand von 40 mm alle Schrauben mit einer Länge von 60 mm bis 220 mm untersucht. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 7-8 dargestellt. Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, sind die verschiedenen langen Schrauben im oberen Bereich dargestellt und mit der im Diagramm verwendeten Farbe hinterlegt. Ausgewertet werden wiederum die Temperaturen entlang der Schraubennachse.

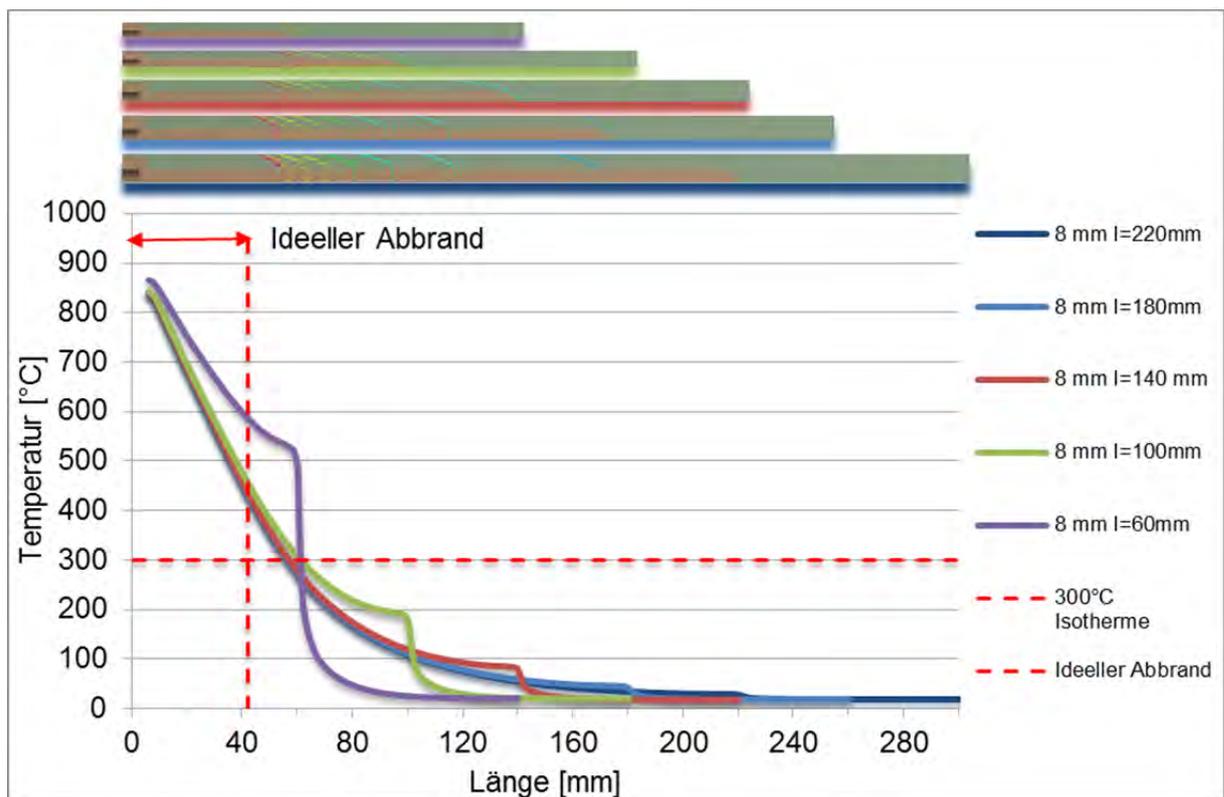


Abbildung 7-8: Untersuchung der Auswirkung der Schraubenlänge für eine 60 minütige Brandbeanspruchung

Wie bereits beim Parameter Durchmesser zu erkennen war, verlaufen die Kurven der verschiedenen langen Schrauben zunächst sehr ähnlich. Umso weiter man sich allerdings vom Schraubenkopf entfernt, desto größer werden die Temperaturunterschiede zwischen den untersuchten Varianten. Je kürzer eine Schraube ist, desto größer sind die Temperaturen entlang der Schraubennachse. Hinter den Schraubenspitzen fallen die Temperaturen im Holz jeweils sehr schnell ab.

- Parameter: Schraubenkopfform

Um einen gegebenenfalls vorhandenen Einfluss von unterschiedlichen Kopfformen analysieren zu können, wurden die baupraktisch gebräuchlichsten Formen Senkkopf, Zylinderkopf und Tellerkopf simuliert und gemeinsam in Abbildung 7-9 dargestellt.

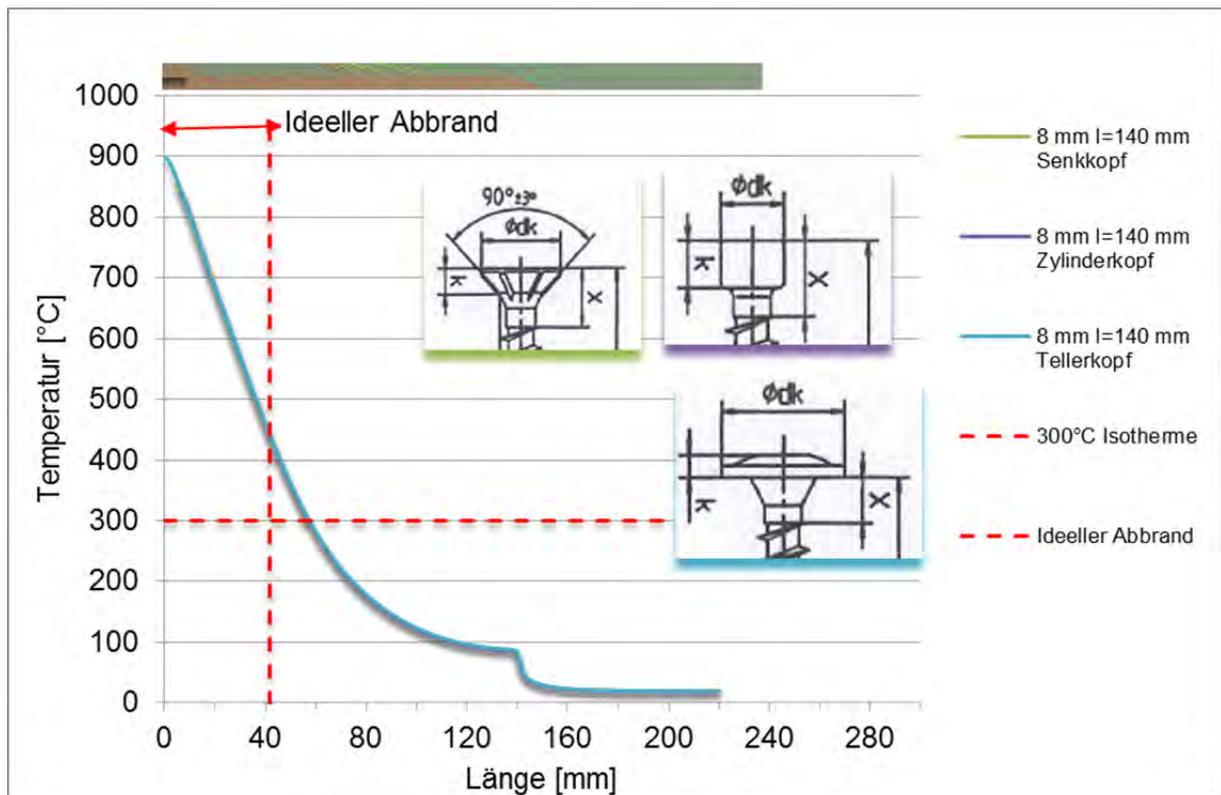


Abbildung 7-9: Auswirkungen der Form des Schraubenkopfes bei 60 minütiger Brandbeanspruchung

Es sind keine Unterschiede im Temperaturverlauf bei der Verwendung unterschiedlicher Kopfarten feststellbar.

- Parameter: Dauer der Beanspruchung

Die bisher dargestellten Kurven stellten die Temperaturen nach 60 Minuten Brandbeanspruchung dar. Um zu überprüfen, ob auch nach 30 Minuten Beanspruchungsdauer die gleichen Abhängigkeiten wie nach 60 Minuten Beanspruchung zu beobachten sind, werden die Temperaturzeitkurven am Beispiel einer 4 mm, 8 mm und 12 mm Schraube mit einer Länge von jeweils 140 mm mit den Temperaturzeitkurven aus Abbildung 7-7 verglichen (vgl. Abbildung 7-10).

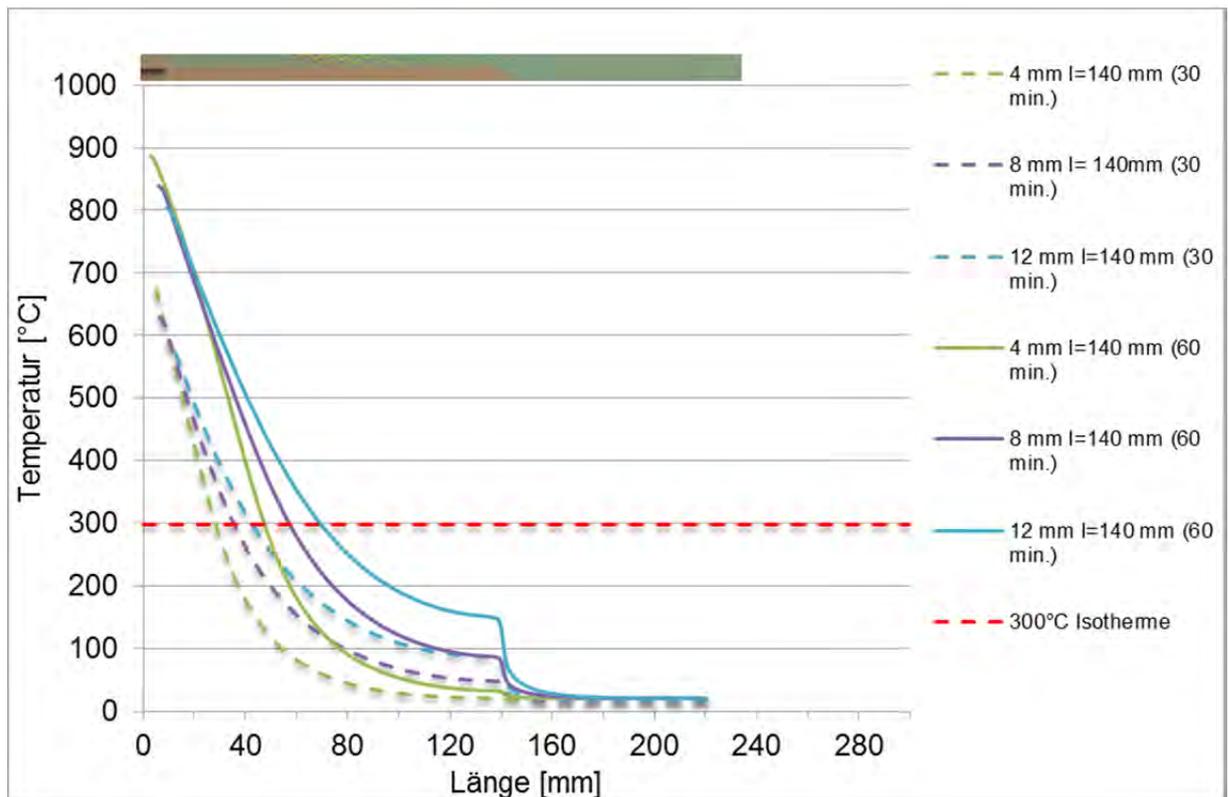


Abbildung 7-10: Auswirkung der Brandbeanspruchungsdauer

Der Vergleich der Kurven zeigt für die Temperatur nach 30 Minuten vergleichbare Tendenzen wie bei den Ergebnissen nach 60 Minuten, wodurch hierfür eine Unabhängigkeit von der Dauer der Beanspruchung ersichtlich wird. Lediglich das Temperaturniveau ist bei einer 30 Minuten Brandbeanspruchung geringer.

7.5 Schlussfolgerung aus den Parameterstudien

Die Parameterstudien zeigen unabhängig von der Beanspruchungsdauer, dass bei gleicher Länge die Wahl eines kleinen Durchmessers geringere Temperaturen entlang der Schraube verursacht. Weiterhin spielt die Länge der verwendeten Schraube eine entscheidende Rolle für die Temperaturverteilung. Je längere Schrauben gewählt werden, desto geringer sind die Temperaturen entlang der Schraube. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine längere Schraube besser in die kühleren Bereiche des Holzes eingreift und dadurch mehr Wärme abführen kann. In Abhängigkeit des Durchmessers und der Beanspruchungsdauer verändert sich jedoch ab einer bestimmten Schraubenlänge die Temperaturverteilung nicht mehr.

Ab folgenden Längen bleibt die Lage der Isothermen bei einer 30 minütigen Temperaturbeanspruchung und ausreichender seitlicher Holzüberdeckung (ca. 40 mm) in Abhängigkeit des Durchmessers gleich:

- $d_{\text{nom}} = 4 \text{ mm}$, $l \geq 100 \text{ mm}$
- $d_{\text{nom}} = 8 \text{ mm}$, $l \geq 140 \text{ mm}$
- $d_{\text{nom}} = 12 \text{ mm}$, $l \geq 200 \text{ mm}$

Bei einer 60 minütigen Temperaturbeanspruchung sind folgende Längen maßgebend:

- $d_{\text{nom}} = 4 \text{ mm}$, $l \geq 120 \text{ mm}$
- $d_{\text{nom}} = 8 \text{ mm}$, $l \geq 180 \text{ mm}$
- $d_{\text{nom}} = 12 \text{ mm}$, $l \geq 260 \text{ mm}$

Die Art des Schraubenkopfes ist für die Temperaturverteilung entlang der Schraube unerheblich.

7.6 Abschätzung der Ausziehfestigkeiten

Niedrigere Temperaturen entlang der Schraube führen zu höheren Ausziehfestigkeiten (vgl. Abschnitt 3.4 und Abbildung 7-11). Um die Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Durchmessers und der Schraubenlänge abschätzen zu können, werden vereinfacht mittlere Ausziehfestigkeiten bestimmten Temperaturbereichen zugeordnet.

Dafür wurde die temperaturabhängige Ausziehfestigkeit aus Abbildung 3-7 um die fehlenden Temperaturbereiche erweitert.

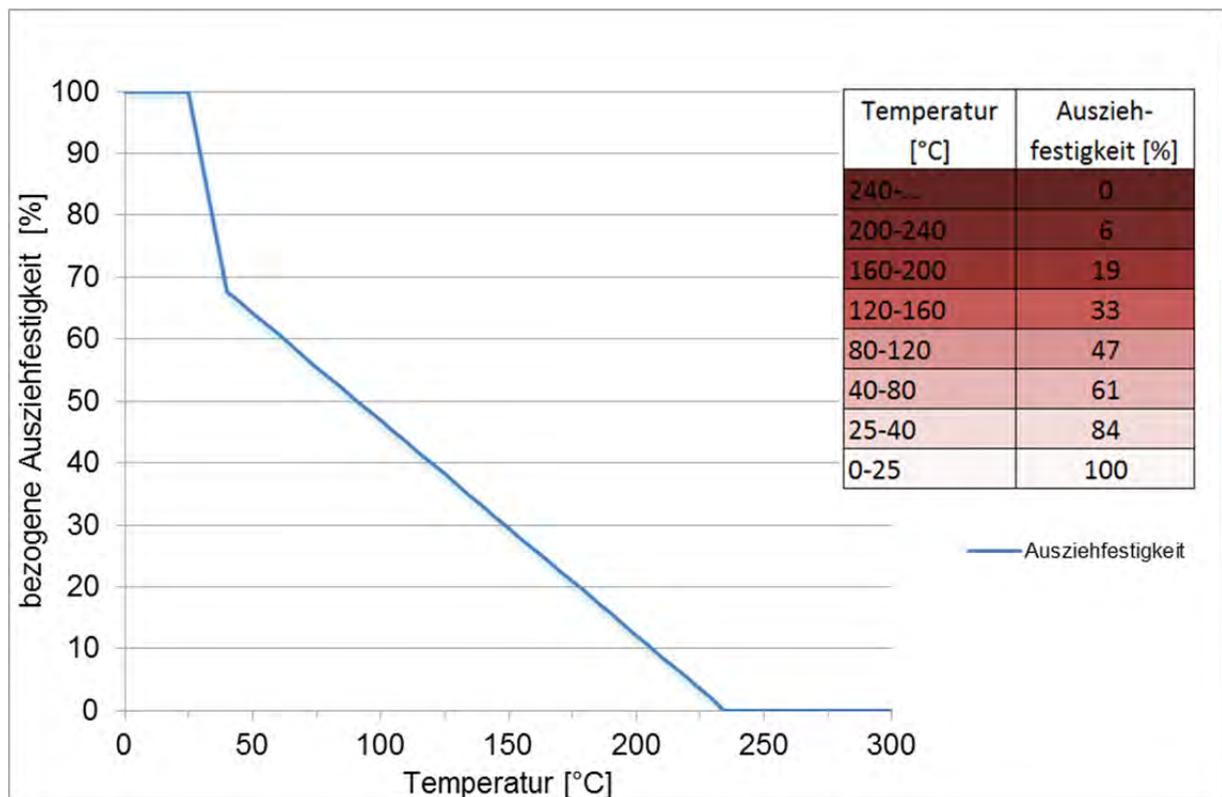


Abbildung 7-11: prozentuale Ausziehfestigkeit einer Vollgewindeschraube in Abhängigkeit der Temperatur in Bezug zur Ausziehfestigkeit unter Normaltemperatur

Bei Kenntnis der Temperaturverteilung entlang der Schraube kann demzufolge die absolute Ausziehfestigkeit der Schraube abgeschätzt werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 7-12 dargestellt.

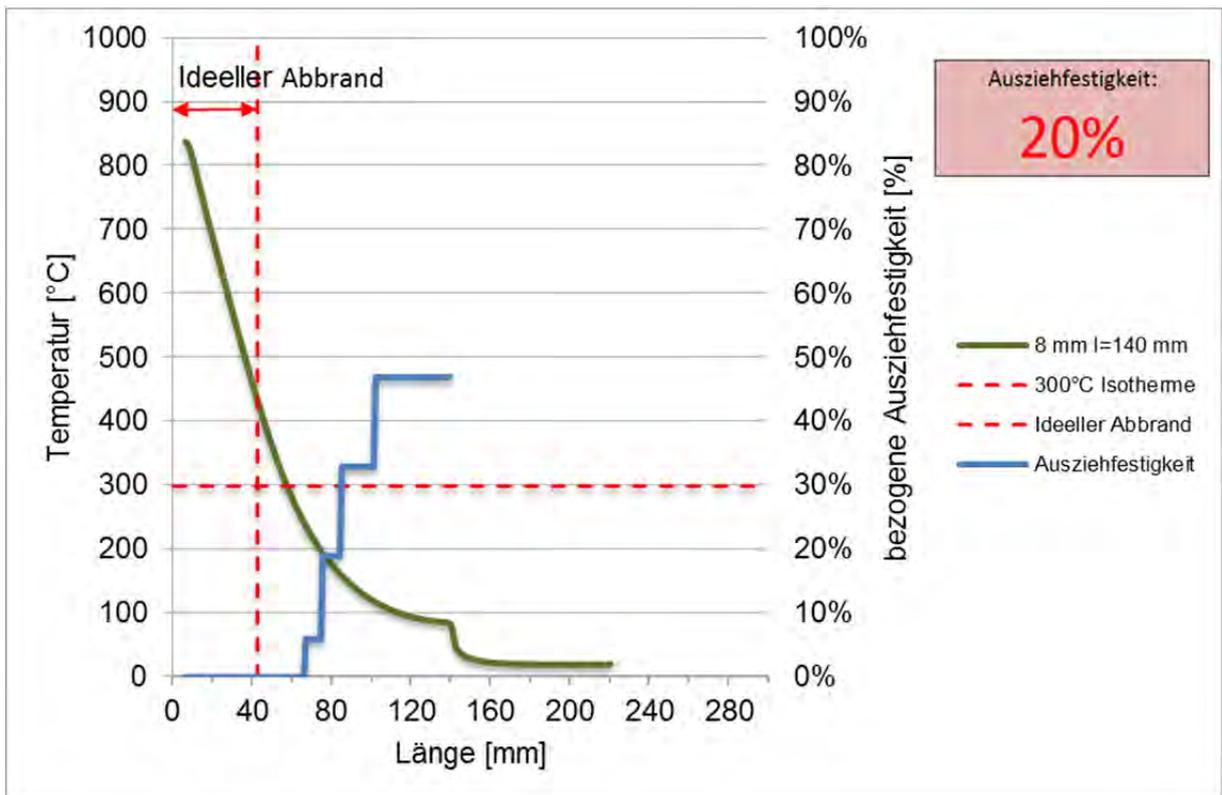


Abbildung 7-12: bezogene Ausziehfestigkeit einer Schraube mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 140 mm bei einer 60 minütigen Temperaturbeanspruchung

Werden alle Ausziehfestigkeiten entlang der Schraube addiert und anschließend durch die Gesamtlänge geteilt, kann für eine Schraube mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 140 mm eine mittlere Ausziehfestigkeit bezogen auf die Ausziehfestigkeit unter Normaltemperatur von ca. 20 % abgeschätzt werden.

In Abbildung 7-13 werden die Ausziehfestigkeiten für Vollgewindeschrauben der Durchmesser 4 mm, 8 mm und 12 mm mit Längen bis zu 220 mm bei einer 60 minütigen Brandbeanspruchung dargestellt.

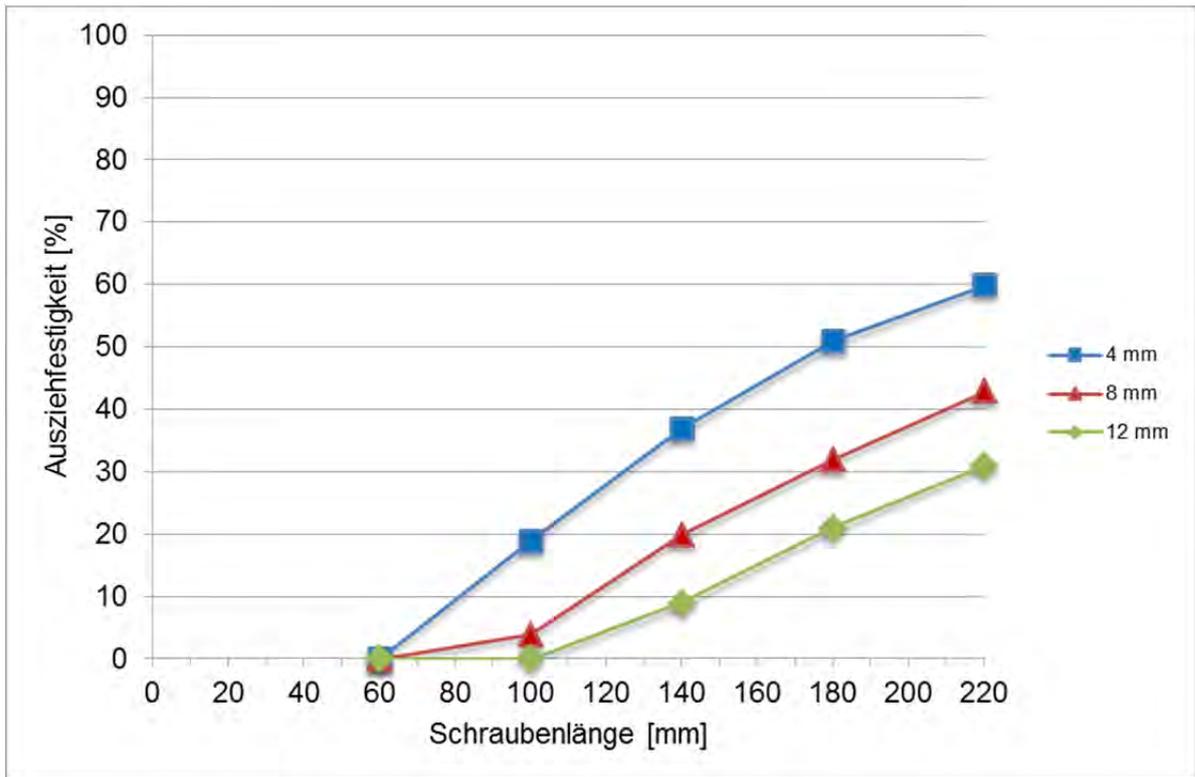


Abbildung 7-13: mittlere Ausziehfestigkeiten der Schrauben $d_{nom}= 4\text{ mm}$, 8 mm und 12 mm mit $l= 60\text{ mm}$ - 220 mm bei 60 minütiger Temperaturbeanspruchung und ausreichender seitlicher Überdeckung (ca. 80 mm)

Für eine 30 minütige Beanspruchung werden die Ausziehfestigkeiten in Abbildung 7-14 dargestellt.

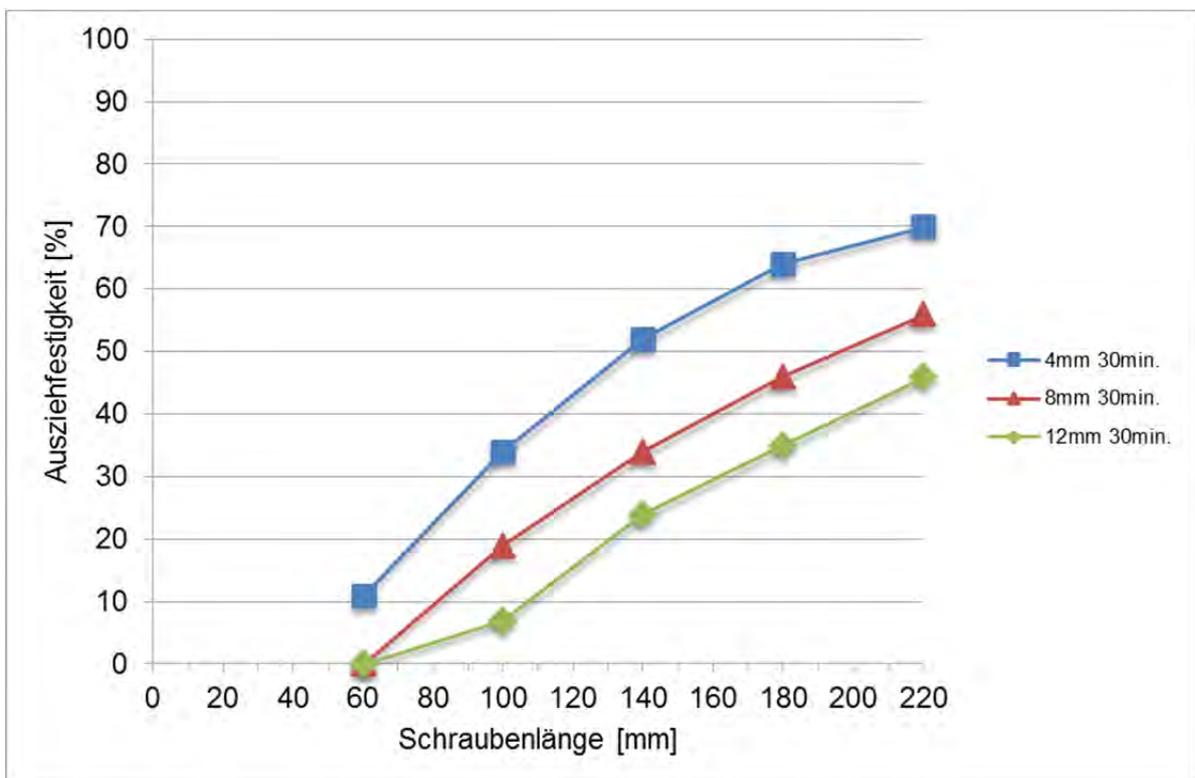


Abbildung 7-14: mittlere Ausziehfestigkeiten der Schrauben $d_{nom}= 4\text{ mm}$, 8 mm und 12 mm mit $l= 60\text{ mm}$ - 220 mm bei 30 minütiger Temperaturbeanspruchung und ausreichender seitlicher Überdeckung (ca. 40 mm)

Mit Hilfe der Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14 kann die Ausziehfestigkeit für Schrauben abgeschätzt werden, sofern der Temperatureintrag ausschließlich über den Kopf und nicht über die Längsseite der Schraube eingetragen wird.

Diese Angaben sind jedoch durch weitere Brandversuche zu belegen und Gegenstand weiterführender Untersuchungen, die über diesen Forschungsbericht hinausgehen.

8 Bewertung und Schlussfolgerung

8.1 Balkenschuhe

8.1.1 Typisches Brandverhalten der Verbindungen

Zusammenfassend lassen sich für das Trag- und Versagensverhalten von Balkenschuhverbindungen im Brandfall die folgenden typischen Merkmale feststellen:

- Maßgebend für das Bauteilversagen war in allen untersuchten Konfigurationen ein Versagen des Nebenträgers, bzw. der Verbindungsmittel im Nebenträger.
- Typisch ist insbesondere das Herausziehen der Verbindungsmittel aus dem Restquerschnitt des Nebenträgers sowie teilweise auch aus dem oberen Bereich des Hauptträgers.
- Der Nebenträger verschiebt sich dabei in seiner Längsrichtung vom Hauptträger weg und gleichzeitig in Krafrichtung nach unten.
- Aufgrund der Temperatureinleitung durch die Verbindungsmittel in das Holz kommt es im Anschlussbereich zu deutlich erhöhten Abbrandraten (vgl. Abschnitt 11.5.1 und Abbildung 6-2). Infolgedessen werden die Verbindungsmittel zunehmend verformt und auf Herausziehen beansprucht, im Gegensatz zur hauptsächlichlichen Beanspruchung auf Abscheren im Kaltzustand. Das Tragverhalten ist daher durch einen ausgeprägten Einhängeeffekt (vgl. „Johannsen-Modell“) gekennzeichnet.
- Das Verbindungsversagen tritt nach großen Relativverschiebungen zwischen Haupt- und Nebenträger ein. Typische Verschiebungen bei Erreichen der Tragfähigkeit lagen in der Größenordnung von 50 mm. Dabei werden die Blechbauteile und Verbindungsmittel stark plastisch verformt.
- Bei keinem der Versuchskörper kam es zu einem vorzeitigen Versagen, bzw. Abreißen des Bleches.

8.1.2 Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau

Für Auswahl und Gestaltung von Balkenschuhverbindungen, die eine ausreichende und definierbare Tragfähigkeit über eine 30-Minütige Brandeinwirkung erhalten sollen, können die folgenden Empfehlungen abgeleitet werden:

- Der Mindestquerschnitt der Nebenträger sollte 140 mm x 200 mm betragen. Das Verhältnis $a/h > 0,7$ muss eingehalten werden.

- Größere Querschnittsabmessungen in der Höhe und/oder der Breite ergeben ausschließlich positive Einflüsse auf die Tragfähigkeit im Brandfall, sowohl in den Absolutwerten als auch relativ zur Kalttragfähigkeit. Dies liegt an den anteilig geringeren Randeinflüssen und dem linearen Anstieg der Tragfähigkeit mit der Höhe.
- Der Fugenspalt zwischen Haupt- und Nebenträger sollte so gering wie möglich gewählt werden. Die hier untersuchte Fugenbreite von 4,0 mm ist als Maximalmaß zu empfehlen, wenn eine Fuge aus praktischen Gründen als erforderlich erscheint.
- Die Verwendung von Schrauben als Verbindungsmittel ist stark zu empfehlen. Diese haben im Vergleich mit Rillennägeln bei ansonsten gleichen Randbedingungen eine wesentlich höhere Rest-Auszugsfestigkeit, was sich erheblich positiv auf die Tragfähigkeit im Brandfall auswirkt.
- Schrauben sollten 5,0 mm Nenndurchmesser haben.
- Nägel können 4,0 mm oder 5,0 mm Nenndurchmesser haben.
- Verbindungsmittel sollten eine Mindestlänge von 70 mm aufweisen. Kürzere Verbindungsmittellängen sind ungeeignet und binden nach 30 Minuten nicht mehr ausreichend in unverbranntes Holz ein.
- Im Nebenträger sollten zwei Reihen von Verbindungsmitteln über die gesamte Höhe des Balkenschuhs angeordnet werden. Soweit in den Zulassungen für die Kaltbemessung weniger Verbindungsmittel als Löcher in den Balkenschuhen vorgesehen sind, ist trotzdem eine Vollausschraubung, bzw. Vollausschraubung vorzusehen.
- Balkenschuhe mit innen- oder außenliegenden Laschen können gleichwertig verwendet werden. Die Laschenanordnung wirkt sich kaum auf die Brandtragfähigkeit der Verbindung aus.
- Untersucht wurden Balkenschuhe aus 2,0 mm dickem bandverzinkten Stahlblech. Dickere Blechstärken wirken sich nicht negativ auf die Brandtragfähigkeit aus.

8.1.3 Bemessungsansätze

Verbindungen mit Balkenschuhen können nach 30-minütiger ETK-Beanspruchung bei günstiger Gestaltung entsprechend den in Abschnitt 8.1.2 genannten Kriterien Lasten in Höhe von 33 % der rechnerischen charakteristischen Kalttragfähigkeit aufnehmen (vgl. Abschnitt 5.3.3.2). Dieser Wert gilt für allseitige Brandbeanspruchung ohne Schutzmaßnahmen und Lagerungsbedingungen gemäß Abschnitt 5.1.1. Diese Tragfähigkeit ergibt sich aus dem maximal erreichten Wert bei einem bestimmten Versuchsaufbau und ist insoweit nur gültig, wenn genau die auch im Versuch verwendeten Randbedingungen eingehalten werden. Verschiedene Maßnahmen sind geeignet, die Tragfähigkeit zu erhöhen (vgl. Abschnitt 8.1.5).

Die rechnerische Belastbarkeit der Verbindungen wurde für jeden Prüfkörper einzeln mit der individuell vorliegenden Rohdichte ermittelt. Die Ergebnisse sind auch auf andere übliche und zulässige Rohdichten der verwendeten Holzarten übertragbar. Die Tragfähigkeit im Kaltzustand ist vergleichsweise hoch und wird in vielen praktischen Anwendungsfällen nicht vollständig ausgenutzt, da andere Bemessungsgrenzen der Gesamtbauteile maßgebend werden.

Die rechnerisch erforderliche Tragfähigkeit im Brandfall liegt wesentlich unter derjenigen bei Normaltemperatur, da es sich um eine außergewöhnliche Bemessungssituation handelt und dementsprechend die Sicherheitsfaktoren angepasst werden dürfen (vgl. DIN EN 1990:2002 [41] und Abschnitt 5.1.2.1).

Das Lastniveau von 33 % der charakteristischen Kalttragfähigkeit wird daher in vielen praktischen Fällen ausreichen, um den Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall führen zu können. Wenn dieser Nachweis nicht gelingt (z. B. bei besonders hohem Anteil ständiger Lasten) kann ein größerer Balkenschuh gewählt werden, so dass dieser auch im Brandfall eine ausreichende Tragfähigkeit aufweist.

Es wurde eine maximale Tragfähigkeit von 0,81 kN je Verbindungsmittel (Schrauben \varnothing 5 mm x 70 mm, Versuch B3a) erreicht. Dieser Wert kann zur Bestimmung der Tragfähigkeit anderer Balkenschuh-Geometrien verwendet werden, allerdings mit der Einschränkung auf den untersuchten Typ (GH Typ 05/2 und 05/2,5 Kombi gemäß ETA 08-0264).

8.1.4 Beurteilung von Balkenschuhen aus dicken verschweißten Stahlblechen

Balkenschuhe als individuell gefertigte Schweißteile aus Stahl werden bei besonders großen Holzquerschnitten verwendet, wenn keine zugelassenen industriell hergestellten Blechformteile verfügbar sind.

Größere Blechdicken führen zu verringerten Abbrandraten im Verbindungsbereich, da durch die höhere Wärmespeicherkapazität der Bauteile die Erwärmung verzögert stattfindet und das darunterliegende Holz später beginnt sich thermisch zu zersetzen [2]. Zudem steigt die relative Beanspruchbarkeit im Brandfall mit der Bauteilgröße (vgl. Abschnitt 8.1.2).

Es ist daher mit Sicherheit davon auszugehen, dass sich aus dicken Stahlblechen geschweißte Balkenschuhe relativ zu ihrer Tragfähigkeit bei Normaltemperatur nicht schlechter verhalten als solche aus dünnen kaltverformten Blechen. Die Annahme eines Tragfähigkeitsniveaus von 33 % erscheint daher als unterer Grenzwert für übliche Fälle als gerechtfertigt, wobei diese Aussage im Einzelfall je nach konkret vorliegender Bauteilgeometrie zu beurteilen ist. Bei deutlich größeren Blechstärken ist mit erheblich höheren verhältnismäßigen Tragfähigkeiten zu rechnen.

8.1.5 Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen

Der Abbrand des Holzes im Anschlussbereich ist maßgebliche Ursache für die Entfestigung der Verbindungen. Die Abbrandtiefe wird gegenüber der ungestörten Bauteilfläche infolge des zusätzlichen Temperatureintrags der Verbindungsmittel erhöht. Für bestimmte Anwendungsfälle kann es daher zweckmäßig sein, diesen zusätzlichen Temperatureintrag durch Schutzmaßnahmen zu verzögern. Es kommt dabei vor allem darauf an, dass die Verbindungsmittel im Kopfbereich vor direkter Brandbeanspruchung geschützt werden. Möglichkeiten der praktischen Ausführung liegen in der Anbringung von Plattenmaterialien im Anschlussbereich oder in der Applikation von Brandschutzanstrichen (vgl. [2]). Der in diesem Vorhaben untersuchte Anstrich des Bleches eines Balkenschuhs zeigte gute Ergebnisse. Diese könnten weiter gesteigert werden, indem neben dem Balkenschuh nach der Montage auch die Verbindungsmittelköpfe angestrichen werden.

Grundsätzlich sind positive Effekte auch durch eine Abdeckung von Teilbereichen der Verbindung zu erwarten, z. B. durch eine oberseitig aufgebrachte Abdeckung, wie im Falle von Fußböden oder Dächern. Auf diese Weise wird zudem ein Brandgaseintritt in die Fuge zwischen Haupt- und Nebenträger und eine daraus folgende Temperaturerhöhung behindert. Diese Variante wurde im Hinblick auf eine allgemeingültige Aussagekraft der Ergebnisse nicht untersucht.

Aus der Bestimmung der Kalttragfähigkeit ist festzustellen, dass die Tragfähigkeit der Balkenschuhe im Verhältnis zu der maximalen Tragfähigkeit der Holzquerschnitte sehr hoch ist. In vielen praktischen Anwendungsfällen ist es daher sinnvoll, Holzquerschnitte mit größerer Höhe als der Balkenschuh zu verwenden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Verformungsbeschränkungen oder sonstige Gebrauchstauglichkeitsnachweise bemessungsmaßgebend werden. Eine größere Höhe des Nebenträgers als die Höhe des Balkenschuhs wirkt sich in jedem Fall positiv auf die Tragfähigkeit der Verbindung im Brandfall aus, da der Einfluss aus dem Abbrand von der Oberseite ähnlich wie bei einer Abdeckung verringert oder ganz ausgeschlossen wird

8.2 Vollgewindeschrauben

8.2.1 Typisches Brandverhalten der Verbindungen

Zusammenfassend lassen sich für das Trag- und Versagensverhalten von gekreuzten Vollgewindeschrauben im Brandfall die folgenden typischen Merkmale ableiten:

- Aufgrund der Temperatureinleitung durch die Verbindungsmittel oder das Holz in die Verbindung reduziert sich der Auszieh Widerstand der Vollgewindeschrauben im Vergleich zur Prüfung unter Raumtemperatur.
- Bei Erreichen der maximalen Tragfähigkeit wird die Schraube, die im Hauptträger eingedreht wurde, aus dem Holz gezogen. Die zweite Schraube, die über den Nebenträger eingedreht wurde, wurde stark gebogen. Erst beim Ausziehen der Schraube wird eine Relativverschiebung zwischen Haupt- und Nebenträger hervorgerufen. Wie unter Raumtemperatur ist das Versagen spröde und das Verformungsverhalten zeigt sich nur als geringfügig duktil.
- Der Nebenträger kann sich im Versuch in seiner Längsrichtung vom Hauptträger weg verschieben und gleichzeitig in Krafrichtung nach unten abgleiten.

8.2.2 Empfehlungen hinsichtlich Geometrie und Aufbau

Für Auswahl und Gestaltung von unter 45° gekreuzten Vollgewindeschrauben, die eine ausreichende und definierbare Tragfähigkeit über eine 30-Minütige oder 60-Minütige Brandeinwirkung erhalten sollen, können die folgenden Empfehlungen abgeleitet werden:

- Der Mindestquerschnitt der Nebenträger ergibt sich in Abhängigkeit der Wahl der Holzüberdeckung und Schutzmaßnahmen an den Schraubenköpfen. Diese wird in Abhängigkeit des gewünschten Verhältnisses zwischen Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der charakteristischen Kalttragfähigkeit gewählt.
- Bei geschützten Schraubenköpfen sollte für eine 30-Minütige Brandbeanspruchung ein seitlicher Randabstand von $a_{4,c} = \max\left\{29 \text{ mm} + \frac{d}{2}; 21 \text{ mm} + 1,5 \cdot d\right\}$ und ein Abstand unter der Schraubenspitze a_3 von 29 mm gewählt werden, um ein Verhältnis zwischen einer Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit unter Raumtemperatur von $\mu_{fi} \geq 0,5$ zu erhalten, sofern Brettchichtholz verwendet wird. Bei einer 60-Minütigen Beanspruchung ist bei Verwendung von Brettchichtholz ein seitlicher Randabstand von $a_{4,c} = 61 \text{ mm} + \frac{d}{2}$ und eine Überdeckung der Schraubenspitze von mindestens 61 mm zu empfehlen, um ein Verhältnis von $\mu_{fi} \geq 0,5$ zu erlangen.

- Größere Holzüberdeckungen der Vollgewindeschrauben, die größere Querschnitte in der Höhe und/oder der Breite hervorrufen, ergeben ausschließlich positive Einflüsse auf die Tragfähigkeit im Brandfall, sowohl in den Absolutwerten als auch relativ zur Kalttragfähigkeit.
- Vollgewindeschrauben sollten bei ungeschütztem Schraubenkopf mit möglichst kleinem Durchmesser und großer Länge eingesetzt werden, damit die Temperatur durch ein günstiges Verhältnis von Schraubenquerschnittsfläche zu Schraubenumfang an das Holz abgeleitet werden kann.

8.2.3 Bemessungsansätze

Verbindungen mit Vollgewindeschrauben können bei ausreichender Abdeckungen des Schraubenkopfes und Einhaltung eines Mindestrandabstandes $a_{4,c}$ und einer Überdeckung der Schraubenspitze a_3 sowie eines Mindestabstandes zwischen den Schrauben a_2 (vgl. Tabelle 8-1) im Brandfall Lasten in Höhe von ca. 50-60 % der rechnerischen charakteristischen Kalttragfähigkeit aufnehmen (vgl. Abschnitt 5.3.4). Die rechnerische Belastbarkeit der Verbindungen wurde für jeden Prüfkörper einzeln mit der individuell vorliegenden Rohdichte ermittelt. Die Ergebnisse sind auch auf andere übliche und zulässige Rohdichten der verwendeten Holzarten übertragbar.

Tabelle 8-1: Bemessungsansätze für notwendige Schraubenabstände im Brandfall bei ausreichend abgedeckten Schraubenkopf

Brand dauer	Brettschichtholz (Nadelholz und Buche mit $\rho_k \geq 290\text{kg/m}^3$)	Vollholz (Nadelholz und Buche mit $\rho_k \geq 290\text{kg/m}^3$)
30 min	$a_{4,c} = \max \left\{ 29 \text{ mm} + \frac{d}{2}; \beta_n \cdot t_{d,fi} + 1,6 \cdot d \right\}$	$a_{4,c} = \max \left\{ 33 \text{ mm} + \frac{d}{2}; \beta_n \cdot t_{d,fi} + 1,6 \cdot d \right\}$
	$a_{4,c} = \max \left\{ 29 \text{ mm} + \frac{d}{2}; 21 \text{ mm} + 1,6 \cdot d \right\}$	$a_{4,c} = \max \left\{ 33 \text{ mm} + \frac{d}{2}; 24 \text{ mm} + 1,6 \cdot d \right\}$
	$a_3 = 29 \text{ mm}$	$a_3 = 33 \text{ mm}$
	$a_2 = 2,5 \cdot d$	$a_2 = 2,5 \cdot d$
60 min	$a_{4,c} = 61 \text{ mm} + \frac{d}{2}$	$a_{4,c} = 69 \text{ mm} + \frac{d}{2}$
	$a_3 = 61 \text{ mm}$	$a_3 = 69 \text{ mm}$
	$a_2 = 2,5 \cdot d$	$a_2 = 2,5 \cdot d$

mit:

β_n Bemessungswert der Abbrandraten in mm/min nach DIN EN 1995-1-2

$t_{d,fi}$ Dauer der Brandbeanspruchung in min

ρ_k charakteristische Rohdichte des Holzes in kg/m³

Versuche von Grabner und Ringhofer zu den Einflussparametern auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Schrauben [15] zeigen, dass eine ausreichende Ausziehfestigkeit bei Einhaltung eines Mindestrandabstandes $a_{4,c}$ von mindestens $1,6 \cdot d$ erreicht werden kann. Diese Versuche wurden in Brettsperrholz-Schmalflächen durchgeführt, sind jedoch auf Vollholz und Brettschicht übertragbar. Auch im Brandfall soll sichergestellt werden, dass nach Abbrand des Holzes dieser Mindestrandabstand von $a_{4,c} = 1,6 \cdot d$ vorliegt. Um für alle Schraubendurchmesser gleiche Verhältnisse zwischen der Querkrafttragfähigkeit im Brandfall und der Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur zu erhalten, ergibt sich der geforderte Mindestrandabstand $a_{4,c}$ aus dem Maximum aus $\beta_n \cdot t_{d,fi} + 1,6 \cdot d$ oder aus $29 \text{ mm} + \frac{d}{2}$, $33 \text{ mm} + \frac{d}{2}$, $61 \text{ mm} + \frac{d}{2}$ oder $69 \text{ mm} + \frac{d}{2}$, das bei eindimensionalem Wärmeeintrag nach Gleichung (18) eine Maximaltemperatur entlang der Schraube von ca. 75-100°C gewährleistet.

Bei ungeschützten Schraubenköpfen muss durch den zusätzlichen Wärmeeintrag über den Kopf der seitliche Randabstand erhöht werden, um benötigte Lastverhältnisse von $\mu_{fi} = 28 - 51 \%$ zu erreichen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Mit Hilfe der Parameterstudien kann abgeschätzt werden, welche Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Durchmessers und der Länge der Schraube vorliegen, sofern der Temperatureintrag ausschließlich über den Kopf und nicht über die Längsseite der Schraube eingetragen wird.

Verbindungen mit gekreuzten Vollgewindeschrauben können auch durch mehrere parallel angeordnete Schraubenpaare hergestellt werden. Bei Einhaltung der seitlichen Randabstände $a_{4,c}$ der äußeren beiden Schrauben und der Mindestüberdeckung der Schraubenspitzen a_3 , sowie der Schraubenabstände a_2 zwischen den Schrauben kann von gleichen Verhältnissen zwischen der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur und der Querkrafttragfähigkeit unter Brandbeanspruchung wie bei einem Schraubenpaar ausgegangen werden.

8.2.4 Empfehlungen hinsichtlich Schutzmaßnahmen

Die unbelasteten Brandversuche zeigen, dass verschiedene Randabstände $a_{4,c}$ bei ungeschützten Schraubenköpfen zu unterschiedlichen Temperaturen entlang der Schraube führen. Je größer die seitliche Überdeckung gewählt wird, desto geringer wird die Temperatur

entlang der Schraube. Bei genügend großer seitlicher Überdeckung ($a_{4,c} = 3 \cdot d + 0,7 \frac{mm}{min} \cdot 30 \text{ min} + 7 \text{ mm}$) wird die Temperatur entlang der Schraube überwiegend über den Wärmeeintrag am Schraubenkopf verursacht. In Abhängigkeit der Dicke, Länge und des Materials der Schraube kann die Temperatur unterschiedlich stark ins Holz abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 4.3.2 und Abschnitt 4.4.2).

Eine ausreichende Abdeckung des Schraubenkopfes führt in den belasteten Brandversuchen zu einer gleichmäßigen Temperaturbeanspruchung entlang der Schraube. Je nach Dauer der Brandbeanspruchung und des erwünschten Auslastungsverhältnisses zwischen Kalttragfähigkeit und der Tragfähigkeit im Brandfall kann die seitliche ($a_{4,c}$) und die untere (a_3) Mindestüberdeckung der Schraube abgeleitet werden.

Bei ungeschützten Schraubenköpfen muss die seitliche und untere Überdeckung der Schraube deutlich erhöht werden, so dass die Temperaturbeanspruchung entlang der Schraube ausschließlich über den Kopf erfolgt.

Je länger die Schraube für die Verbindung gewählt wird, desto besser kann die Temperatur ins Holz abgeführt werden.

Versenkiefen von 10 mm bringen nur geringe Vorteile im Vergleich zur üblichen bündigen Verschraubung. Die Schraubenköpfe erreichen nahezu gleiche Maximaltemperaturen wie beim bündigen Einschrauben. Die Verkohlungstiefe entlang der Schraube reduziert sich jedoch um ca. 10 mm bei Schrauben des Durchmessers von 8 mm und 12 mm und einer Länge von 200 mm. Dies hat zur Folge, dass ein etwas längerer Bereich der Schraube Ausziehkräfte vorweisen kann. Im verkohlten Bereich liegt keine Ausziehfestigkeit der Schraube vor. In den Bereichen unterhalb der Verkohlung entlang der Schraube entstehen in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung unterschiedliche Ausziehkräfte.

Versenkiefen von 20 mm reduzieren die Temperaturbeanspruchung über den Schraubenkopf. Dadurch entsteht eine geringere Verkohlungstiefe entlang der Schraube und demnach eine erhöhte Ausziehfestigkeit.

Eine Überdeckung des Schraubenkopfes durch einen Holzstößel oder eine Holzplatte der Dicke von mindestens 20 mm ruft eine deutlich geringere Beanspruchung der Schraube hervor. Um ein ausreichendes Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit im Brandfall im Vergleich zur Querkrafttragfähigkeit unter Normaltemperatur zu erhalten kann bei geschütztem Schraubenkopf im Vergleich zur bündig eingedrehten Schraube die seitliche Überdeckung signifikant verkleinert werden und die benötigte Breite des Querschnitts reduziert werden.

8.2.5 Schlussfolgerung

Um feststellen zu können, inwiefern sich die benötigten Querschnitte für Haupt- und Nebenträger für die Bemessung im Brandfall verändern, werden die benötigten Querschnitte in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen in folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 8-2 gibt die Mindestquerschnitte von Haupt-Nebenträger-Verbindungen an, die durch die Bemessung unter Raumtemperatur entstehen. In Tabelle 8-3 sind die Mindestquerschnitte für Haupt- und Nebenträger zu finden, die bei einer 30 Minütigen Brandbeanspruchung einer Haupt-Nebenträger-Verbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben gefordert werden. Voraussetzung ist jedoch, dass der Kopf der Schrauben geschützt ist und eine untere Überdeckung der Schrauben von 29 mm und eine seitliche Überdeckung von $a_{4,c} = \max\left\{29 \text{ mm} + \frac{d}{2}; 21 \text{ mm} + 1,6 \cdot d\right\}$ vorliegt. Diese Gegebenheiten führen bei 30 minütiger Brandbeanspruchung zu einem Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit von $\mu_{fi} = F_{fi} / F_k$ von $\geq 0,58$.

In Tabelle 8-4 werden die Mindestquerschnitte dargestellt, die sich nach einer Berechnung nach DIN EN 1995-1-2 bei einer 30 Minütigen Brandbeanspruchung und einem Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit $\mu_{fi} = F_{fi} / F_k$ von 0,52 bei einem Randabstand $a_{4,c}$ von 33 mm ergeben.

Tabelle 8-4 lässt sich sehr gut mit Tabelle 8-3 vergleichen, da hier in etwa gleich große Randabstände vorliegen. In Tabelle 8-4 ist der Randabstand konstant mit 33 mm vorgegeben. In Tabelle 8-3 ergibt sich der Randabstand $a_{4,c}$ durch die Addition von 29 mm mit dem halben Durchmesser der Schraube oder durch die Summe aus 21 mm mit dem 1,6-fachen Durchmesser. Dabei ergeben sich Randabstände von 32-40 mm.

Tabelle 8-2: Mindestquerschnitte der Haupt- und Nebenträger in Abhängigkeit der Durchmesser der gekreuzten Vollgewindeschrauben unter Raumtemperatur nach Zulassung [48] (vgl. Tabelle 2-1)

Durchmesser [mm]		6	8	10	12
Schraubenlänge [mm]	$l = 4 \cdot a_{3,c} \cdot \sqrt{2} = 20 \cdot d \cdot \sqrt{2}$	170	226	283	339
Gewählte Länge [mm]		180	240	300	350
b_{\min} NT [mm]	$b_{\min} = 2 \cdot a_{4,c} + \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot d \\ 2,5 \cdot \left(1 - \frac{a_k}{180} \right) \end{array} \right.$	45	60	75	90
h_{\min} NT [mm]	$h_{\min} = \frac{l_{\text{gewählt}}}{\sqrt{2}} + 10\text{mm}$	137	180	222	257
b_{gew} NT [mm]		60	60	80	100
h_{gew} NT [mm]		140	180	220	260
b_{\min} HT [mm]	$b_{\min} = 2 \cdot a_{3,c} + 5\text{mm}$	65	85	105	125
h_{\min} HT [mm]	$h_{\min} = \frac{l_{\text{gewählt}}}{\sqrt{2}} + 10\text{mm}$	137	180	222	257
b_{gew} HT [mm]		80	100	120	140
h_{gew} HT [mm]		140	180	220	260

Tabelle 8-3 : Mindestquerschnitte der Haupt- und Nebenträger in Abhängigkeit der Durchmesser der Vollgewindeschrauben bei 30 minütiger Brandbeanspruchung nach ETK mit Mindestholzüberdeckung aus Brandversuchen

Durchmesser [mm]		6	8	10	12
Gewählte Länge [mm]		180	240	300	350
b_{\min} NT [mm]	$b_{\min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 29\text{mm} + 3,5 \cdot d \\ 2 \cdot 21\text{mm} + 5,7 \cdot d \end{array} \right.$	79	88	99	111
h_{\min} NT [mm]	$h_{\min} = \frac{l_{\text{gewählt}}}{\sqrt{2}} + 29\text{mm}$	166	209	251	286
b_{gew} NT [mm]		80	100	100	120
h_{gew} NT [mm]		160	200	240	280
b_{\min} HT [mm]	$b_{\min} = 2 \cdot a_{3,c} + 29\text{mm} + d/2$	92	113	134	155
h_{\min} HT [mm]	$h_{\min} = \frac{l_{\text{gewählt}}}{\sqrt{2}} + 29\text{mm}$	166	209	251	286
b_{gew} HT [mm]		100	120	140	160
h_{gew} HT [mm]		160	200	240	280

Tabelle 8-4: Mindestquerschnitte der Haupt- und Nebenträger in Abhängigkeit der Durchmesser der gekreuzten Vollgewindeschrauben bei 30 minütiger Brandbeanspruchung nach ETK mit Berechnung nach DIN EN 1995-1-2

Durchmesser [mm]		6	8	10	12
Gewählte Länge [mm]		180	240	300	350
$b_{min} NT$ [mm]	$b_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 33mm + 40 mm \\ 6 \cdot d + 40 mm \end{array} \right.$	106	106	106	112
$h_{min} NT$ [mm]	$h_{min} = \frac{l_{gewählt}}{\sqrt{2}} + 33mm + 20 mm$	180	223	265	300
$b_{gew} NT$ [mm]		120	120	120	120
$h_{gew} NT$ [mm]		180	240	280	300
$b_{min} HT$ [mm]	$b_{min} = 2 \cdot a_{3,c} + 33mm + d/2$	96	117	138	159
$h_{min} HT$ [mm]	$h_{min} = \frac{l_{gewählt}}{\sqrt{2}} + 33mm + 20 mm$	180	223	265	300
$b_{gew} HT$ [mm]		100	120	140	160
$h_{gew} HT$ [mm]		180	240	280	300

mit:

- $b_{min} NT$ rechnerische Mindestbreite des Nebenträgers [mm]
- $h_{min} NT$ rechnerische Mindesthöhe des Nebenträgers [mm]
- $b_{min} HT$ rechnerische Mindestbreite des Hauptträgers [mm]
- $h_{min} HT$ rechnerische Mindesthöhe des Hauptträgers [mm]
- $b_{gew} NT$ gewählte Breite des Nebenträgers in Abhängigkeit üblicher lieferbarer Breiten [mm]
- $h_{gew} NT$ gewählte Höhe des Nebenträgers in Abhängigkeit üblicher lieferbarer Höhen [mm]
- $b_{gew} HT$ gewählte Breite des Hauptträgers in Abhängigkeit üblicher lieferbarer Breiten [mm]
- $h_{gew} HT$ gewählte Höhe des Hauptträgers in Abhängigkeit üblicher lieferbarer Höhen [mm]
- l_{gew} gewählte Schraubenlänge
- $a_{3,c}$ Randabstand zum unbeanspruchten Hirnholzende siehe Abschnitt 2.2.3
- $a_{4,c}$ Randabstand zum unbeanspruchten Querschnittsrand siehe Abschnitt 2.2.3

Beim Vergleich der Mindestquerschnitte für Haupt- und Nebenträger nach Tabelle 8-2 mit den Werten aus Tabelle 8-3 fällt auf, dass für 30 Minuten Brandbeanspruchungsdauer die gewählten Breiten und die gewählte Höhen unabhängig vom Durchmesser jeweils um 20 mm vergrößert werden müssen.

Die Gegenüberstellung der Mindestquerschnitte im Brandfall (vgl. Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4) macht deutlich, dass die benötigten Querschnitte, die in diesem Forschungsvorhaben ermittelt wurden, sich stark von den benötigten Querschnitten unterscheiden, die sich aus der Bemessung nach DIN EN 1995-1-2 ergeben.

Durch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ist bei etwa gleicher Überdeckung der Schrauben und ähnlicher Tragfähigkeit eine Reduzierung der Breite bis 40 mm möglich. Die Höhe des Querschnittes kann bei gleichen Randbedingungen ebenfalls um bis zu 40 mm reduziert werden.

Nach DIN EN 1995-1-2 können jedoch auch kleinere Randabstände verwendet werden, die eine deutliche Reduzierung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Bei der Verwendung eines Randabstandes $a_{4,c}$ von 29 mm entsteht ein Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit $\mu_{fi}=F_{fi}/F_k$ von 0,44. Unter reduzierten Randabstand werden kleinere Querschnitte möglich.

Das Forschungsvorhaben zeigt, dass auch Ausführungen mit gekreuzten Vollgewindeschrauben mit ungeschützten Schraubenköpfen möglich sind. Hierbei ist jedoch auf eine große Schraubenlänge und eine deutlich vergrößerte seitliche Überdeckung zu achten.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Recherchen, Versuche, Rechnungen und theoretischen Untersuchungen stellen den aktuellen Wissenstand zum Brandverhalten von Holzverbindungen mit den betrachteten Verbindertypen dar.

Es konnten zudem wesentliche grundsätzliche Erkenntnisse zum Verhalten von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln gewonnen werden. Hierzu wurden unter anderem temperaturabhängige Ausziehparameter für Schraubenverbindungen bestimmt.

Für Verbindungen mit Balkenschuh aus Stahlblech und Vollgewindeschrauben wurde die tatsächliche Tragfähigkeit im Brandfall experimentell bestimmt. Aus dem Vergleich der erreichten Tragfähigkeiten mit der jeweiligen Tragfähigkeit im Kaltzustand wurden detaillierte Schlüsse gezogen werden, welche Parameter sich günstig oder ungünstig auswirken.

Erforderlich für die praktische Anwendung der Ergebnisse ist in Deutschland immer ein baurechtlicher Verwendbarkeitsnachweis. Dieser erfolgt für geregelte Bauprodukte über normative Angaben, für nicht geregelte Bauprodukte in Form von Prüfzeugnissen oder Zulassungen des DIBt. Die Hersteller der betrachteten Typen von Verbindern werden durch die Forschungsergebnisse in die Lage versetzt, effizient und zweckmäßig die zur Erlangung der Verwendbarkeitsnachweise in der Regel erforderlichen Prüfserien zu konzipieren und durchzuführen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass bei entsprechender Gestaltung der Anschlussgeometrien sowohl Verbindungen mit Balkenschuh als auch mit Vollgewindeschrauben geeignet sind, eine in üblichen Bemessungssituationen ausreichende Tragfähigkeit über die Brandbeanspruchungsdauer zu erhalten.

Bei gleichen Holzquerschnitten erreichen Verbindungen mit Vollgewindeschrauben in der Regel eine geringere Tragfähigkeit im Kaltbemessungsfall als Verbindungen mit Balkenschuh, dafür sind die erreichbaren Resttragfähigkeiten nach der Brandeinwirkung verhältnismäßig höher. Dies liegt daran, dass die Schrauben durch entsprechende Holzüberdeckungen vor Temperatureinwirkung geschützt werden. Zur Bemessung dieser Holzüberdeckungen konnte ein gegenüber den aktuellen normativen Vorgaben deutlich verbesserter Vorschlag gemacht werden.

Verbindungen mit außen freiliegenden Stahlblechen haben hier prinzipiell bedingt Nachteile, da die Verbindungsmittel und Stahlbauteile ungeschützt der Brandeinwirkung ausgesetzt

sind. Aus diesem Grund ergeben sich in der Regel niedrigere Verhältnisse zur Kaltrtragfähigkeit. Bei ausreichenden Mindestquerschnitten und einer zweckentsprechenden Auswahl und Anordnung der Verbindungsmittel sind aber auch hier baupraktisch sinnvoll nutzbare Tragfähigkeiten im Brandfall erzielbar. Zur zweckmäßigen Gestaltung der Verbindungen konnten konkrete Angaben aus den Forschungsergebnissen abgeleitet werden.

Im Rahmen der belasteten Brandversuche wurden jeweils identische, unbelastete Prüfkörper mit ausgewählten Schutzmaßnahmen gleichzeitig mit untersucht. Verwendet wurden Brandschutzanstriche bei Balkenschuhverbindungen und Abdeckungen mit Plattenmaterialien bei Schraubenverbindungen. Bestimmte Schutzmaßnahmen erscheinen als geeignet, die Tragfähigkeit im Brandfall erheblich zu erhöhen. Grundsätzlich besonders sinnvoll ist der Schutz der Verbindungsmittel vor Erwärmung, da so der ohne Schutz erhöhte Abbrand im Anschlussbereich minimiert oder ganz verhindert werden kann.

Die erreichbaren Tragfähigkeiten von Verbindungen mit Schutzmaßnahmen konnten im Rahmen dieses Vorhabens nicht experimentell bestimmt werden. Versuche hierzu lassen sich aber mit den gewonnenen Erfahrungen, Messdaten und Auswertungsergebnissen zukünftig zielsicher planen und dementsprechend kostengünstig durchführen.

Im Ergebnis dieses Vorhabens konnte das Wissen über das Brandverhalten der betrachteten Holzverbindungen deutlich erweitert werden. Zudem wurden zahlreiche allgemeingültige Eigenschaften stiftförmiger Verbindungsmittel im Brandfall untersucht. Durch diese Erkenntnisse konnte eine breite Basis geschaffen werden, auch ähnliche, aber im Detail anders ausgeführte Verbinder ingenieurmäßig im Hinblick auf ihre Brandtragfähigkeit beurteilen zu können.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Zitierte Literatur

- [1] Ali, S., Hadjisophocleous, G., *Full scale tests to study the influence of various parameters on the fire performance of hybrid timber connections*, Department of civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada
- [2] Bauer, M.: *Beitrag zur Beurteilung von Haupt-Nebenträgerverbindungen unter Brandbeanspruchung*, Diplomarbeit in der Vertiefungsrichtung Holzbau, Technische Universität München, München, Juni 2010
- [3] Befestigungssystem WR von SFS intec Bemessungsgrundlagen System WR- Datenblatt Nr.01. Download von <http://www.sfsintec.biz> am 19.11.2014
- [4] Bejtka, I.: *Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben*, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe 2005
- [5] Blaß, H. J.; Beijka I.: *Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten*, Forschungsbericht, Karlsruhe 2003
- [6] Blaß, H. J.; Beijka I.; Uibel T.: *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*, Band 4 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universitätsverlag Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [7] Blaß, H. J.; Uibel, T.: *Spaltversagen von Holz in mehrreihigen Verbindungen, Erweiterung des Rechenmodells für die Rissbildung beim Eindrehen von Holzschrauben*, Band 21 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Karlsruhe
- [8] Bemessungshinweise- Hinweise zur Bemessung von tragenden SPAX-Verbindungen, Spax 2013
- [9] Carling, O.: *BRANZ STUDY REPORT No 18 Fire resistance of joint details in load-bearing timber construction – a literature survey*, Building research association of New Zealand, New Zealand 1989
- [10] Emil Vögelin AG Stahl- und Industrieprodukte: *Glühfarben und Temperaturen*, PDF Dokument, Download von www.voegelinag.ch am 05.11.2014
- [11] Frangi, A.: *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken*, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, September 2001
- [12] Fredlung, B.: *a model for heat and mass transfer in timber structures during fire*, Report TVBB-1003, Lund University, Sweden, Lund 1988
- [13] Fornather, J.; Bergmeister, K.: *Versuchsbericht, Kleinbrandversuchsreihe 3 – KBV 3, Versuche mit Verbindungsmitteln aus Stahl*, Wien, Juli 2001

- [14] Gräfe, M. et. al., *Erarbeitung weiterführender Konstruktionsregeln/-details für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Technische Universität München 2014
- [15] Grabner, M.: *Einflussparameter auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Schrauben in BSP-Schmalflächen*, Masterarbeit an der Technischen Universität Graz, April 2013
- [16] Graubner, W.: *Holzverbindungen – Gegenüberstellungen japanischer und europäischer Lösungen*, 4. Auflage, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1992
- [17] Hass, R.; Meyer-Ottens, C.; Richer, E.: *Stahlbau Brandschutz Handbuch*, Ernst & Sohn Verlag, 1993
- [18] Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Technische Universität Braunschweig, *Prüfungszeugnis Nr. 81 210a Prüfung von jeweils 4 gleichen Balkenschuh-Anschlüssen zur Verbindung von Vollholzbalken 10/18 und 12/19 [...] auf Brandverhalten [...] zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklasse [...] Braunschweig 1979*
- [19] Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Technische Universität Braunschweig, *Prüfungszeugnis Nr. 78 1690 Prüfung von jeweils 4 gleichen BMF Balkenschuh-Anschlüssen zur Verbindung von Vollholzbalken 14/20 und 10/18 [...] auf Brandverhalten [...] zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklasse [...] Braunschweig 1977*
- [20] Klingsch, W.; Tavakkol-Khah, M.; Wesche, J.; Kersken-Breadley, M.: *Temperaturentwicklung in brandbeanspruchten Querschnitten*, Forschungsvorhaben F-90/1, Bergische universität Wuppertal, MPA Braunschweig und Kerken + Partner, 1993
- [21] König, J., Walleij, L.: *One-Dimensional Charring of Timber Exposed to Standard and Parametric Fires in Initially Unprotected and Postprotected Situation*, Rapport I 9908029, Institutet för Träteknisk Forskning, Schweden, 1999
- [22] König, J., Walleij, L.: *Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires- Part 2: A Design Model for Standard Fire Exposure*, Rapport I 0001001, Institutet för Träteknisk Forskning, Schweden, 2000
- [23] Kollmann, F.; Malmquist, L.: *Über die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen*, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 14:201-204, Juni 1956
- [24] Kordina, K, Meyer-Ottens,C., *Holz-Brandschutz-Handbuch*, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, München 1983
- [25] Lache, M.: *Untersuchungen zur Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz und zur Feuerwiderstandsdauer biegebeanspruchter Brettschichtholzträger*, Doktorarbeit, Ludwig-Maximilian-Universität, München, 1992

- [26] Östman, B. et.al.: *Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe. Woodwisdom-Net* Forschungsprojekt FireInTimber. Abschlussreport. SP Trätek, Stockholm, 2010
- [27] Palma, P., Frangi, A. et. al., *Fire resistance Tests on Beam-to –column shear connections*, 8th International Conference on Structures in Fire, Shanghai, China 2014
- [28] Povel, D.: *Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall*, Fraunhofer IRB Verlag, 2002, ISBN 3-8167-6213-1
- [29] Racher, P., Dhima. D. et. al., *Fire behaviour of blind dovetail timber connections*, 8th International Conference on Structures in Fire, Shanghai, China 2014
- [30] Racher, P., Laplanche, K. et. al., *Fire resistance of joist hangers*, International Conference on Structures in Fire, Shanghai, China 2014
- [31] Richter, F.: *Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften zu 52 Eisenwerkstoffen. Stahleisen*, Sonderbericht Heft 8, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1973
- [32] Scheer, C; Peter, M.: *Holz Brandschutz Handbuch*, Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2009
- [33] Spearpoint, M.: Predict the ignition and Burning rate of wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model, National Institute of standard and Technology - NIST GCR 99-775 – Gaithersburg, MD, 1999
- [34] Steinhagen, P.: Thermal Conductivity Properties of Wood, Green or Dry, From -40°C to 100°C A Literature Review. USDA Forest Service General Technical Report FPL-9, 1977
- [35] Stöckl U.: Verhalten von standardisierten Systemverbindern im Brandfall, 4. HolzBau-Spezial Akustik Brandschutz 2013, Bad Wörrishofen
- [36] Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, *Prüfzeugnis Nr. H 7908, Versuche über die Tragfähigkeit von GH-Balkenschuhen der Firma G. Hartmann, Bad Oeynhausen*, Karlsruhe 1979
- [37] Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, Univ.-Prof. Dr. Ing. H.J. Blaß, *Gutachterliche Stellungnahme zum Tragfähigkeitsnachweis für GH-Balkenschuhe mit innenliegenden Laschen*, Karlsruhe 1997
- [38] Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, *Prüfbericht Nr. H 976115, Querzugversuche mit GH-Balkenschuhen Typ 04/Kombi mit innen- und außenliegender Lasche*, Karlsruhe 1997
- [39] Winter, S.: *Grundlagen des Brandschutzes. Informationsdienst Holz – Holzbau Handbuch, Reihe 3, Teil 4, Folge 1*. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung. München 1997

10.2 Normen und Regelwerke, Software

- [40] DIN EN 13501-2: 2010-02 „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen“
- [41] DIN EN 1990:2002 „Eurocode 0: „Grundlagen der Tragwerksplanung“
- [42] DIN EN 1991-1-2: 2010-12 „Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke“
- [43] DIN EN 1993-1-2: 2010- „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [44] DIN EN 1995-1-1: 2010-12 „Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“
- [45] DIN EN 1995-1-2: 2010-12 „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [46] DIN EN 1363-1:2012-10: „Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen“
- [47] DIN EN 1382:2000-03: „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln“
- [48] Z-9.1-519- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: Spax® –S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmitel
- [49] ETA-12/0114 - European Technical Approval: *Self-tapping screws for use in timber structures*
- [50] ETA 08/0264 - European Technical Approval: *GH Joist Hangers type TOP, 04 Kombi, 04 Kombi I, 04 I schmal, 05 Kombi, 05 Kombi I*
- [51] ETA 06/0270 - European Technical Assessment: *Simpson Strong-Tie Joist Hangers*
- [52] ETA 13/0165 - European Technical Approval: *Brandschutzgewebe DBU, Brandschutzgewebe DBU selbstklebend, Brandschutzgewebe DBU Vlies, Brandschutzmasse DBU Dispersion, Brandschutzmasse DBU Spachtel*
- [53] Entwurf DIN EN 14358:2013-09: „Holzbauwerke –Berechnung der charakteristischen 5%-Quantile und Mittelwerte für Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle“
- [54] DIN EN 26891:1991-06: *Holzbauwerke Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*

10.3 Prüfberichte zum Forschungsvorhaben

- [55] Prüfbericht Nr. 05/2013 *„Orientierende Brandversuche zur Erfassung des Brandverhaltens von Haupt-Nebenträgerverbindungen mit Vollgewindeschrauben und Balkenschuhen“*
- [56] Prüfbericht Nr. 03/2014 *„Versuche zur Erfassung der temperaturabhängigen Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben“*
- [57] Prüfbericht Nr. 04/2014 *„Brandversuche unter Belastung zur Erfassung der Tragfähigkeit von Haupt-Nebenträgerverbindungen mit Balkenschuhen im Brandfall“*
- [58] Prüfbericht Nr. 05/2014 *„Brandversuche unter Belastung zur Erfassung der Tragfähigkeit von Haupt-Nebenträgerverbindungen mit Vollgewindeschrauben im Brandfall“*

11 Anhang

11.1 Ausziehversuche an Vollgewindeschrauben

11.1.1 Maximale Ausziehfestigkeit

11.1.1.1 Maximale Ausziehfestigkeit senkrecht zur Faser

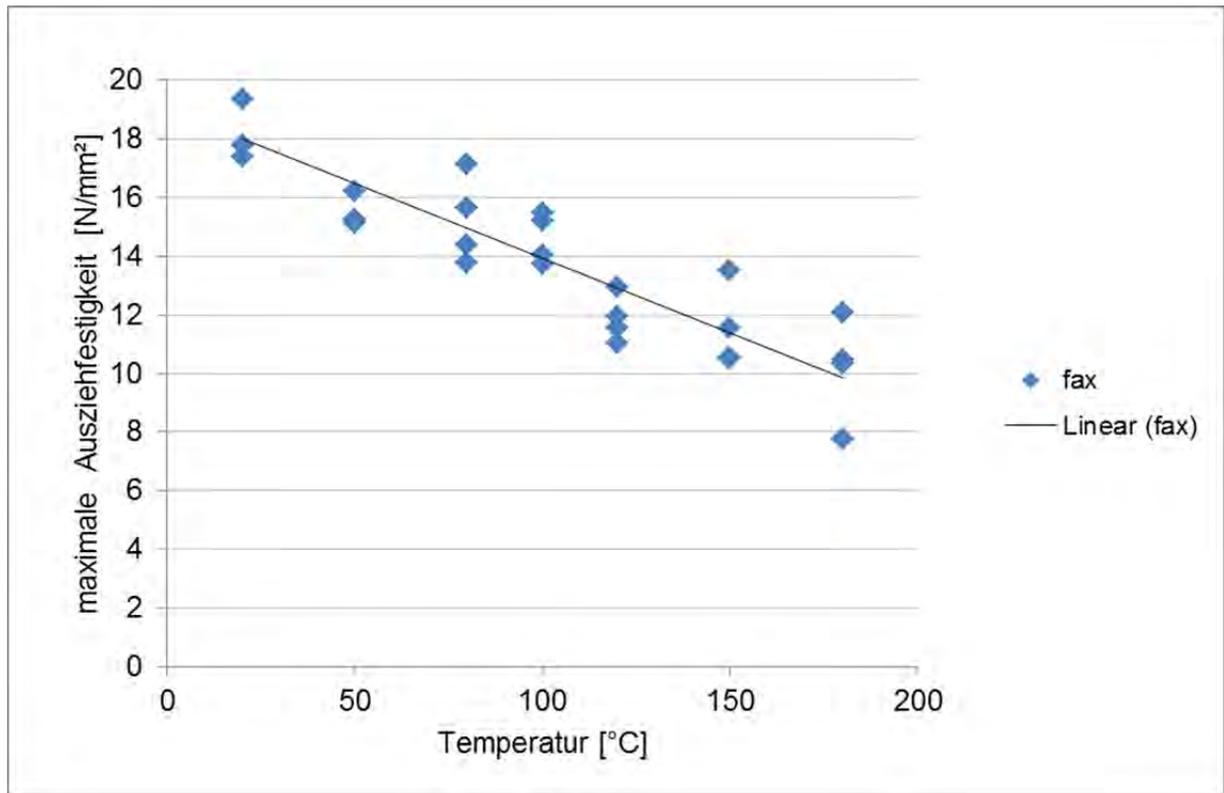


Abbildung 11-1: maximale Ausziehfestigkeit senkrecht zur Faser in Abhängigkeit der Temperatur

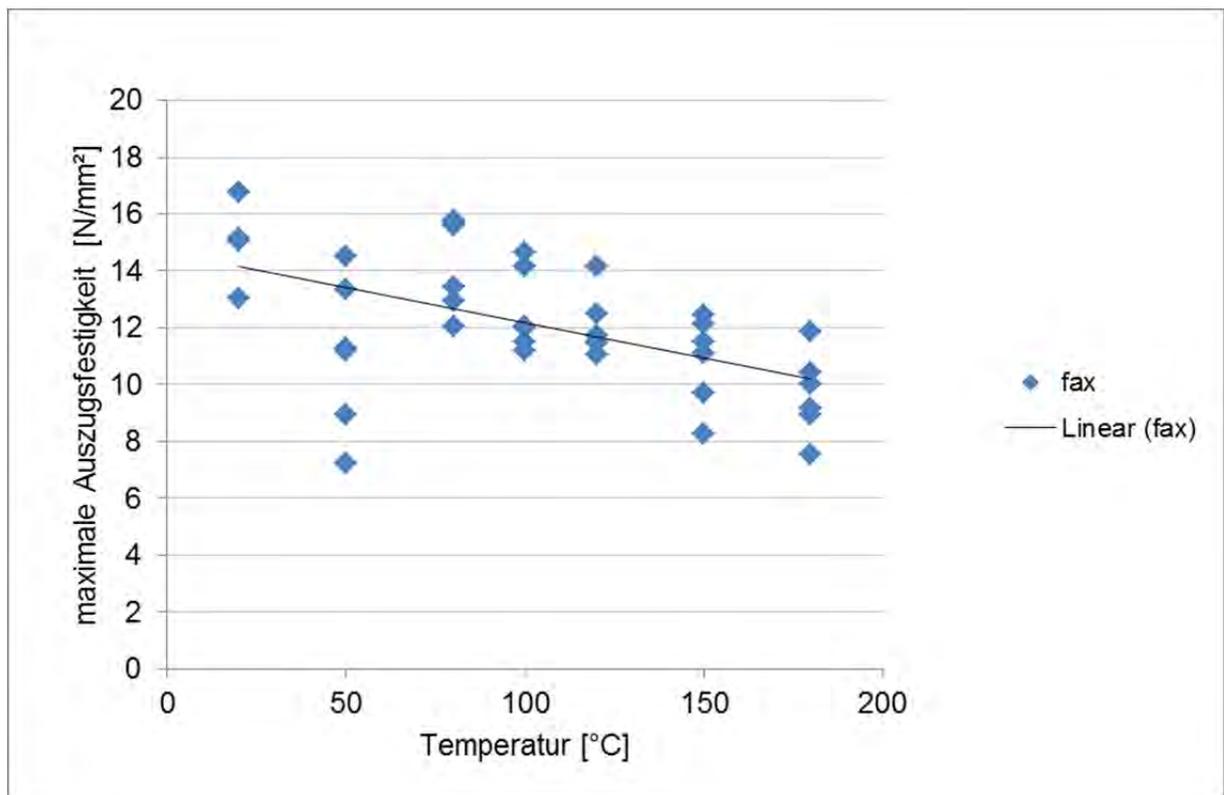
11.1.1.2 Maximale Ausziehfestigkeit parallel zur Faser

Abbildung 11-2: maximale Ausziehfestigkeit parallel zur Faser in Abhängigkeit der Temperatur

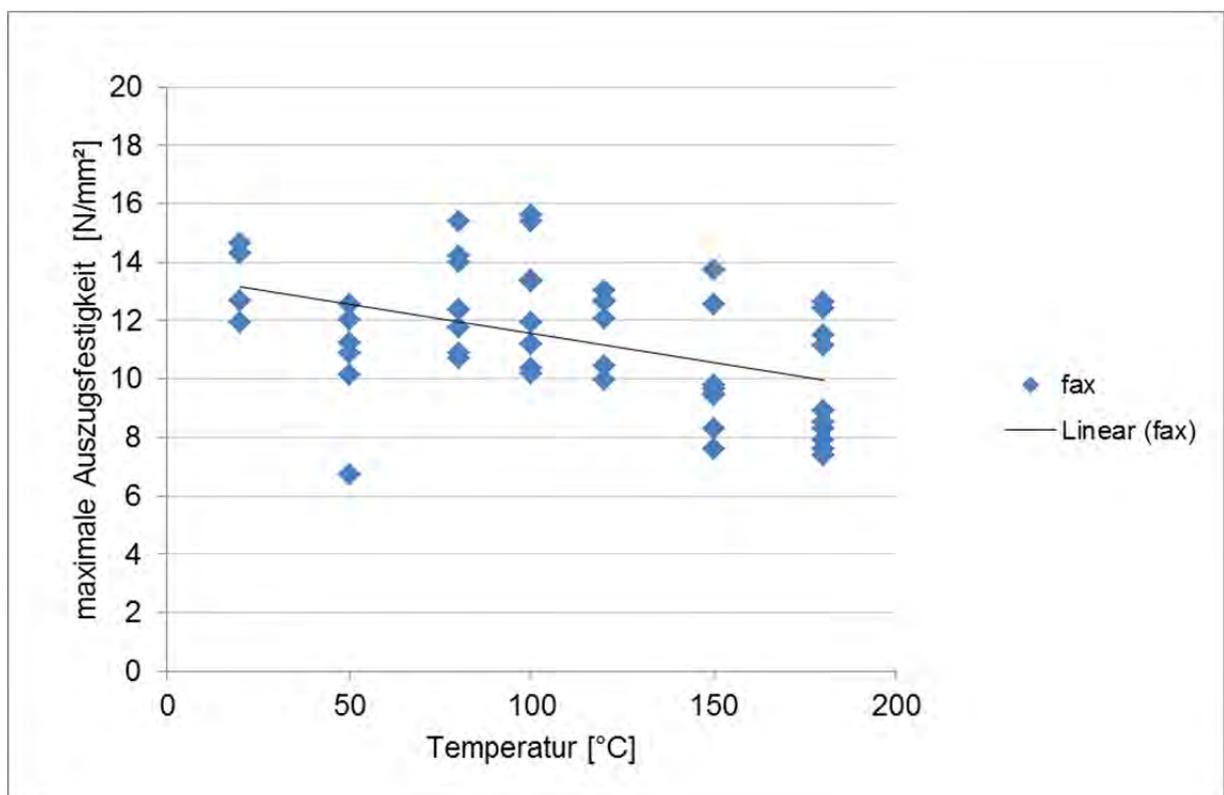
11.1.1.3 Maximale Ausziehfestigkeit unter 45° zur Faser

Abbildung 11-3: maximale Ausziehfestigkeit unter 45° in Abhängigkeit der Temperatur

11.1.2 Auswertung

11.1.2.1 Senkrecht zur Faser

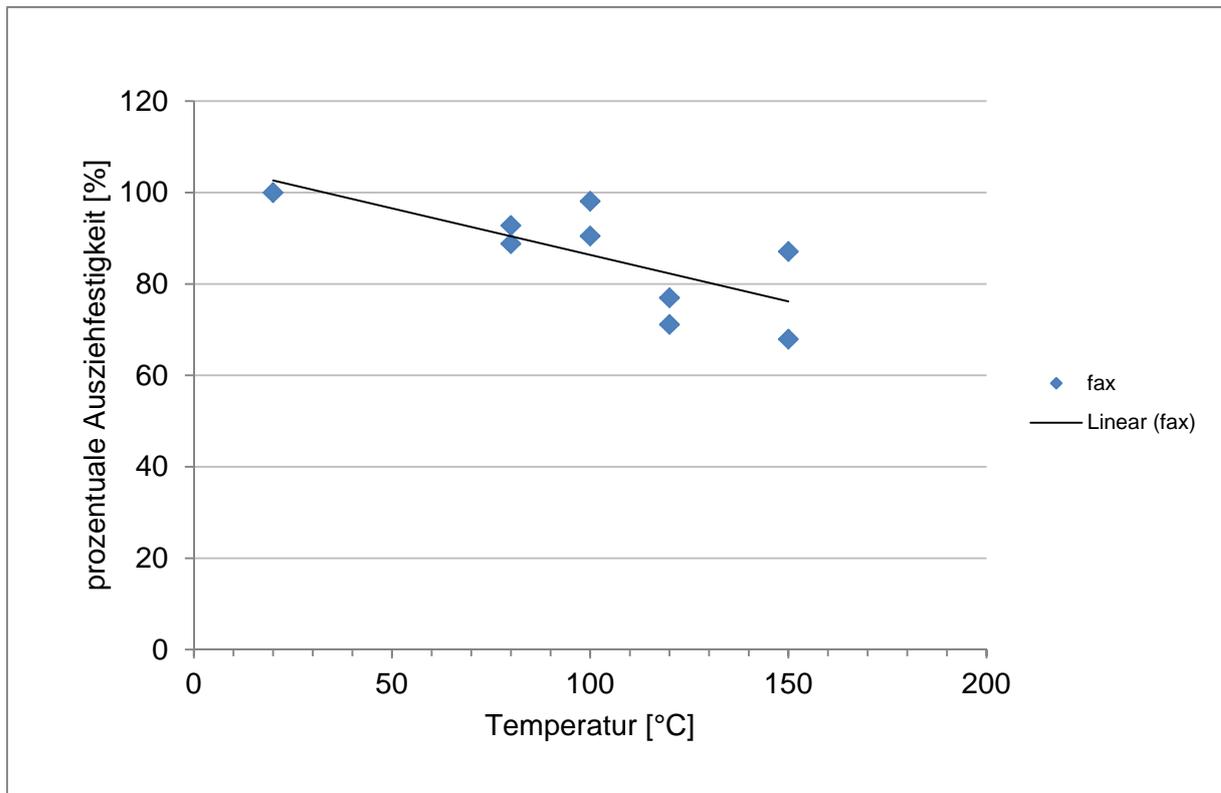


Abbildung 11-4: temperaturabhängige prozentuale Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben senkrecht zur Faser in Vollholz (Rohdichte 366 – 381 kg/m³) im Bezug zum Mittelwert der Ausziehfestigkeit bei Raumtemperatur

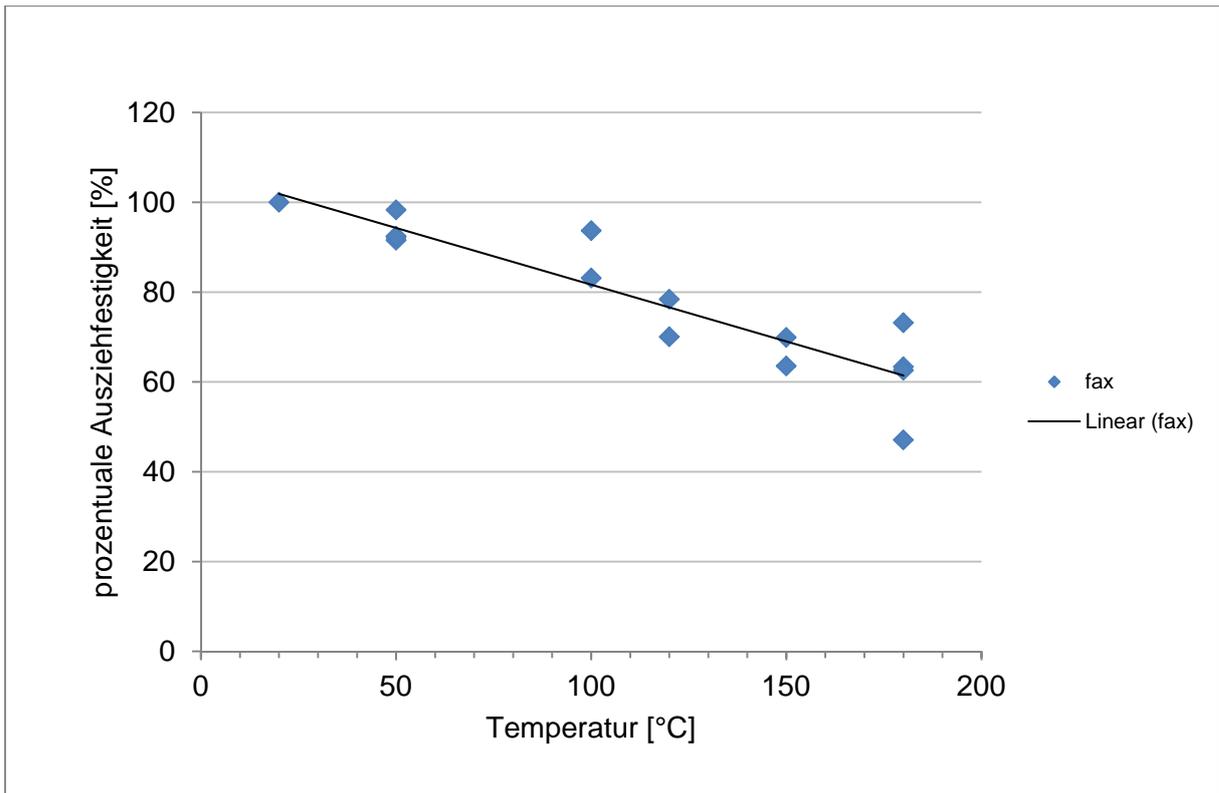


Abbildung 11-5: temperaturabhängige prozentuale Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben senkrecht zur Faser in Vollholz (Rohdichte 398 – 430 kg/m³) im Bezug zum Mittelwert der Auszugsfestigkeit bei Raumtemperatur

11.1.2.2 Parallel zur Faser

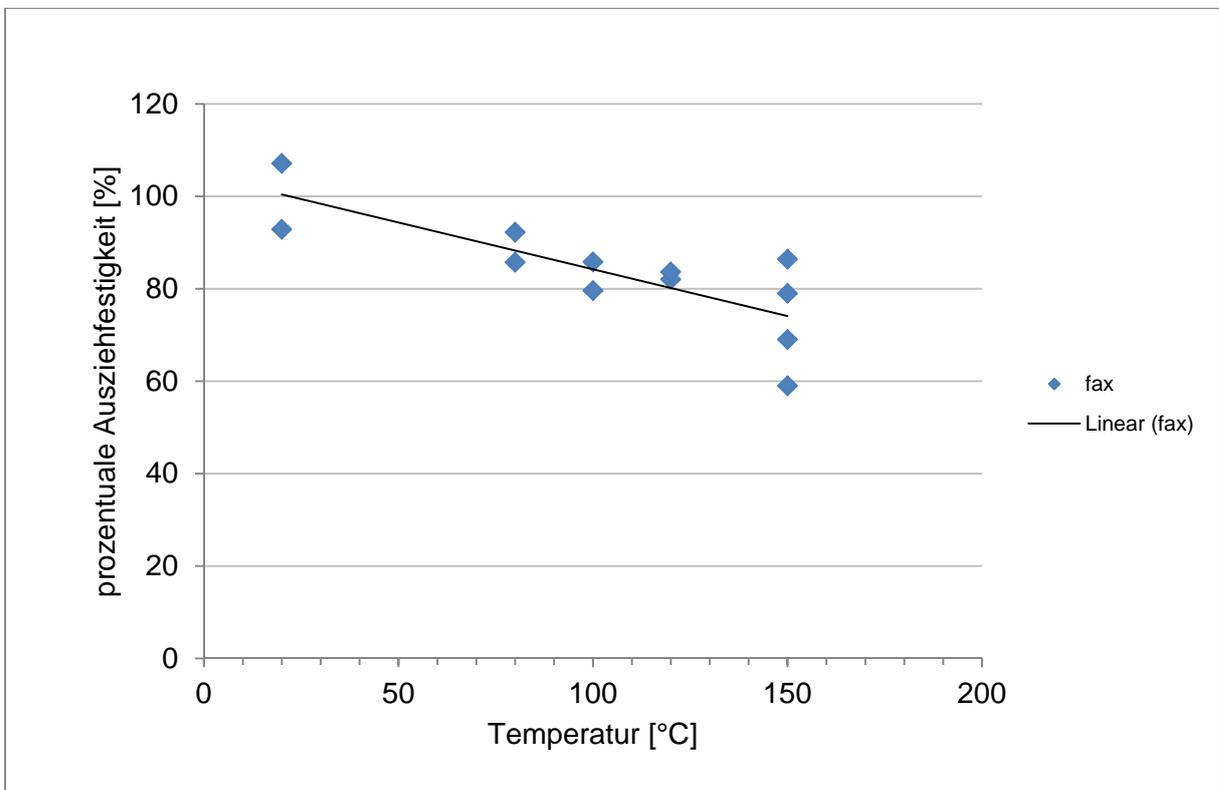


Abbildung 11-6: temperaturabhängige prozentuale Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben parallel zur Faser in Vollholz (Rohdichte 403 – 420 kg/m³) im Bezug zum Mittelwert der Auszugsfestigkeit bei Raumtemperatur

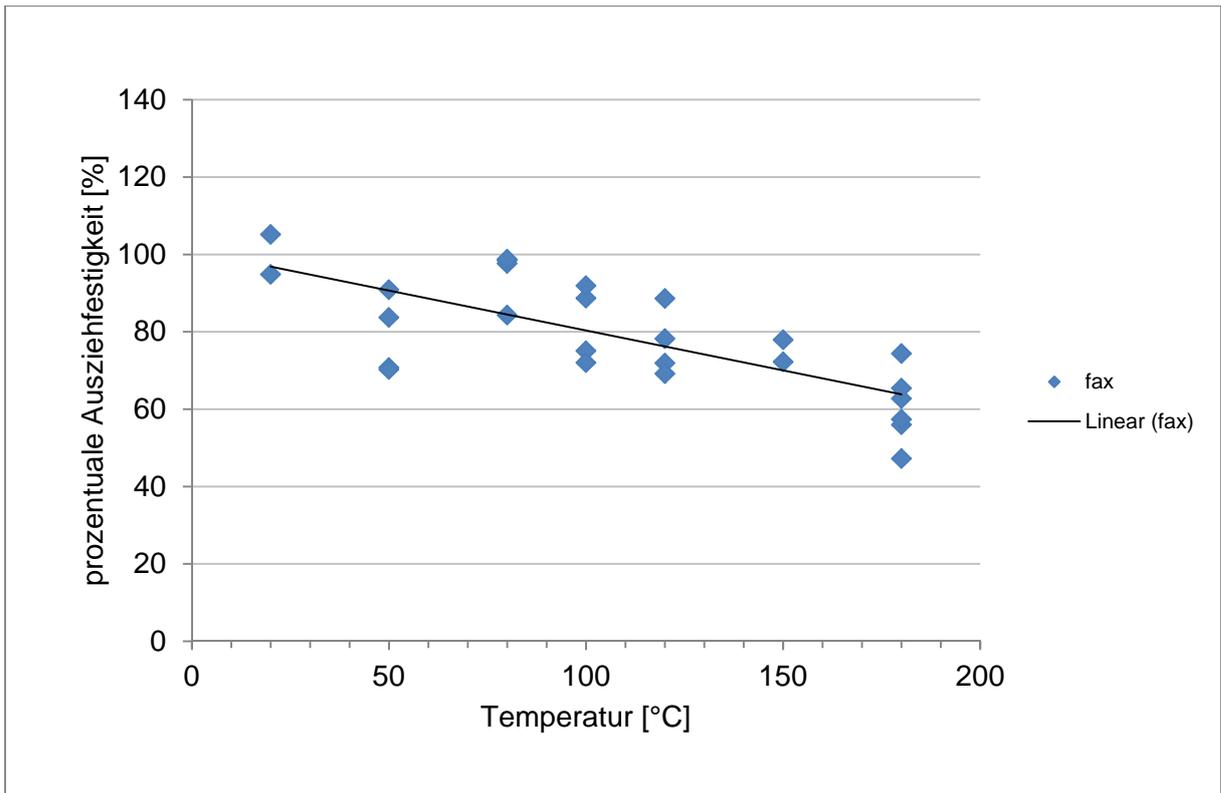


Abbildung 11-7: temperaturabhängige prozentuale Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben parallel zur Faser in Vollholz (Rohdichte 432 – 450 kg/m³) im Bezug zum Mittelwert der Ausziehfestigkeit bei Raumtemperatur

11.1.2.3 Unter 45° zur Faser

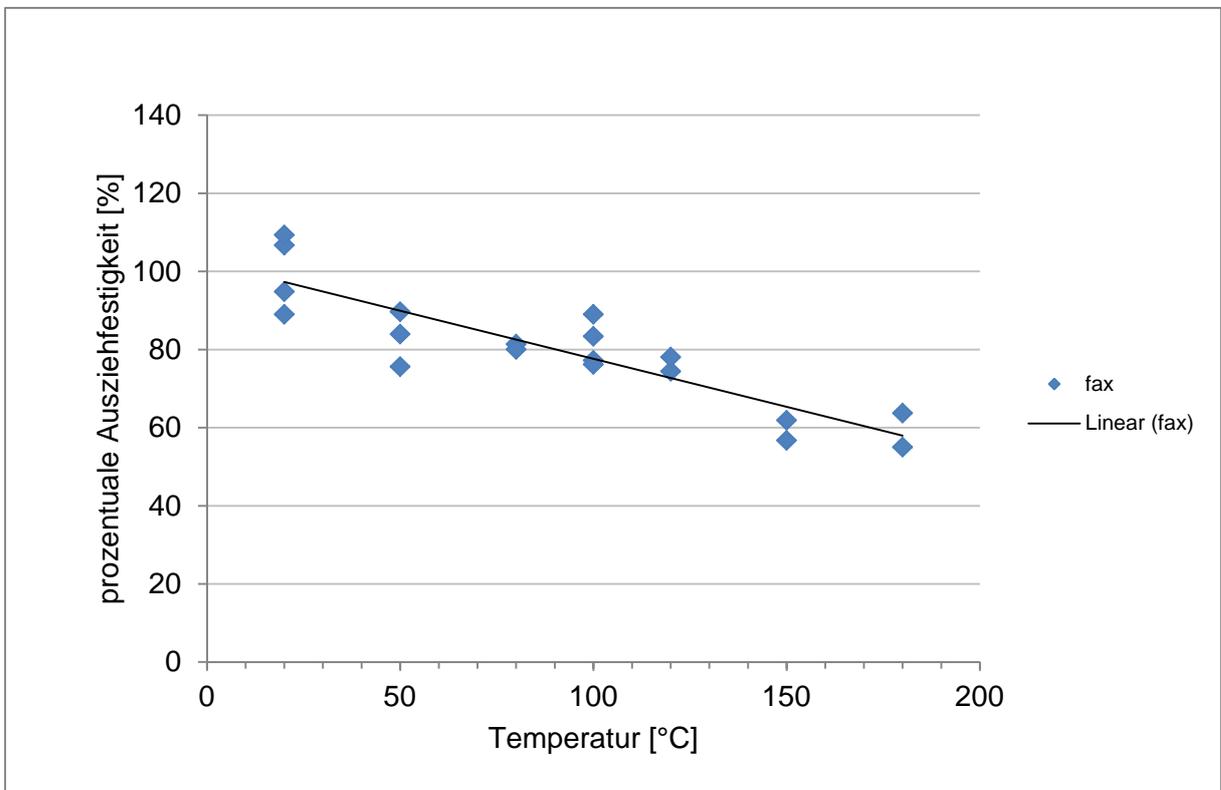


Abbildung 11-8: temperaturabhängige prozentuale Auszugsfestigkeit von Vollgewindeschrauben unter 45° in Vollholz (Rohdichte 340 – 372 kg/m³) im Bezug zum Mittelwert der Ausziehfestigkeit bei Raumtemperatur

11.2 Temperaturmesswerte Balkenschuhe

11.2.1 Unbelastete Brandversuche

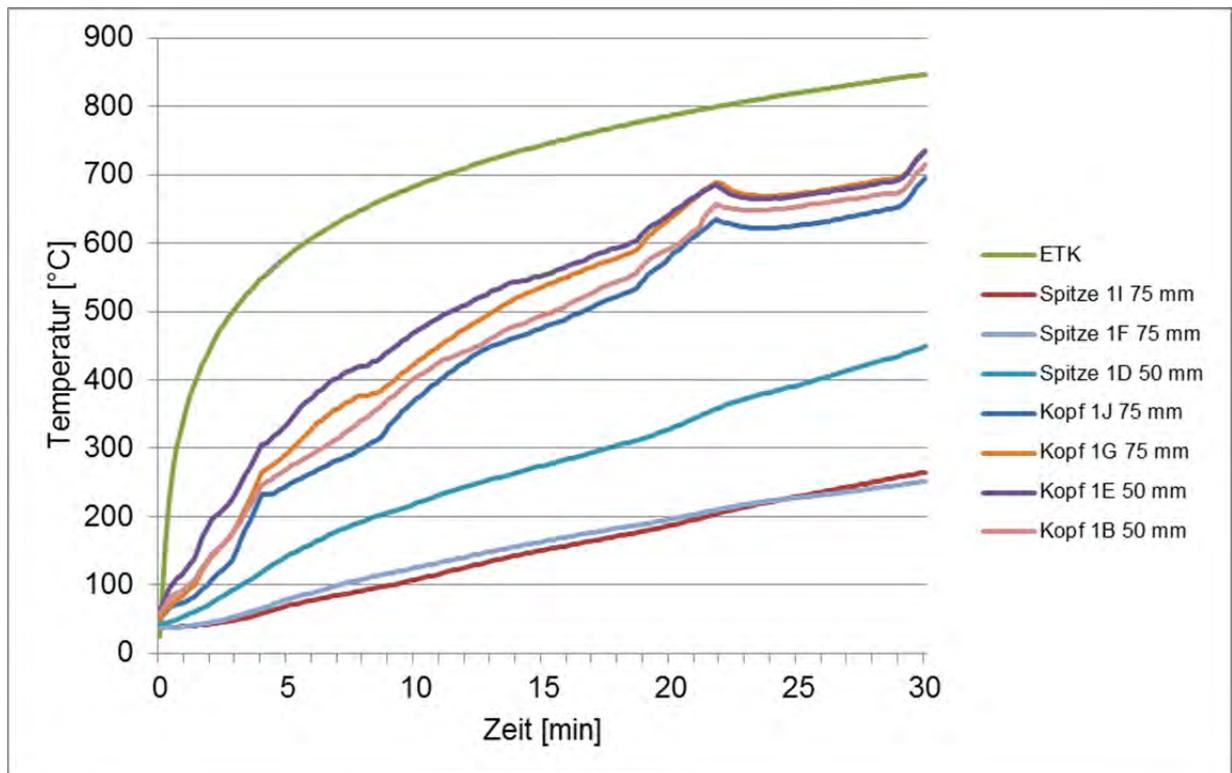


Abbildung 11-9: Vergleich der Temperaturmesswerte von Versuchskörper 1 mit Nägeln (\varnothing 4mm, $l = 50$ und 75mm)

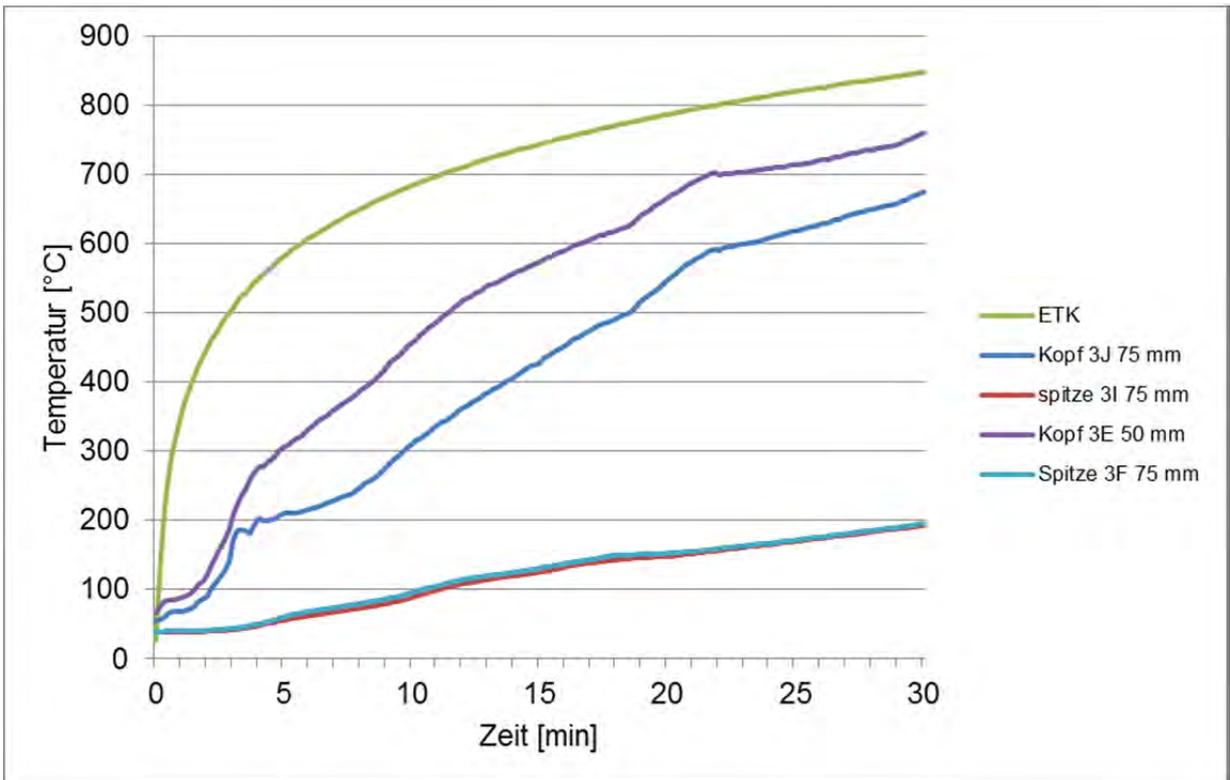


Abbildung 11-10: Vergleich der Temperaturmesswerte von Versuchskörper 3 mit Schrauben (\varnothing 5mm, l= 50 und 70mm)

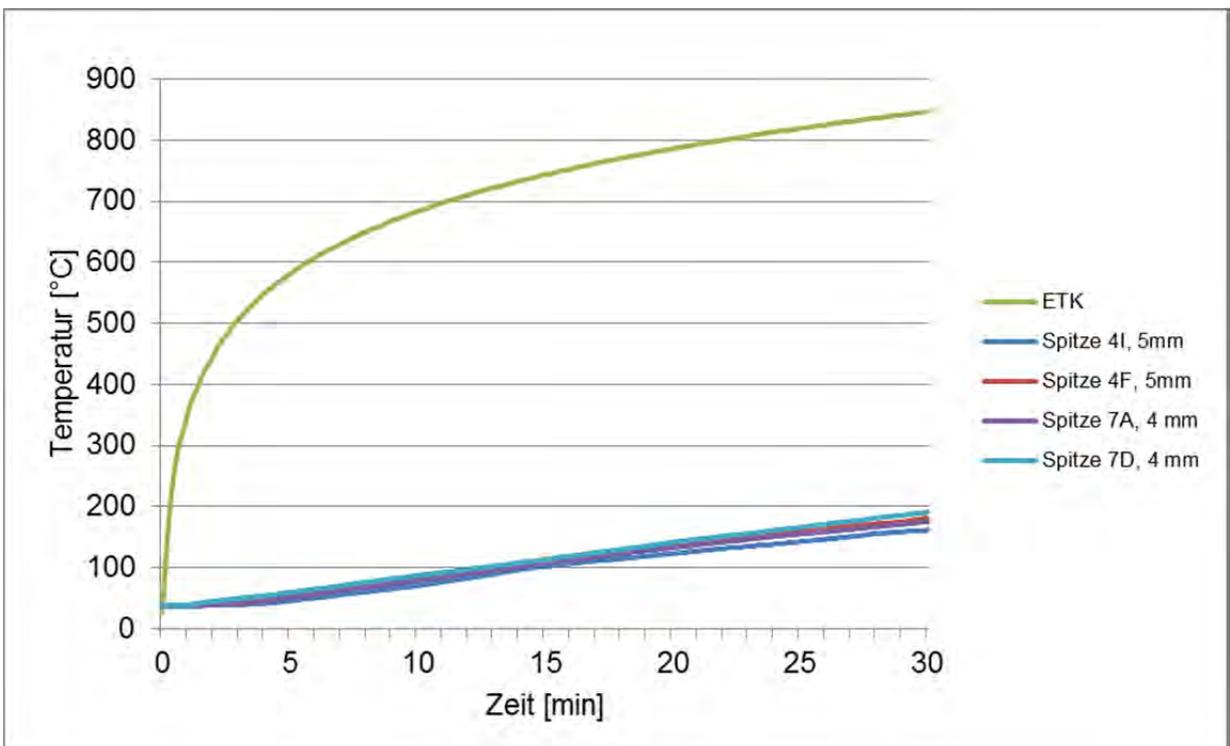


Abbildung 11-11: Vergleich der Temperaturmesswerte der Versuchskörper 4 und 7 mit Nägeln (\varnothing 4 und 5mm, l= 75 und 70mm)

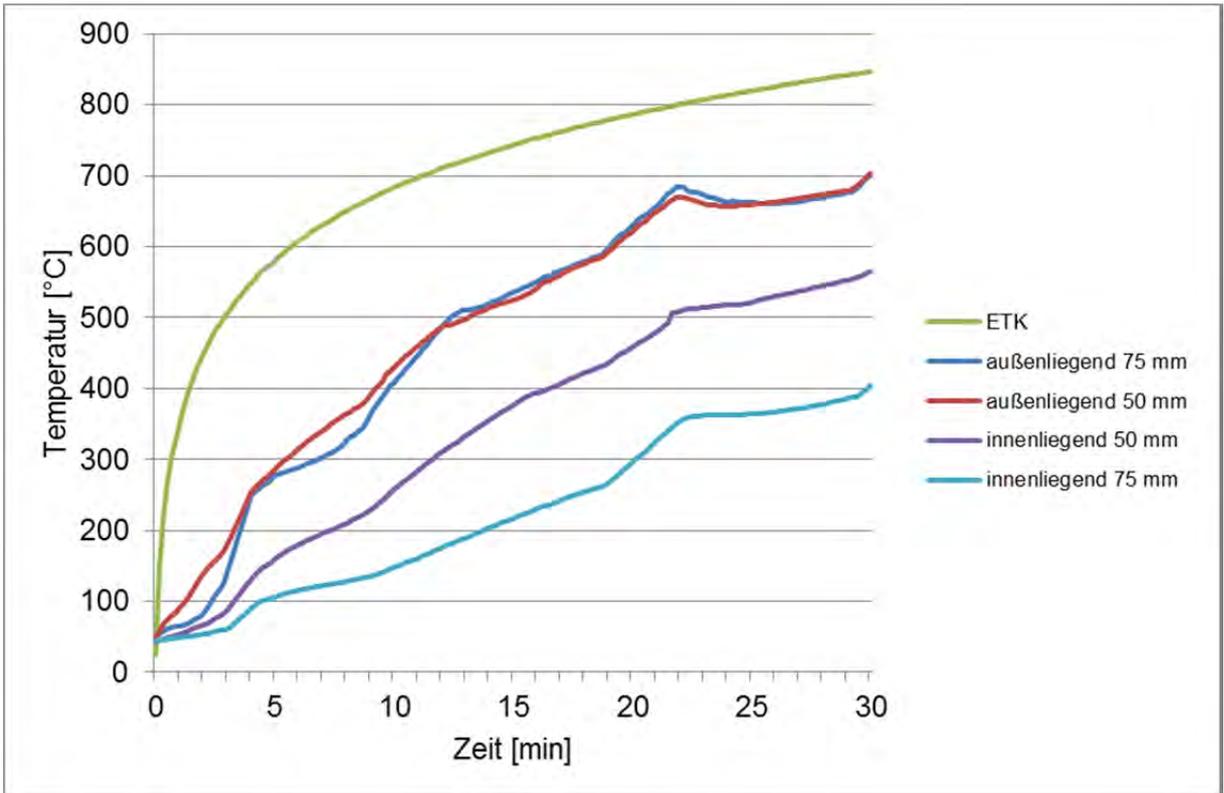


Abbildung 11-12: Vergleich der Temperaturmesswerte unter den Laschen der Versuchskörper 5 und 6 (\varnothing 5mm)

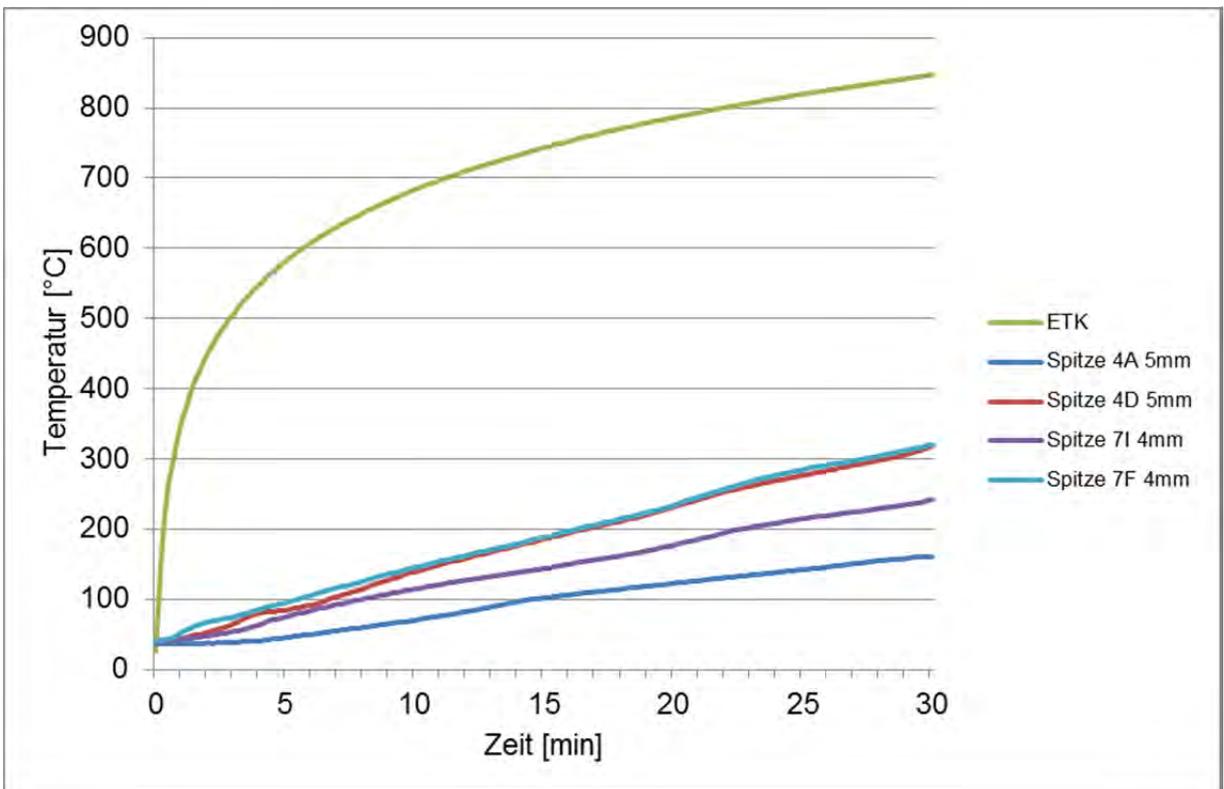


Abbildung 11-13: Vergleich der Temperaturmesswerte an den Verbindungsmittelspitzen der Versuchskörper 4 und 7 (\varnothing 4 und 5mm, $l = 50$ mm)

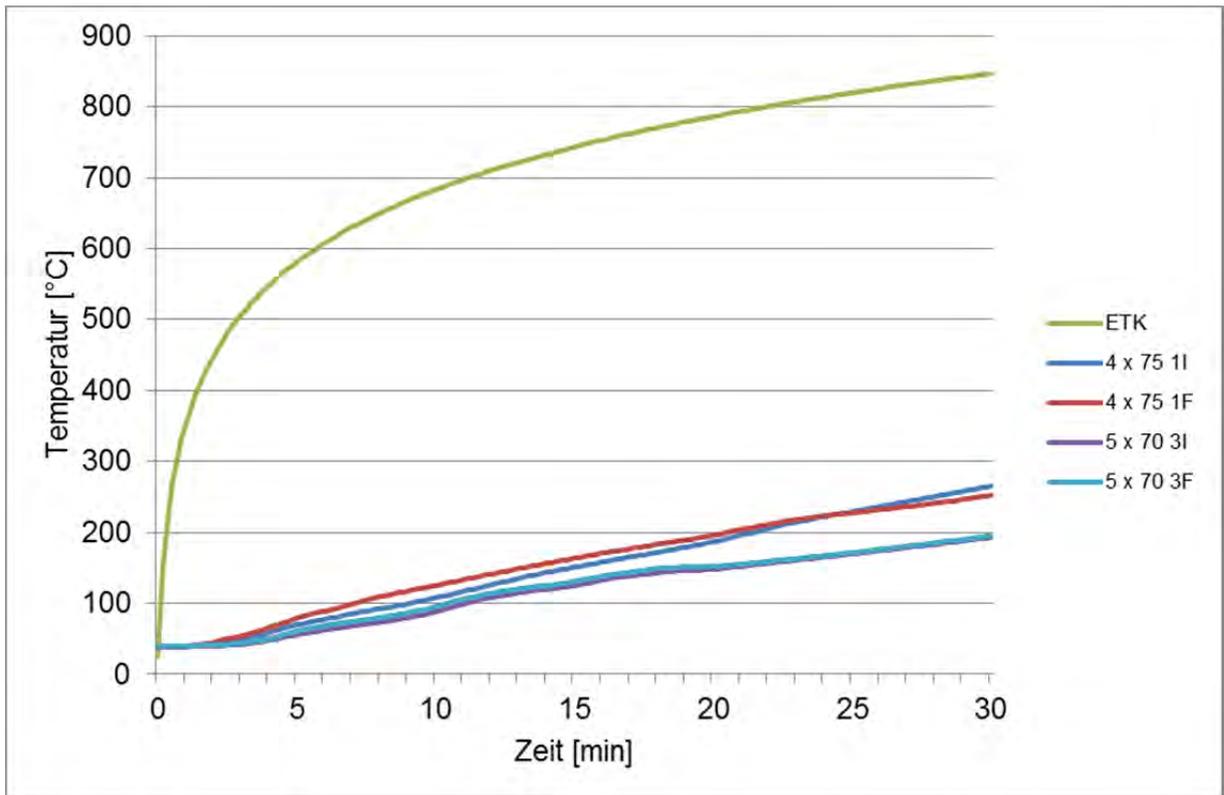


Abbildung 11-14: Vergleich der Temperaturmesswerte an den Verbindungsmittelspitzen der Versuchskörper 1 und 3 (\varnothing 4 und 5mm, l= 75 und 70mm)

11.2.2 Belastete Brandversuche

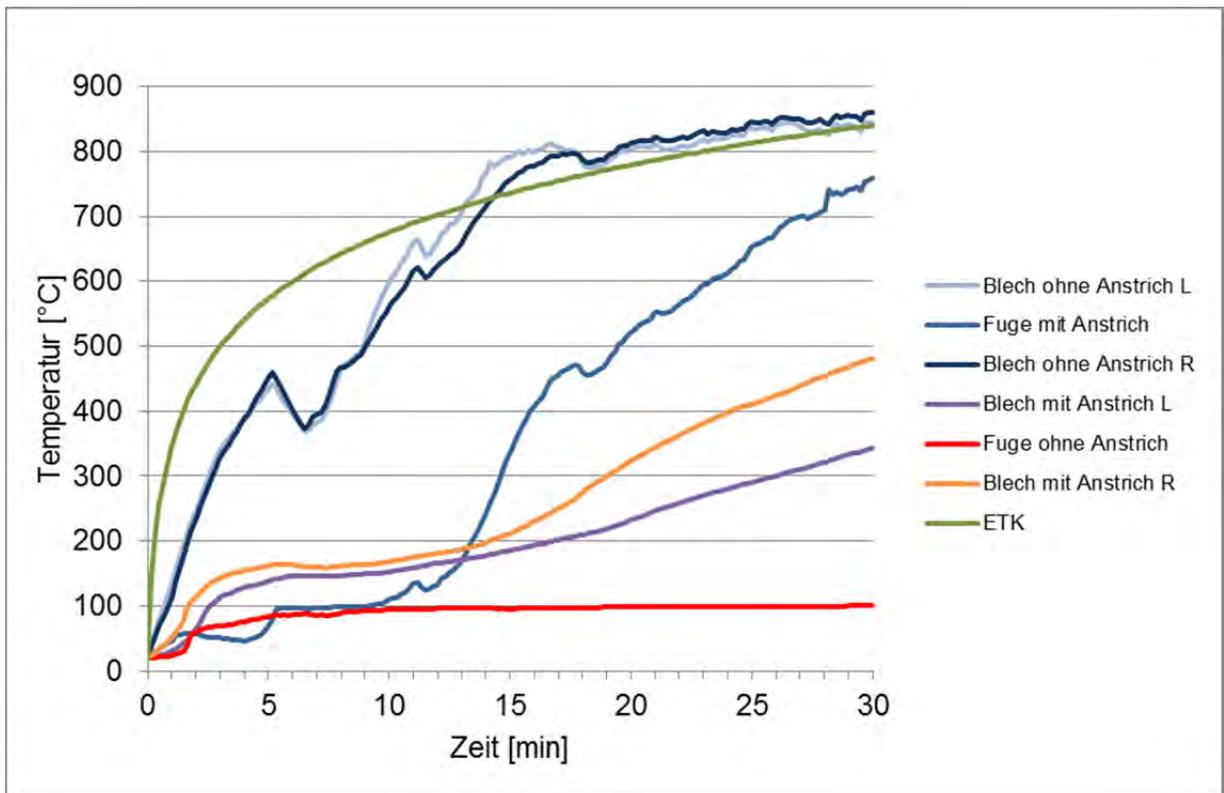


Abbildung 11-15: Temperaturmesswerte der Prüfkörper mit Schutzmaßnahmen der Balkenschuhe

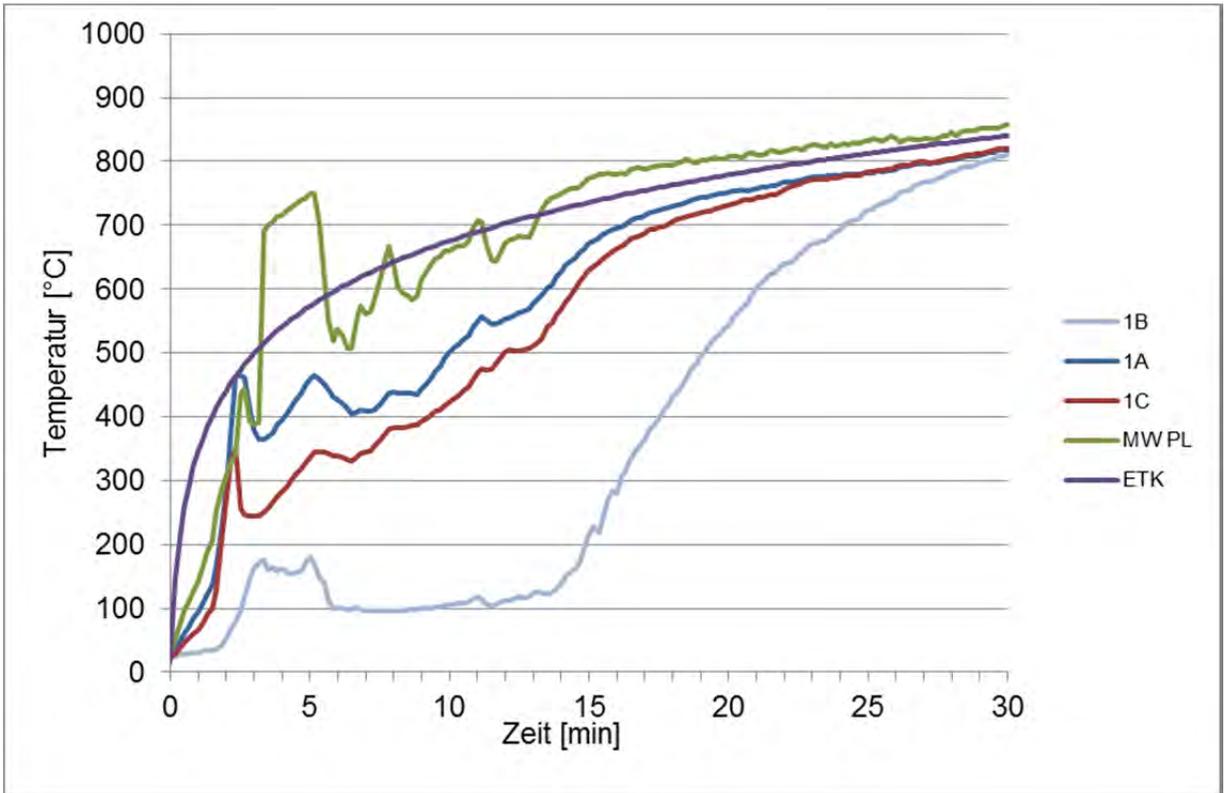


Abbildung 11-16: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung B1 – 30min

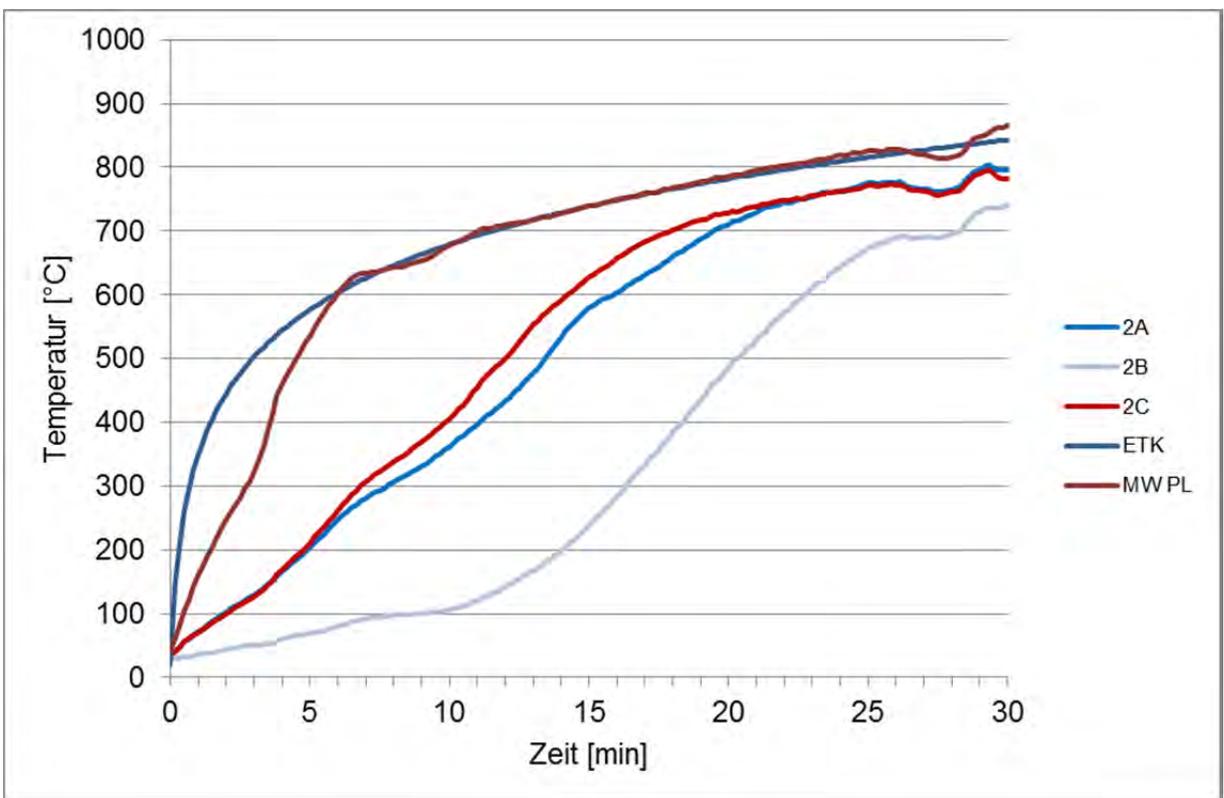


Abbildung 11-17: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung B2 – 30min

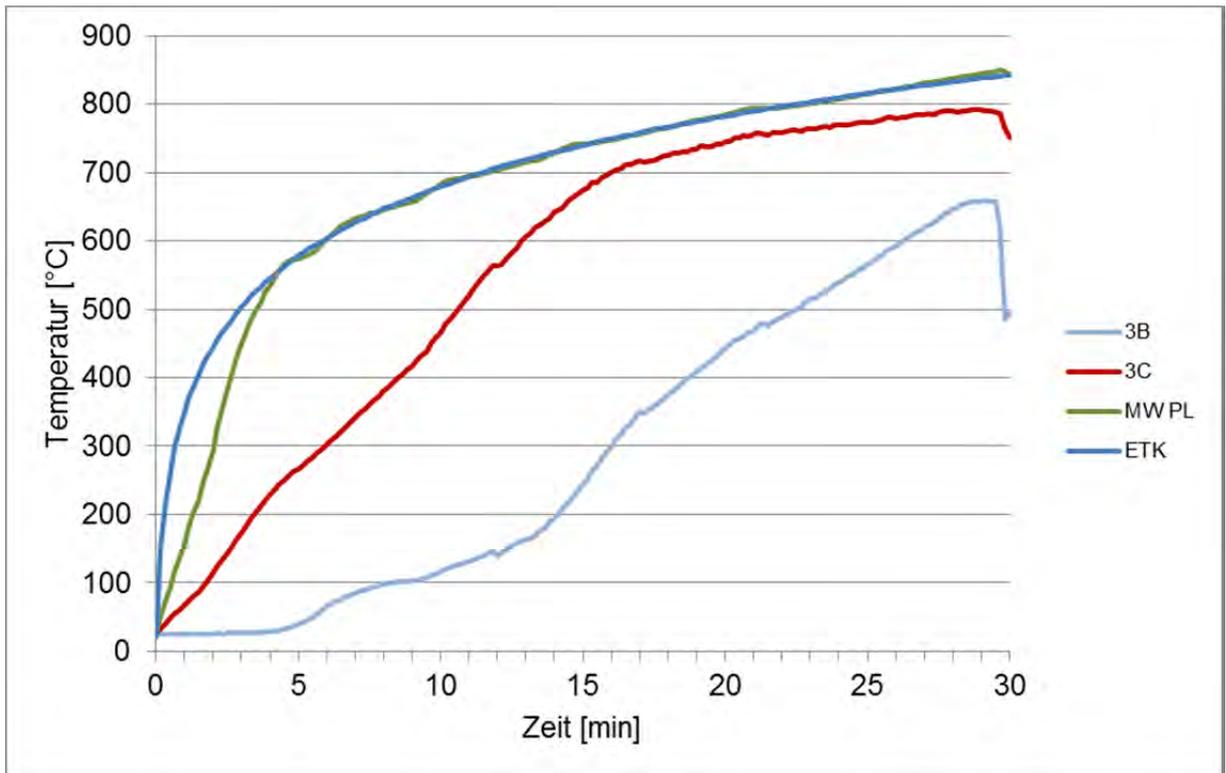


Abbildung 11-18: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung B3 – 30min

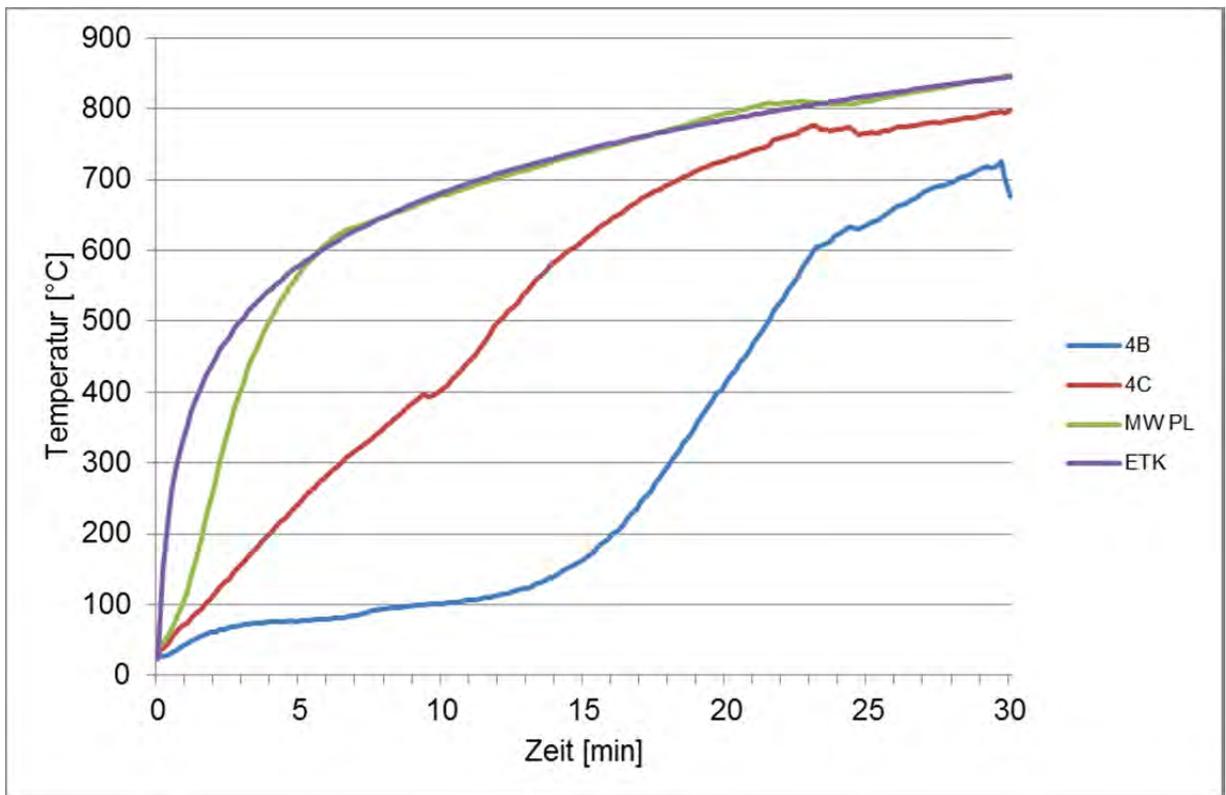


Abbildung 11-19: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung B4 – 30min

11.3 Temperaturmesswerte Schrauben

11.3.1 Unbelastete Brandversuche

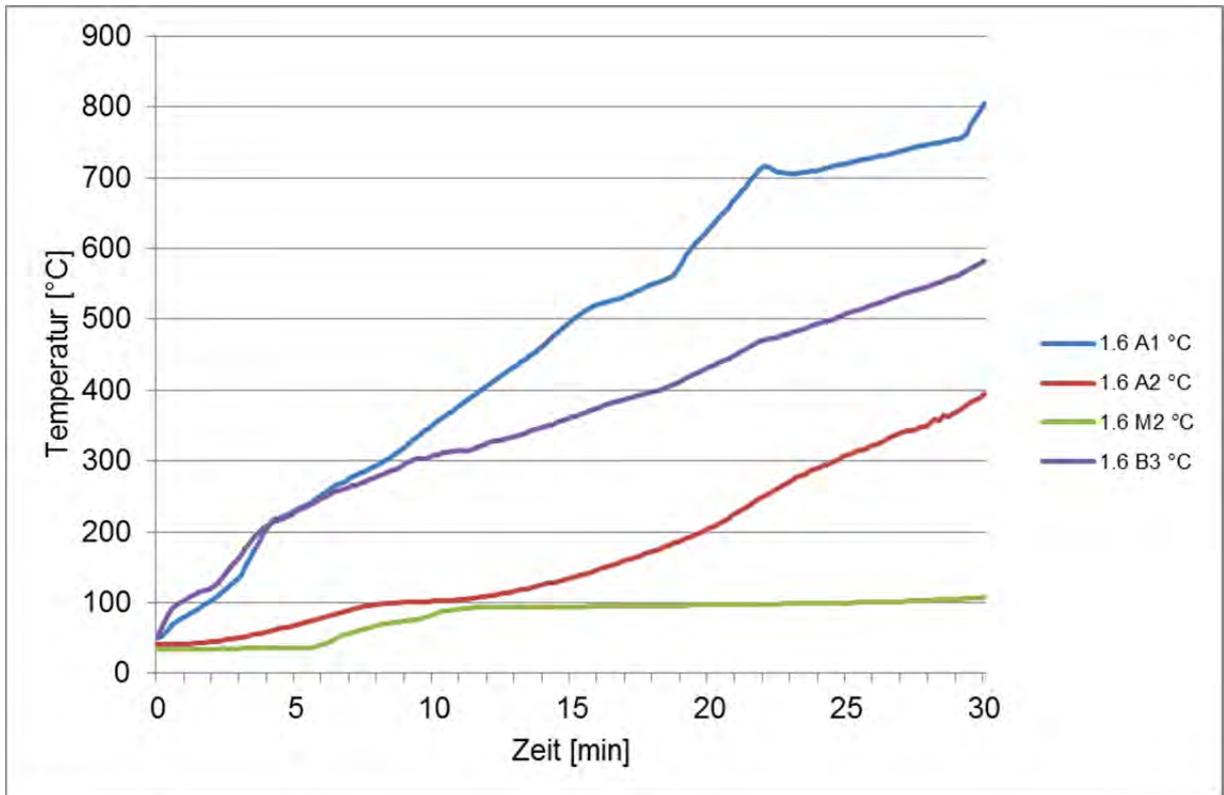


Abbildung 11-20: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.1-30 min

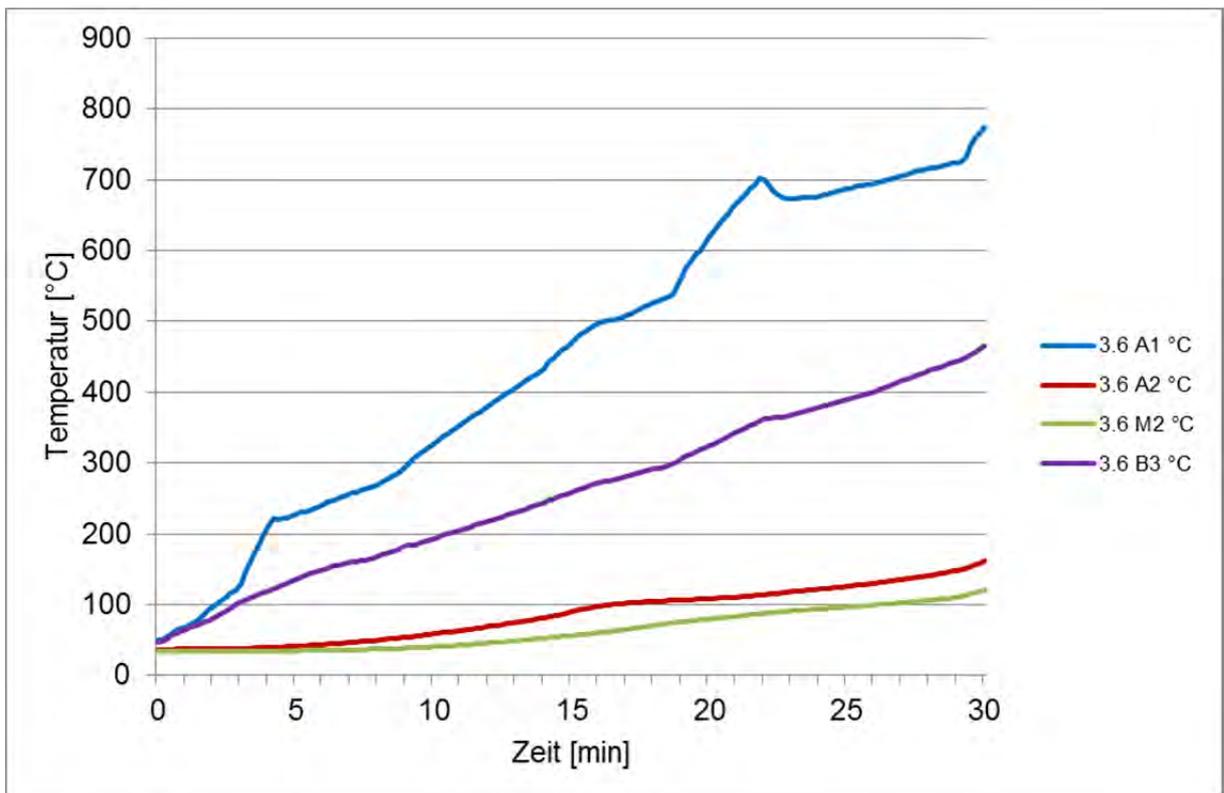


Abbildung 11-21: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.3-30 min

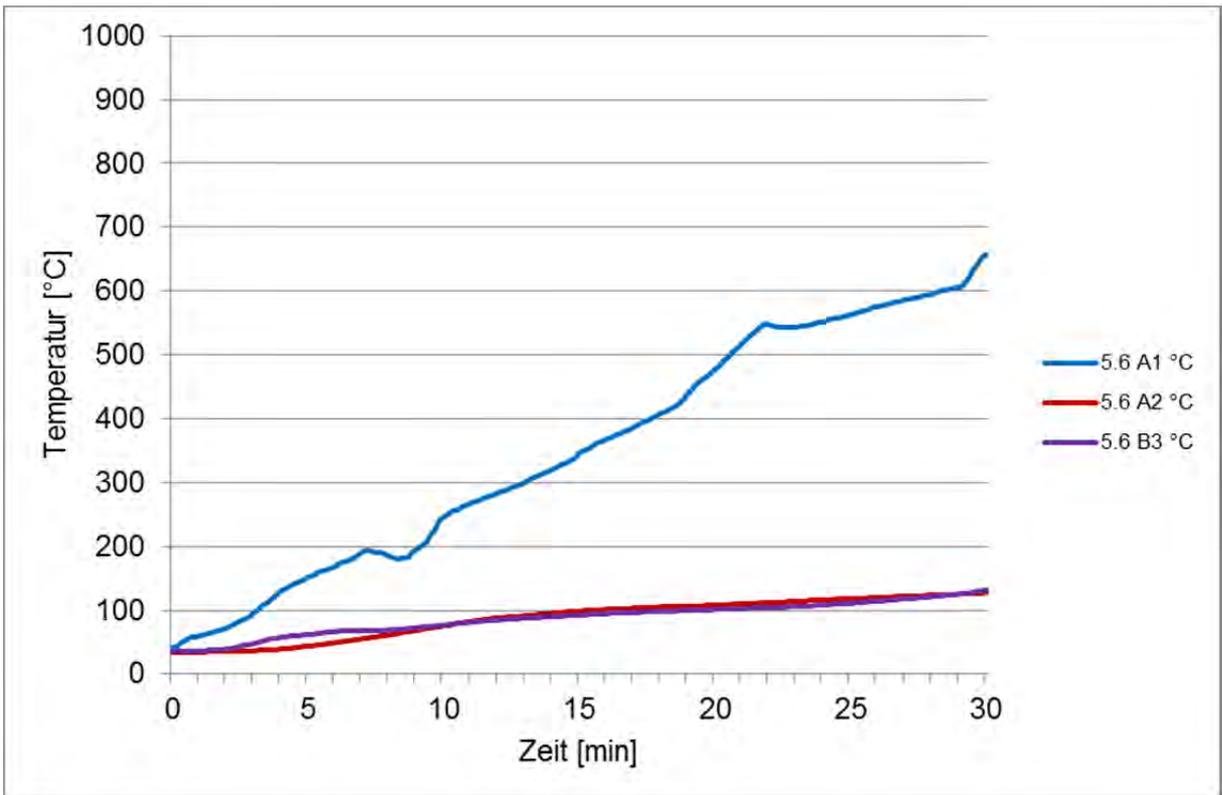


Abbildung 11-22: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.5-30 min

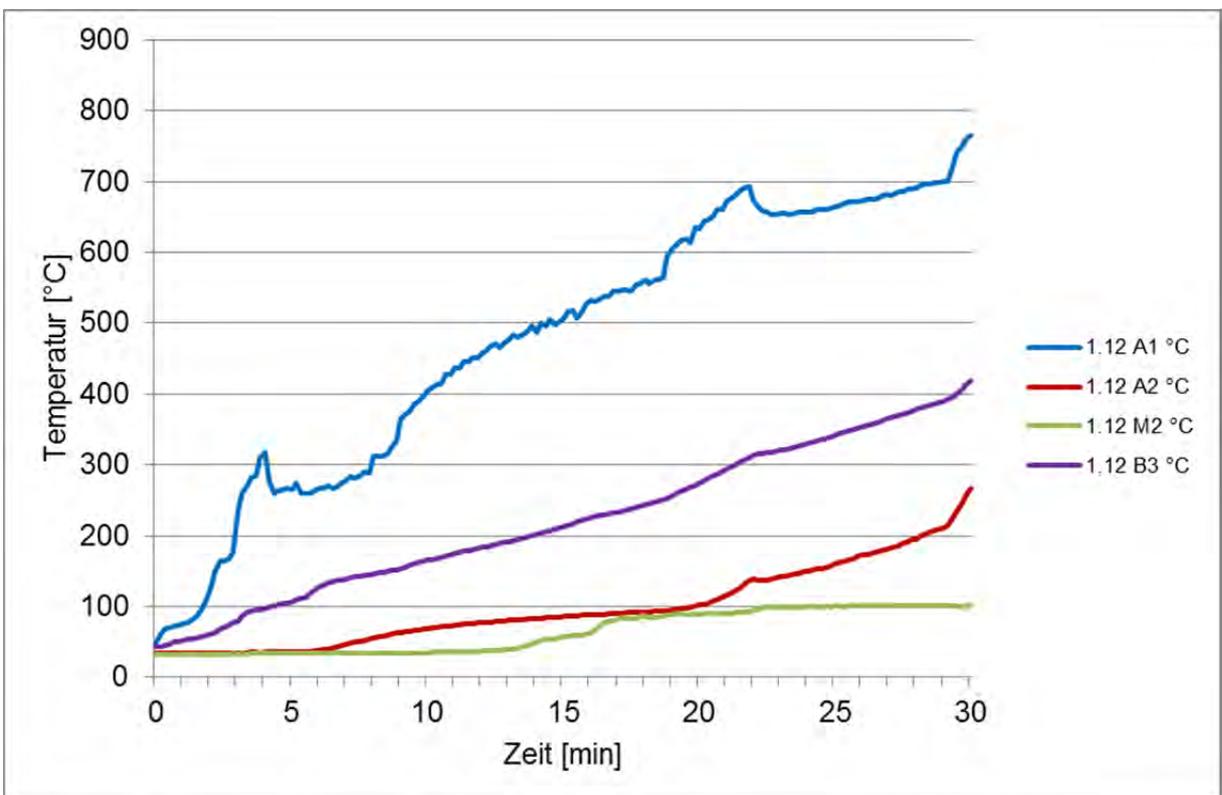


Abbildung 11-23: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.1-30 min

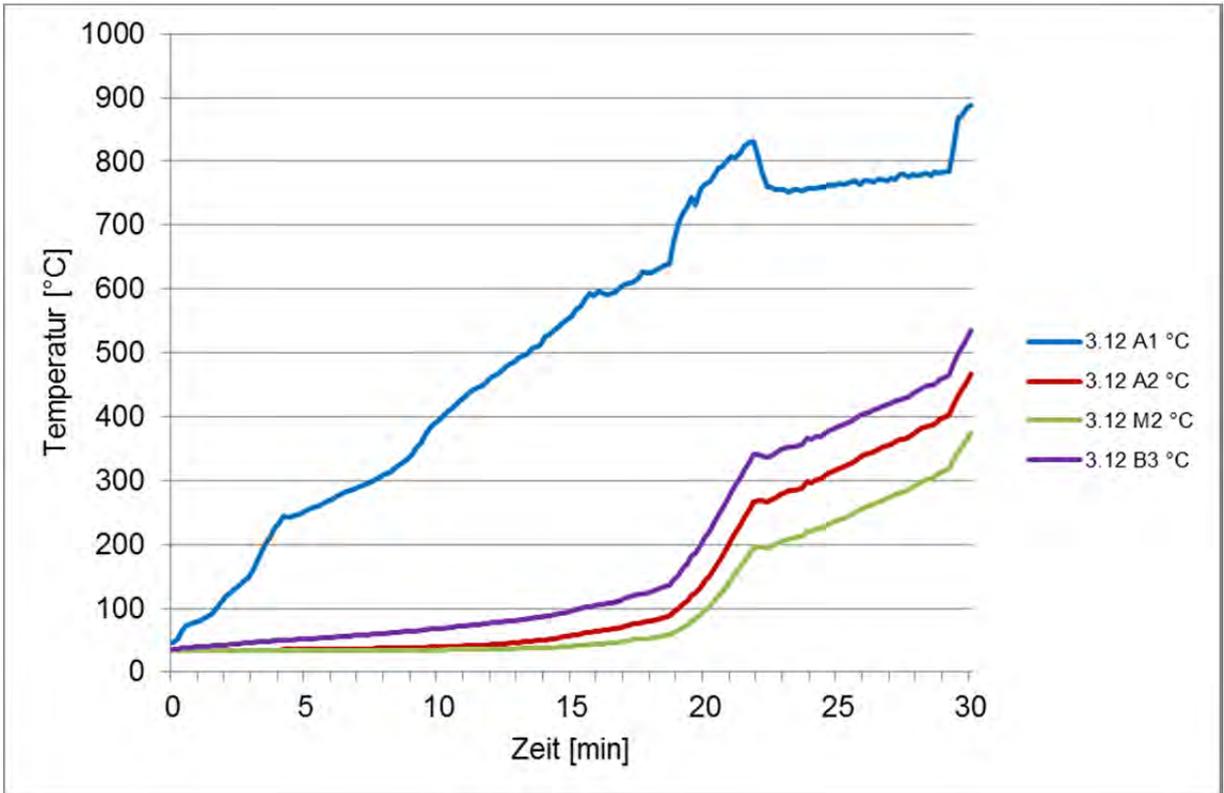


Abbildung 11-24: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.3-30 min

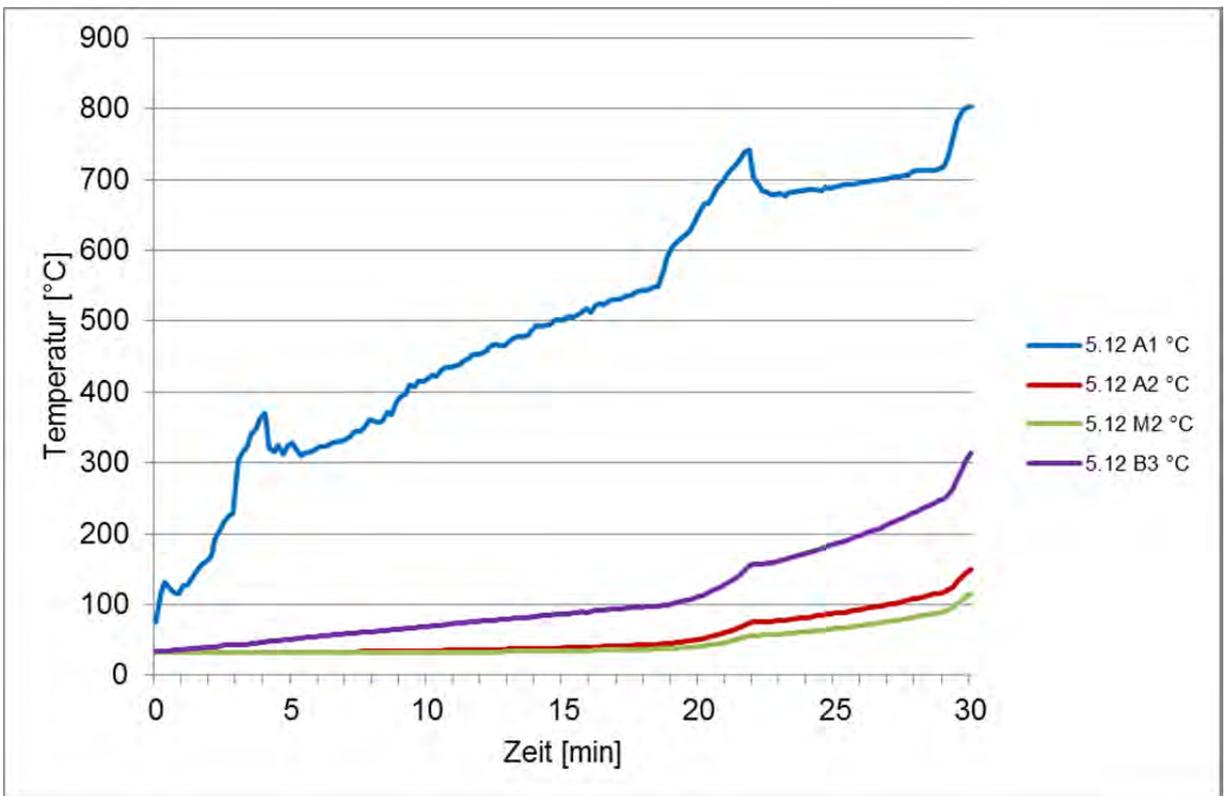


Abbildung 11-25: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.5-30 min

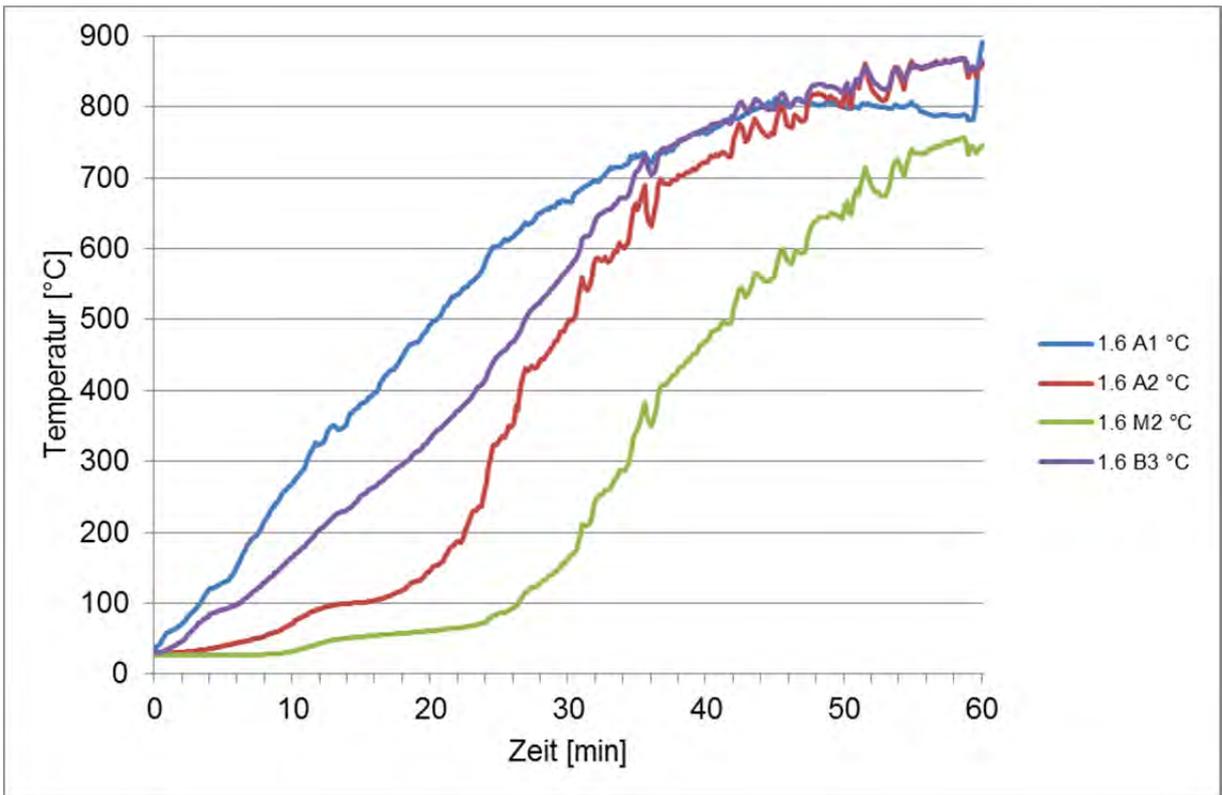


Abbildung 11-26: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.1-60 min

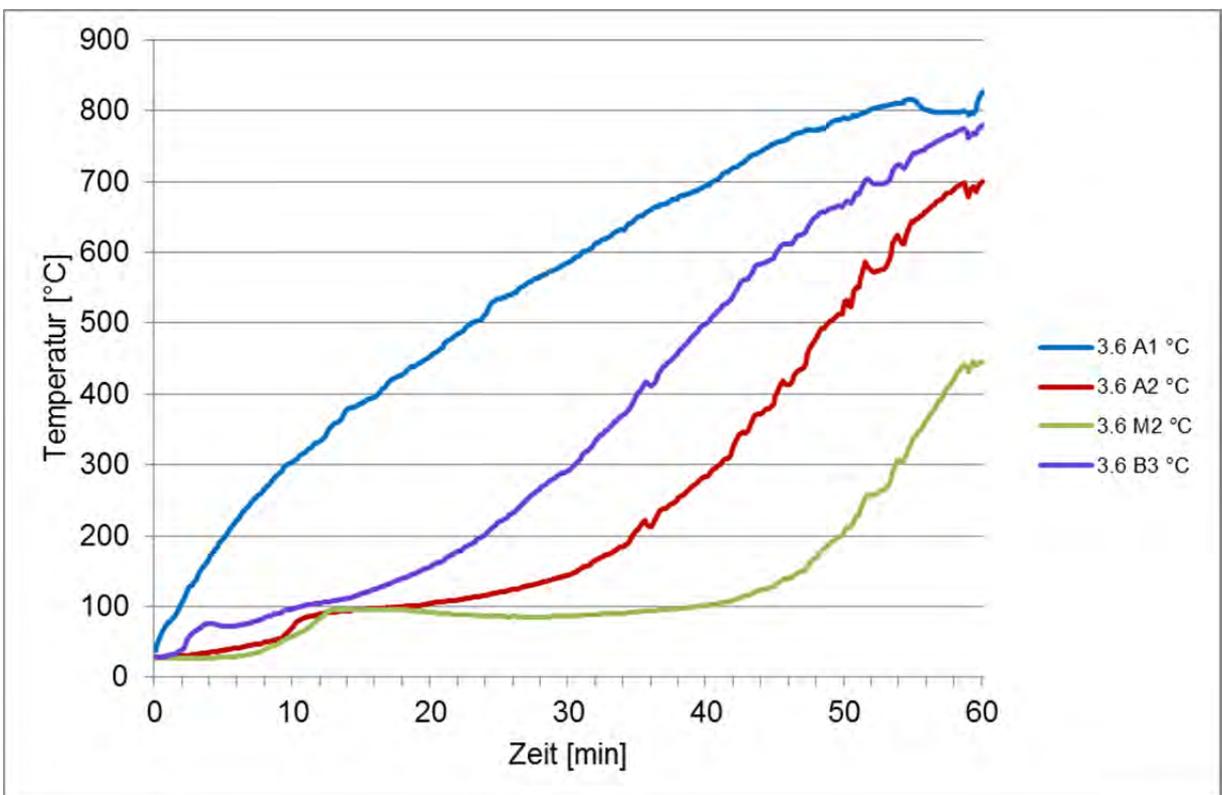


Abbildung 11-27: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.3-60 min

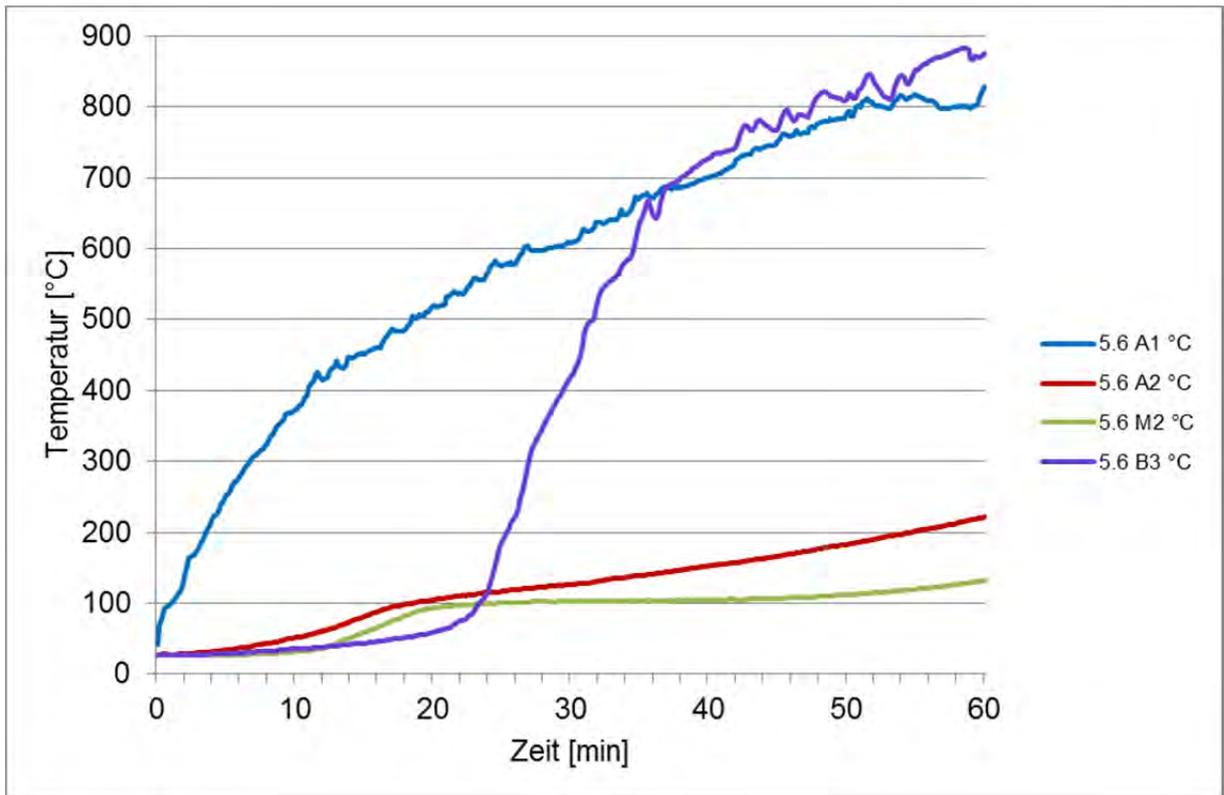


Abbildung 11-28: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.5-60 min

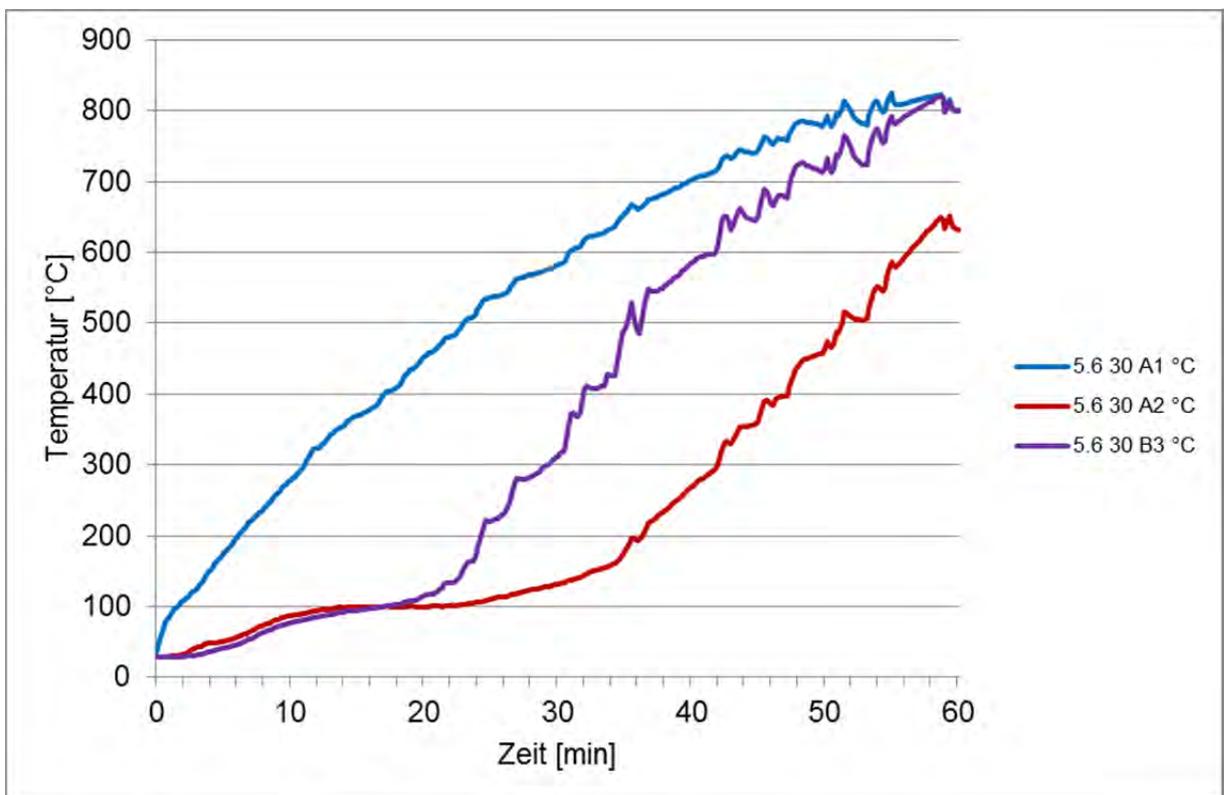


Abbildung 11-29: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 6.5-60 min (mit Fuge)

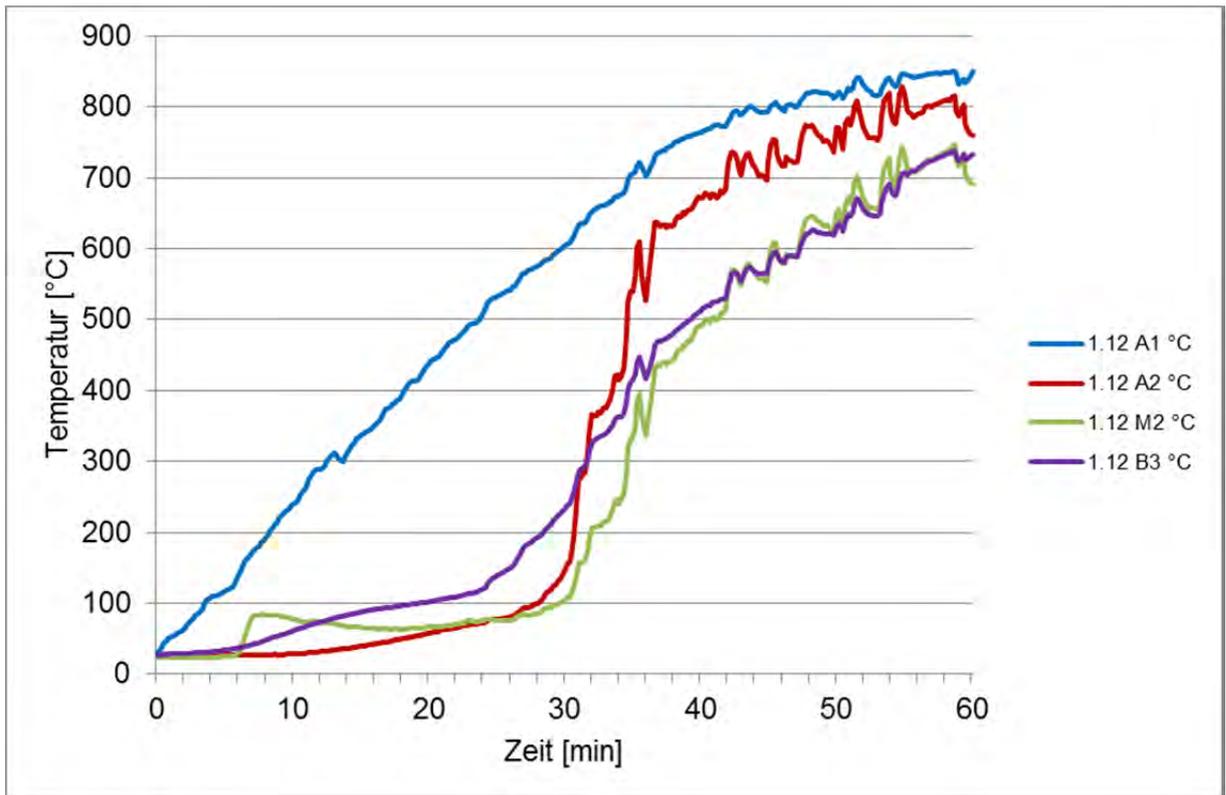


Abbildung 11-30: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.1-60 min

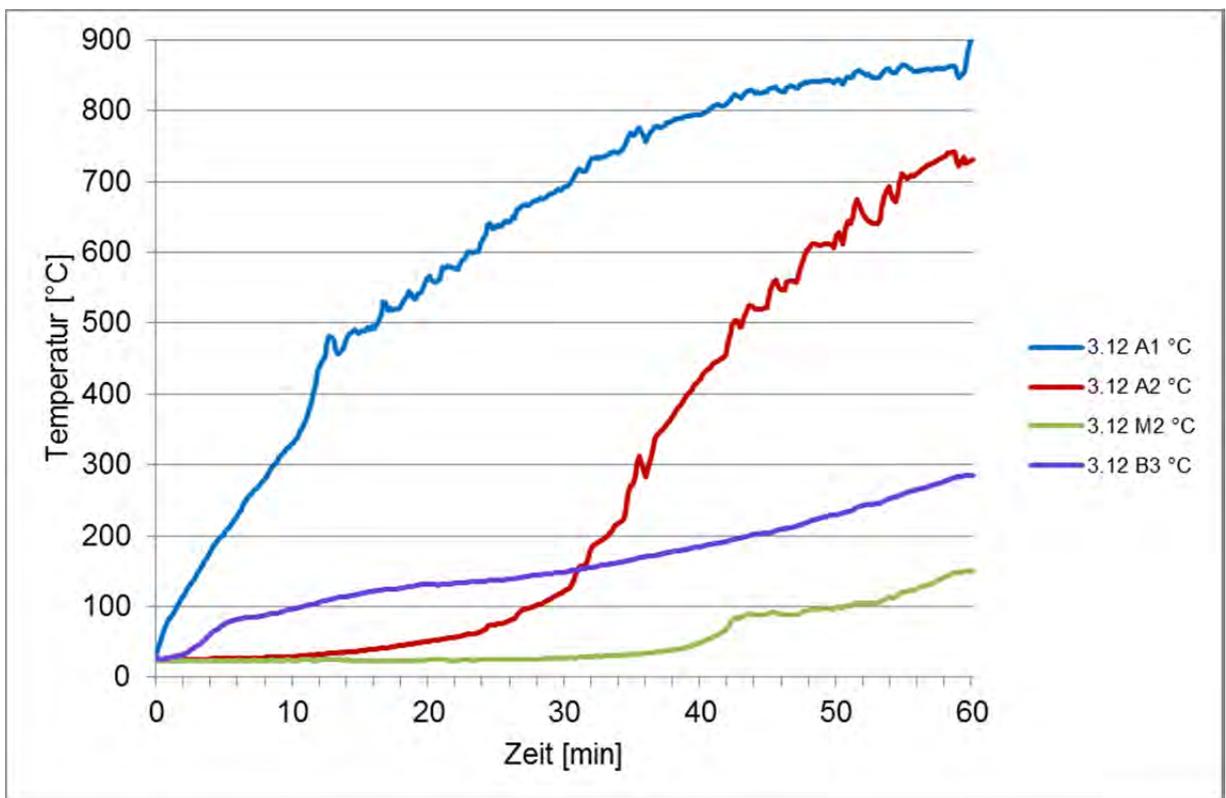


Abbildung 11-31: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.3-60 min

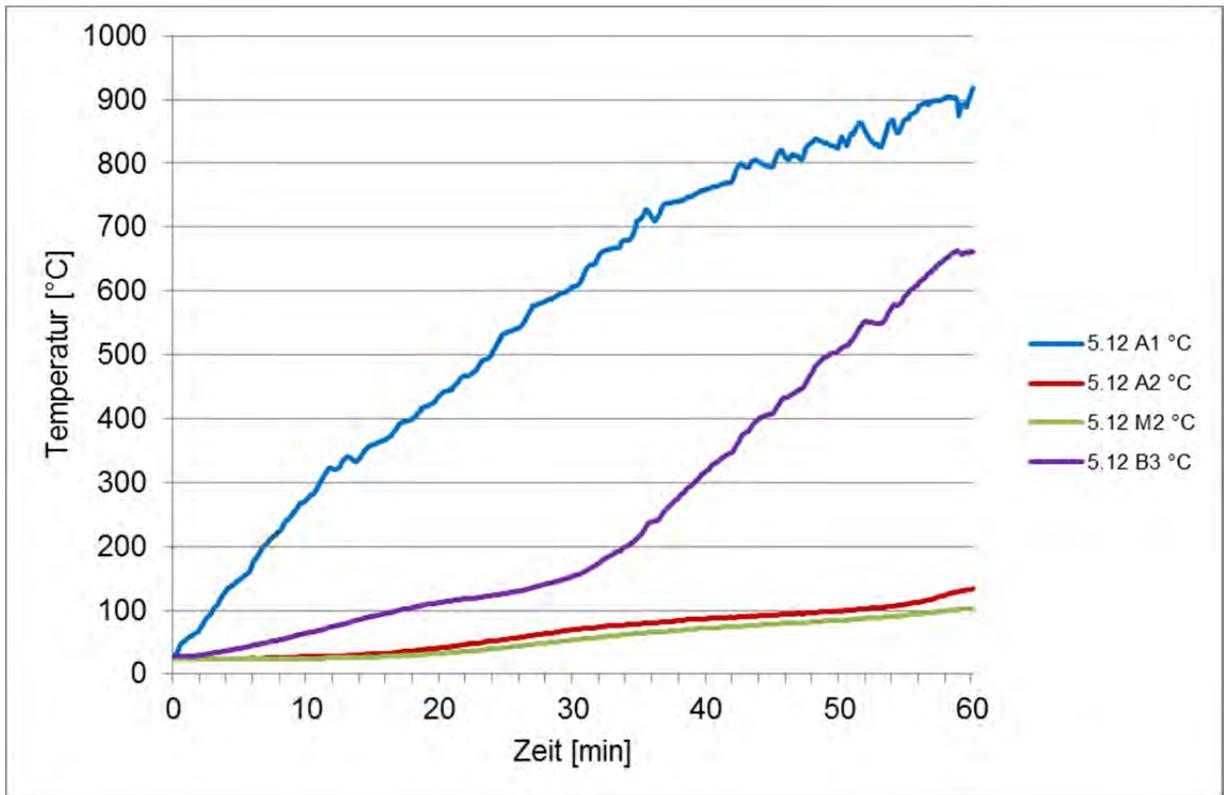


Abbildung 11-32: Temperaturverlauf der Thermoelemente in der Verbindung 12.5-60 min

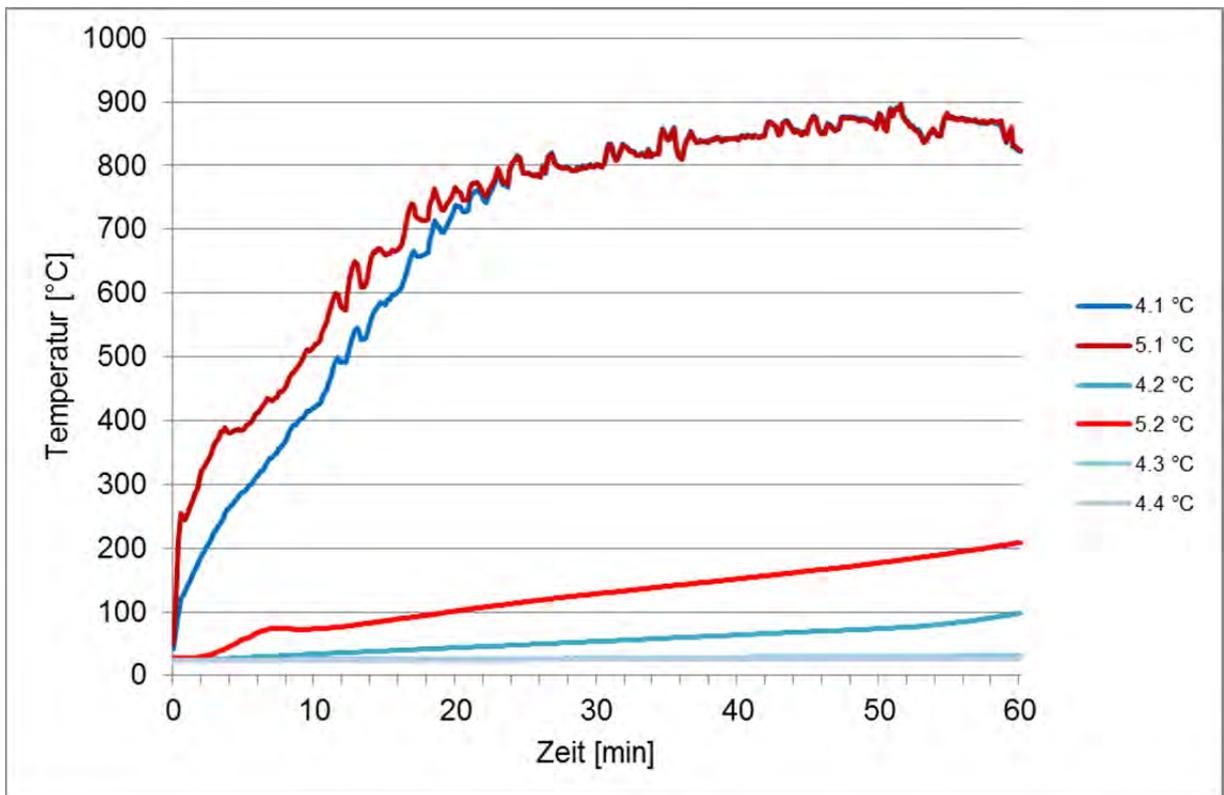


Abbildung 11-33: Vergleich des Temperaturverhaltens von Vollgewindeschrauben bestehend aus unterschiedlichen Längen $l = 100$ mm (Messstellen 5.1 - 5.2) und $l = 300$ mm (Messstellen 4.1 - 4.4)

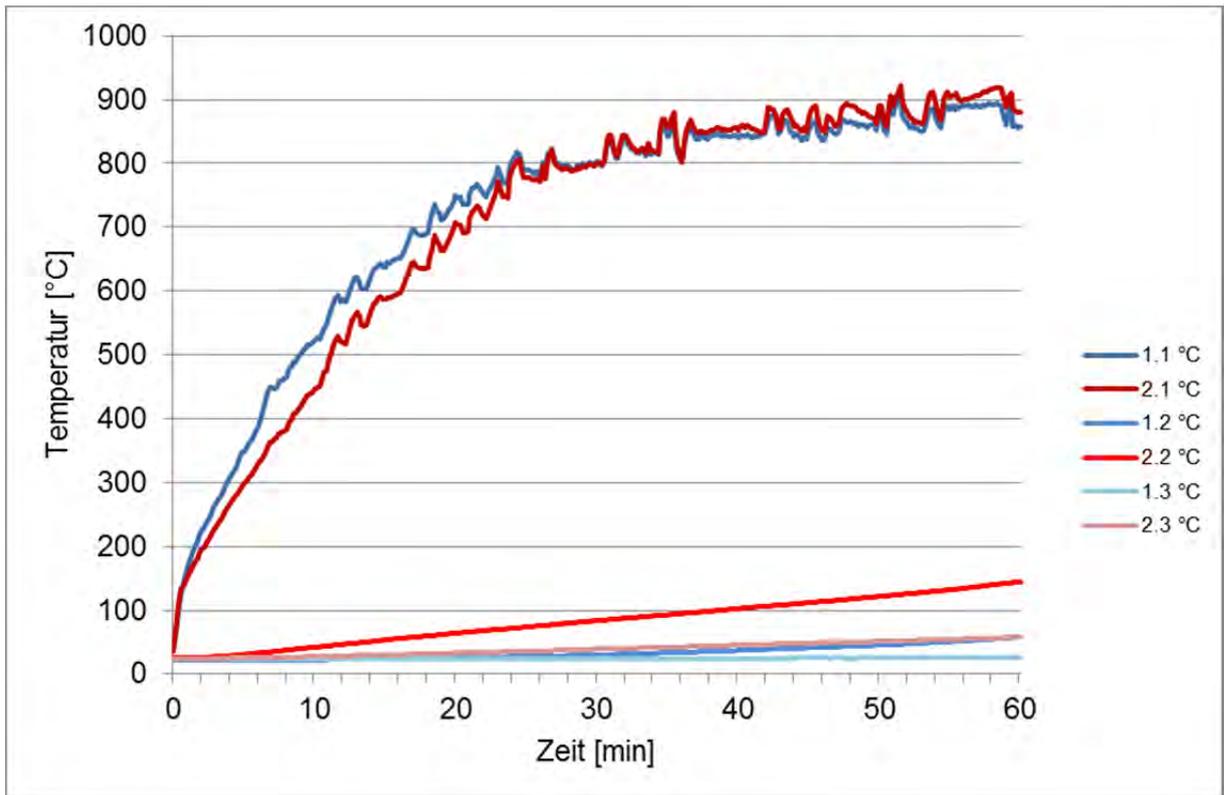


Abbildung 11-34: Vergleich des Temperaturverhaltens von Vollgewindeschrauben bestehend aus Kohlenstoff (Messstellen 2.1 – 2.3) oder Edelstahl (Messstellen 1.1 – 1.3)

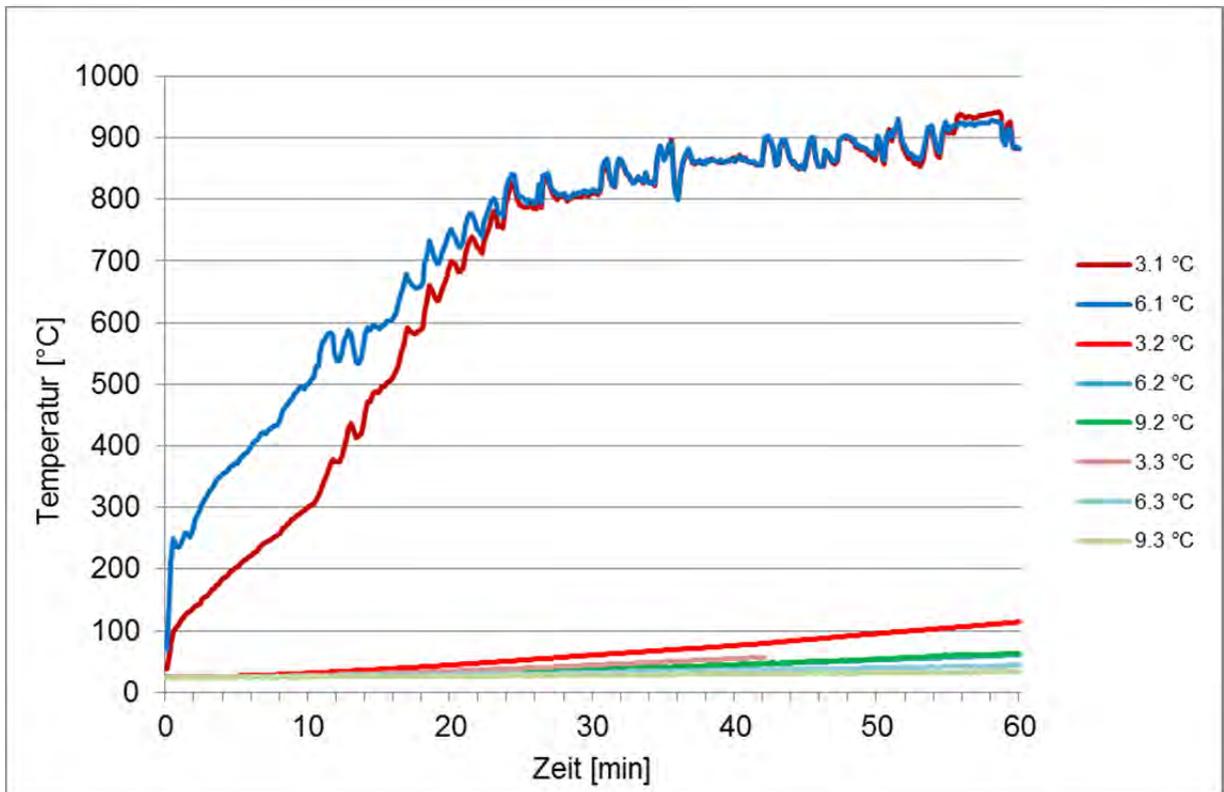


Abbildung 11-35: Vergleich des Temperaturverhaltens von Vollgewindeschrauben bestehend aus unterschiedlichen Durchmessern $d = 6$ mm (Messstellen 9.1 – 9.3), $d = 8$ mm (Messstellen 6.1 – 6.3) und $d = 12$ mm (Messstellen 3.1 – 3.3)

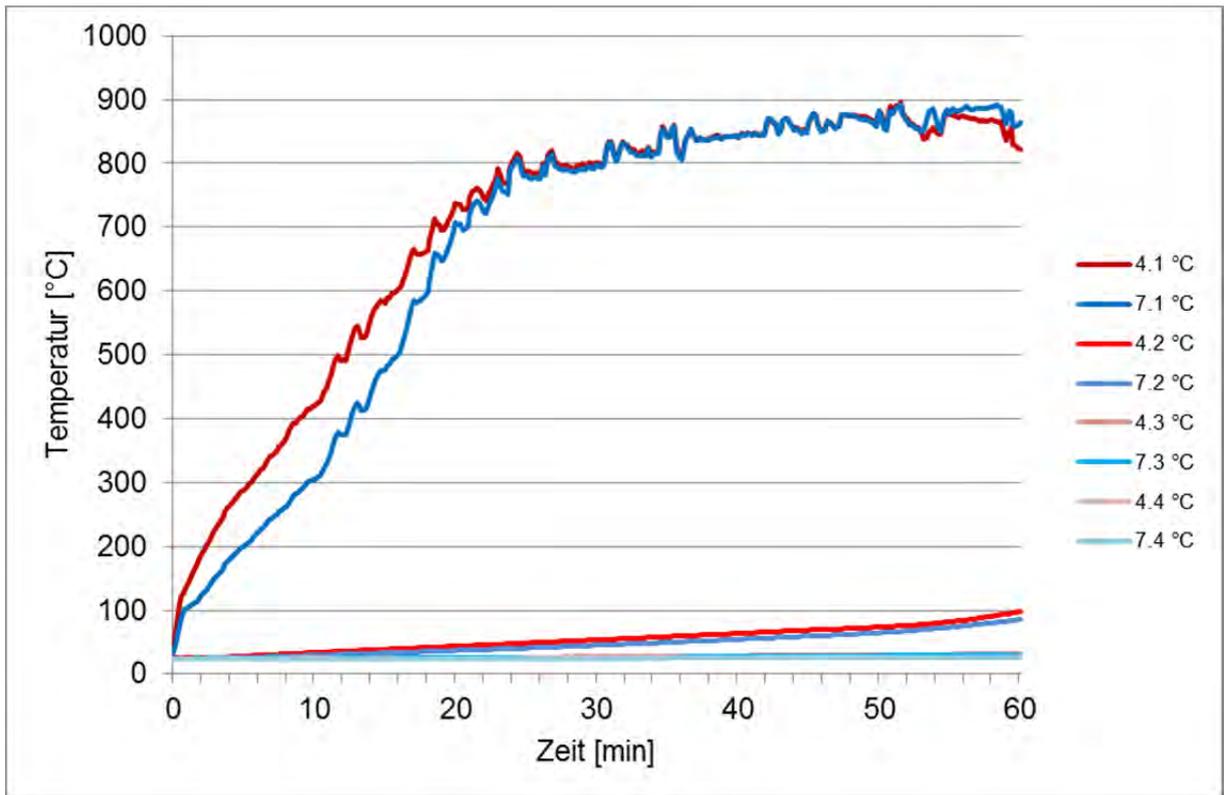


Abbildung 11-36: Vergleich des Temperaturverhaltens von Vollgewindeschrauben bestehend aus unterschiedlichen Kopffarten: Zylinderkopf (Messstellen 7.1 – 7.4), Senkkopf (Messstellen 4.1 – 4.4)

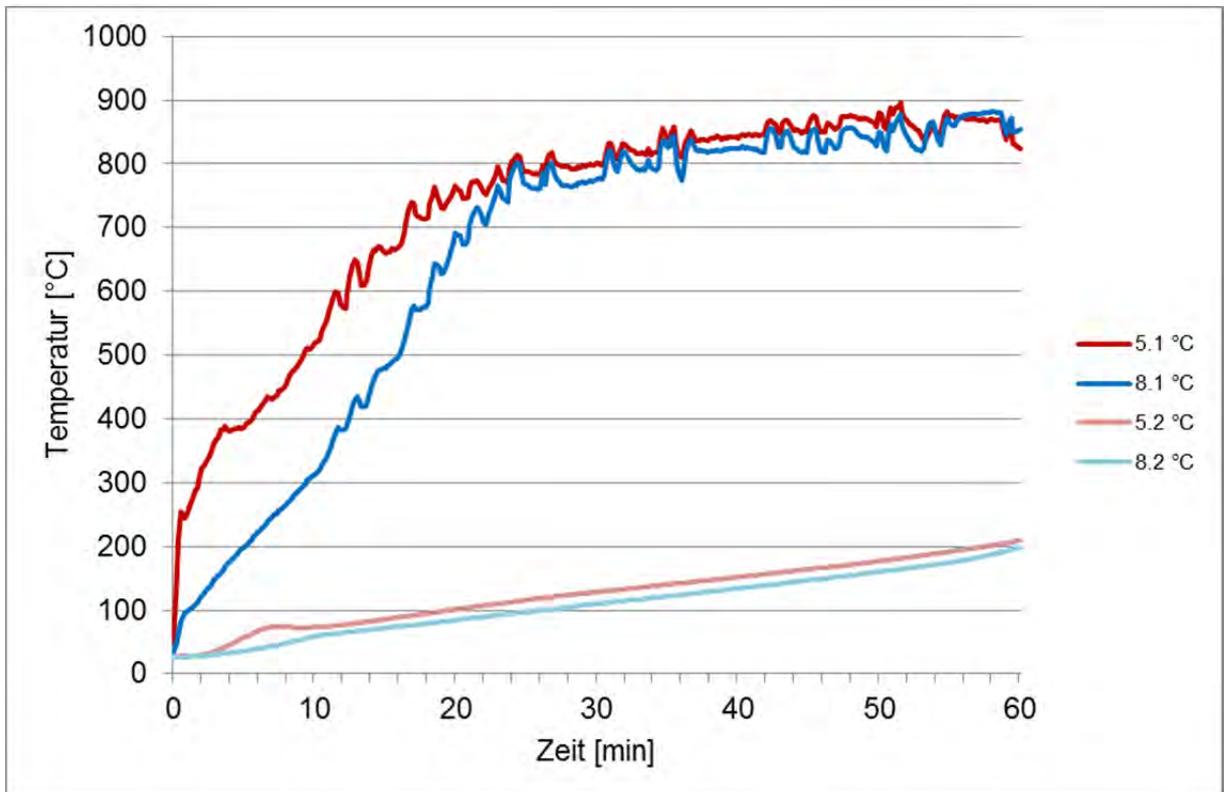


Abbildung 11-37: Vergleich des Temperaturverhaltens von Vollgewindeschrauben bestehend aus unterschiedlichen Kopffarten: Zylinderkopf (Messstellen 5.1 – 5.2), Senkkopf (Messstellen 8.1 – 8.2)

11.3.2 Belastete Brandversuche

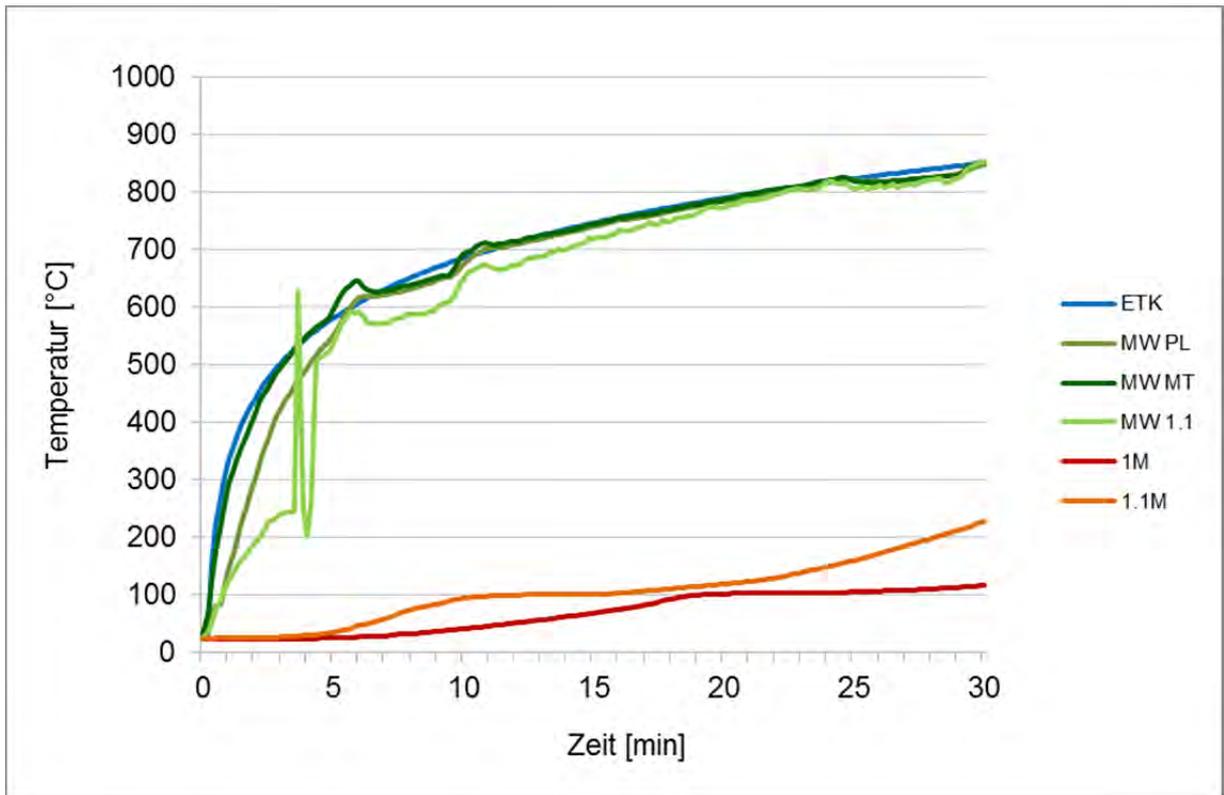


Abbildung 11-38: Ofentemperaturen S1

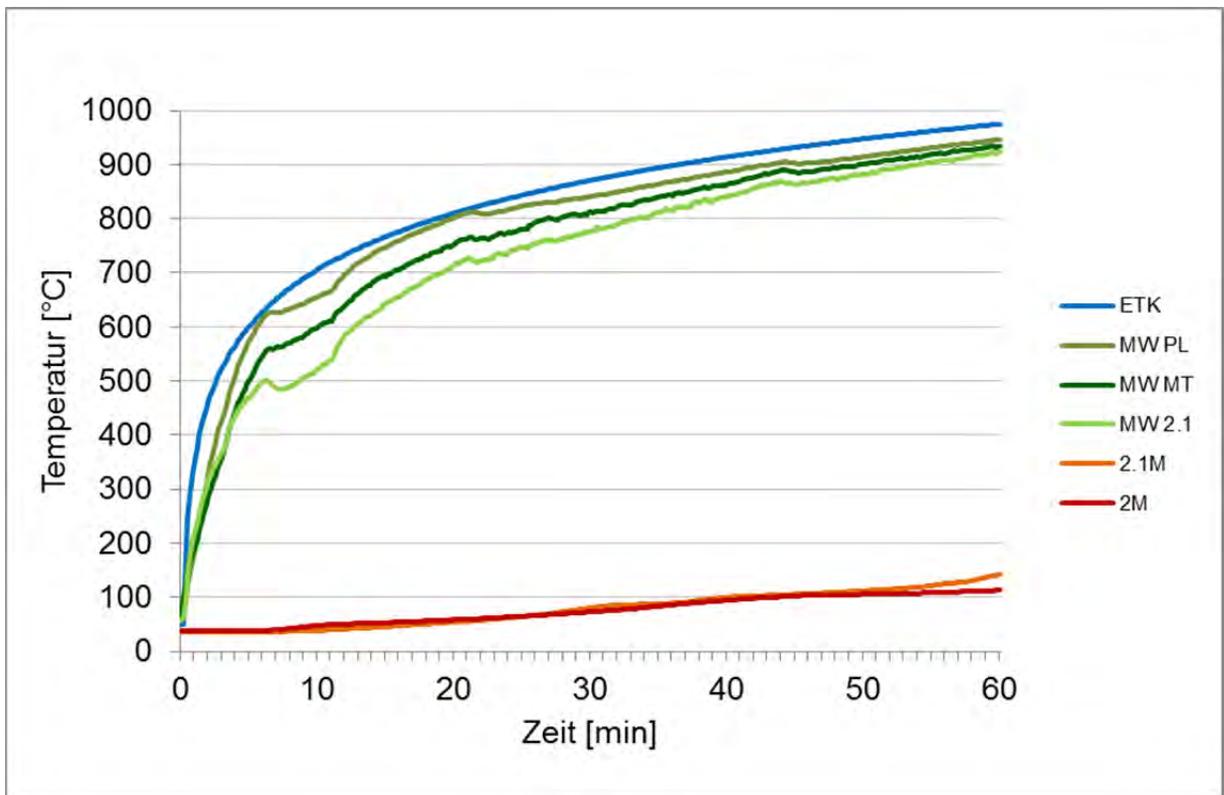


Abbildung 11-39: Ofentemperaturen S2

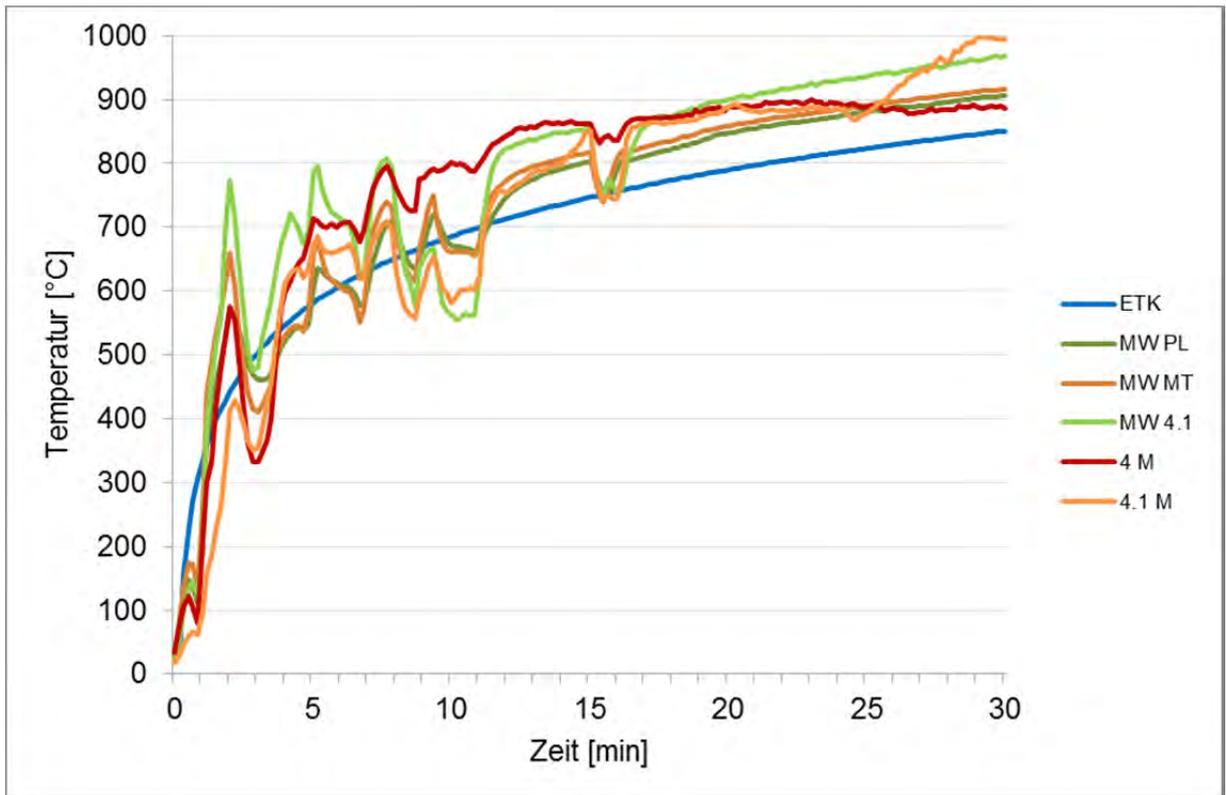


Abbildung 11-40: Ofentemperaturen S4

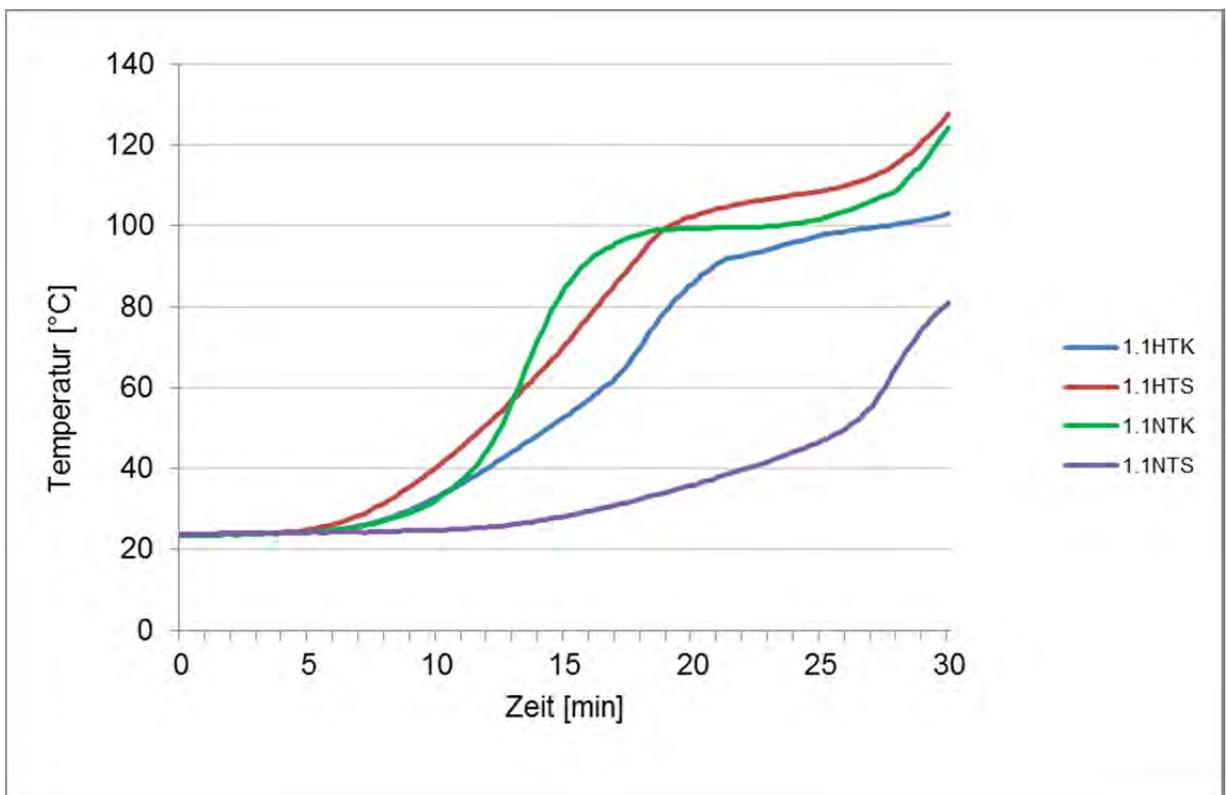


Abbildung 11-41: Temperaturwerte an Kopf und Spitze der Vollgewindeschrauben am Beispiel des Versuchskörpers (S1.1)

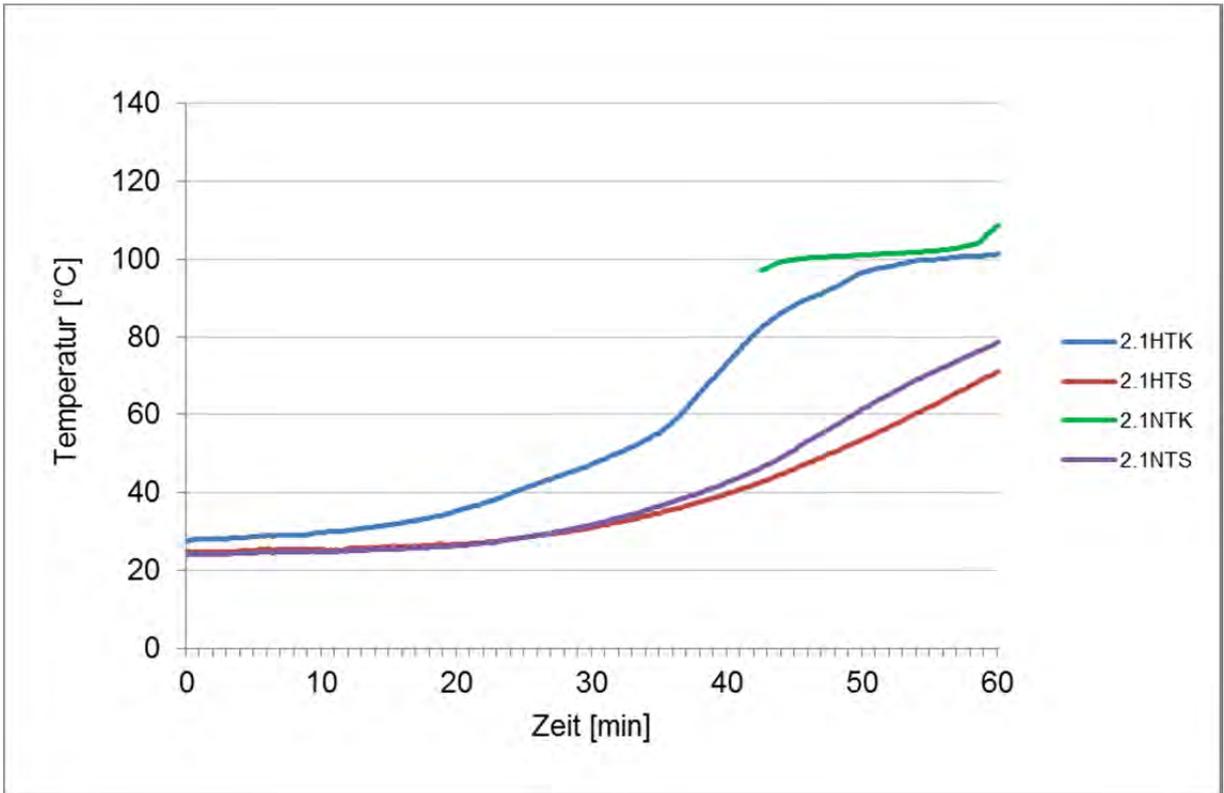


Abbildung 11-42: Temperaturwerte an Kopf und Spitze der Vollgewindeschrauben am Beispiel des Versuchskörpers (S2.1)

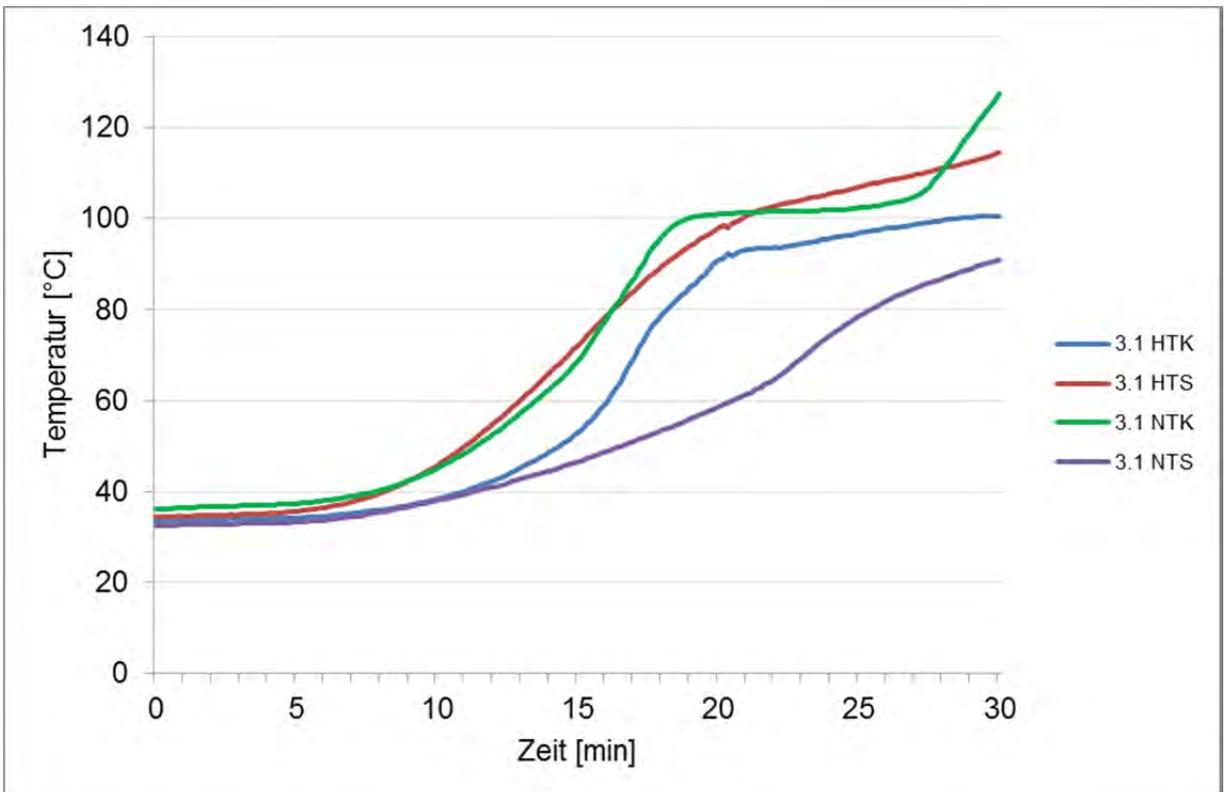


Abbildung 11-43: Temperaturwerte an Kopf und Spitze der Vollgewindeschrauben am Beispiel des Versuchskörpers (S3.1)

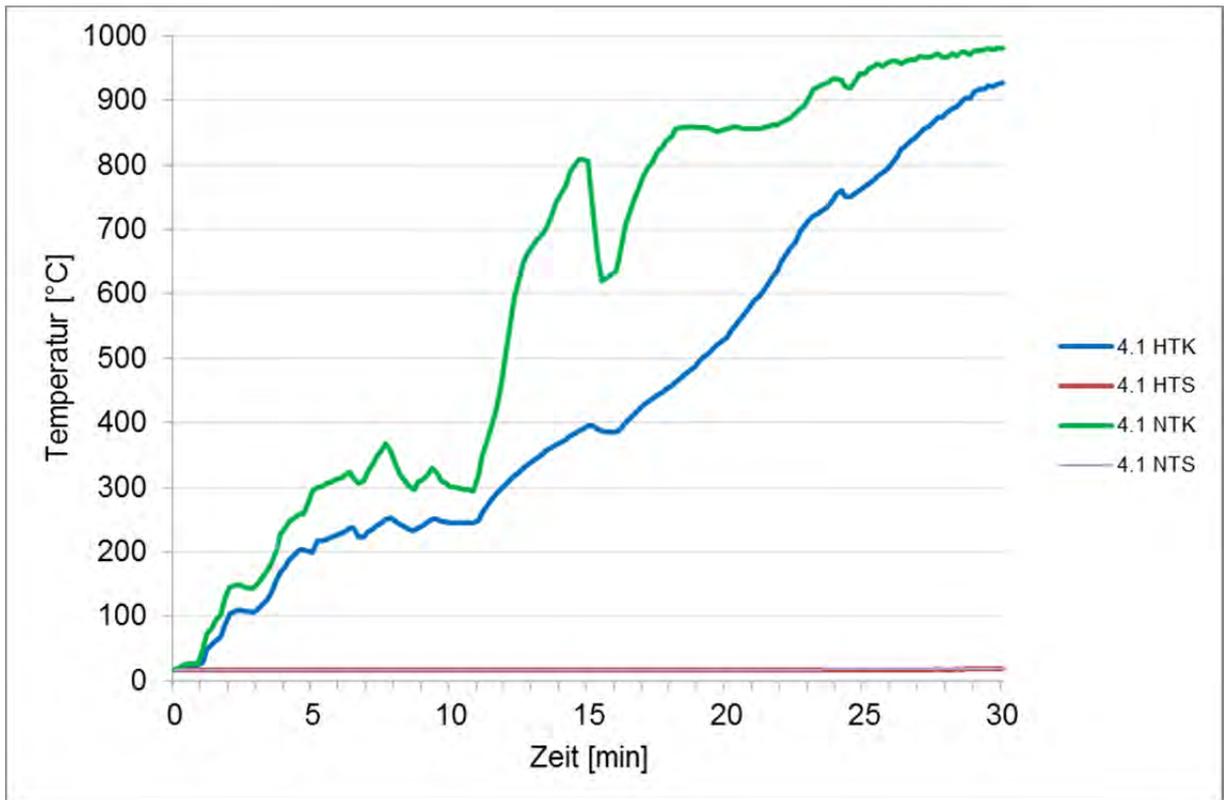


Abbildung 11-44: Temperaturwerte an Kopf und Spitze der Vollgewindeschrauben am Beispiel des Versuchskörpers (S4.1)

11.4 Bilder Schnitte unbelastete Brandversuchskörper

11.4.1 Schraubenverbindung 6.1- 30 Minuten



Abbildung 11-45: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-46: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.2 Schraubenverbindung 6.3- 30 Minuten



Abbildung 11-47: Schnitt durch den Hauptträger

11.4.3 Schraubenverbindung 6.5- 30 Minuten



Abbildung 11-48: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-49: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.4 Schraubenverbindung 12.1- 30 Minuten



Abbildung 11-50: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-51: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.5 Schraubenverbindung 12.3- 30 Minuten



Abbildung 11-52: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-53: Hirnholzende des Nebenträgers im Anschlussbereich zum Hauptträger

11.4.6 Schraubenverbindung 12.5- 30 Minuten



Abbildung 11-54: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.7 Schraubenverbindung 6.1- 60 Minuten



Abbildung 11-55: Schnitt durch den Hauptträger

11.4.8 Schraubenverbindung 6.2- 60 Minuten

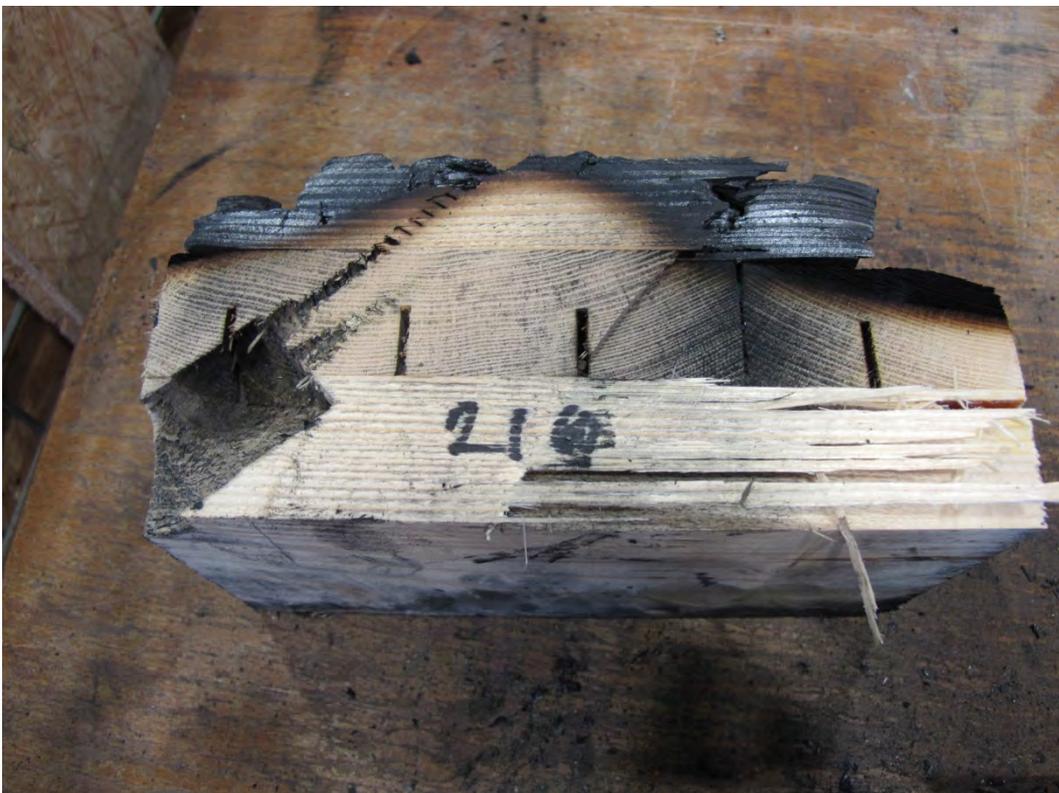


Abbildung 11-56: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-57: Anschlussbereich Hauptträger zu Nebenträger

11.4.9 Schraubenverbindung 6.3- 60 Minuten



Abbildung 11-58: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-59: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.10 Schraubenv Verbindung 6.4- 60 Minuten



Abbildung 11-60: Schnitt durch den Hauptträger

11.4.11 Schraubenverbindung 6.5- 60 Minuten



Abbildung 11-61: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-62: Anschlussende des Nebenträgers an den Hauptträger



Abbildung 11-63: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.12 Schraubenverbindung 12.1- 60 Minuten



Abbildung 11-64: Schnitt durch den Hauptträger

11.4.13 Schraubenverbindung 12.3- 60 Minuten



Abbildung 11-65: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-66: Schnitt durch den Nebenträger

11.4.14 Schraubenverbindung 12.4- 60 Minuten



Abbildung 11-67: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-68: Anschlussende des Nebenträgers an den Hauptträger

11.4.15 Schraubenverbindung 12.5- 60 Minuten



Abbildung 11-69: Schnitt durch den Hauptträger



Abbildung 11-70: Schnitt durch den Nebenträger

11.5 Bilder Schnitte belastete Brandversuchskörper

11.5.1 Balkenschuhe

11.5.1.1 B1



Abbildung 11-71: Versuchskörper B1 im Ofen



Abbildung 11-72: Versuchskörper B1 nach der Versuchsdurchführung, Draufsicht

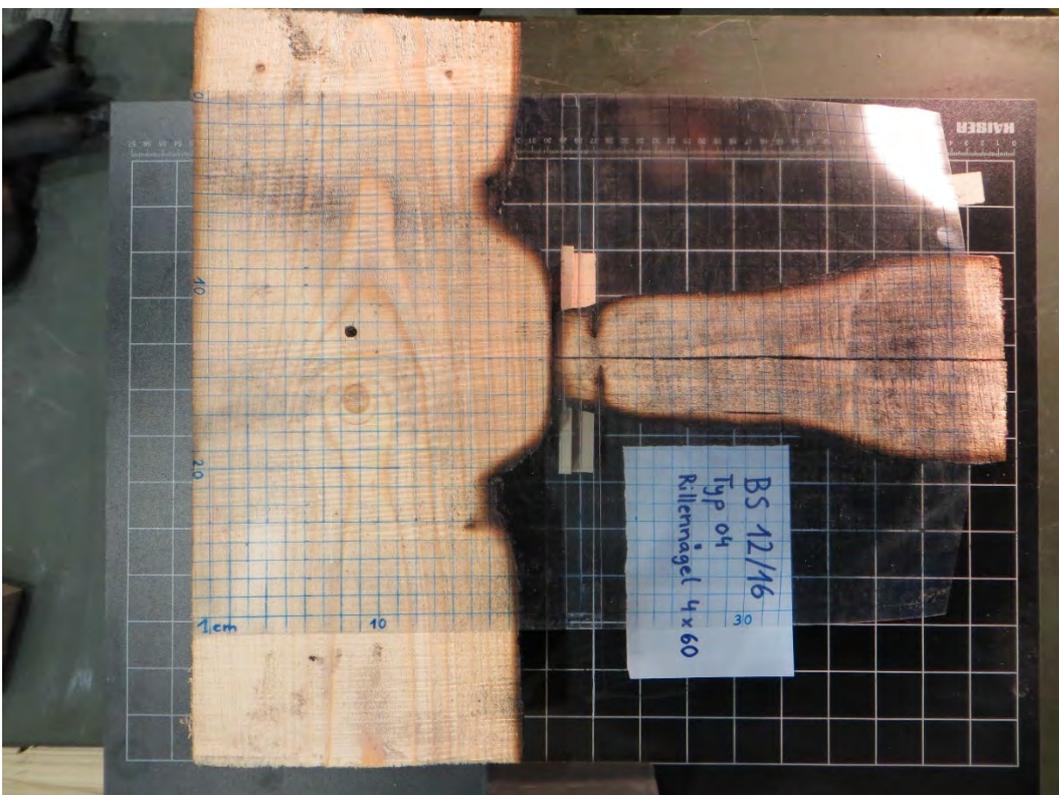


Abbildung 11-73: Versuchskörper B1, Horizontalschnitt



Abbildung 11-74: Versuchskörper B1, Vertikalschnitt des Nebenträgers

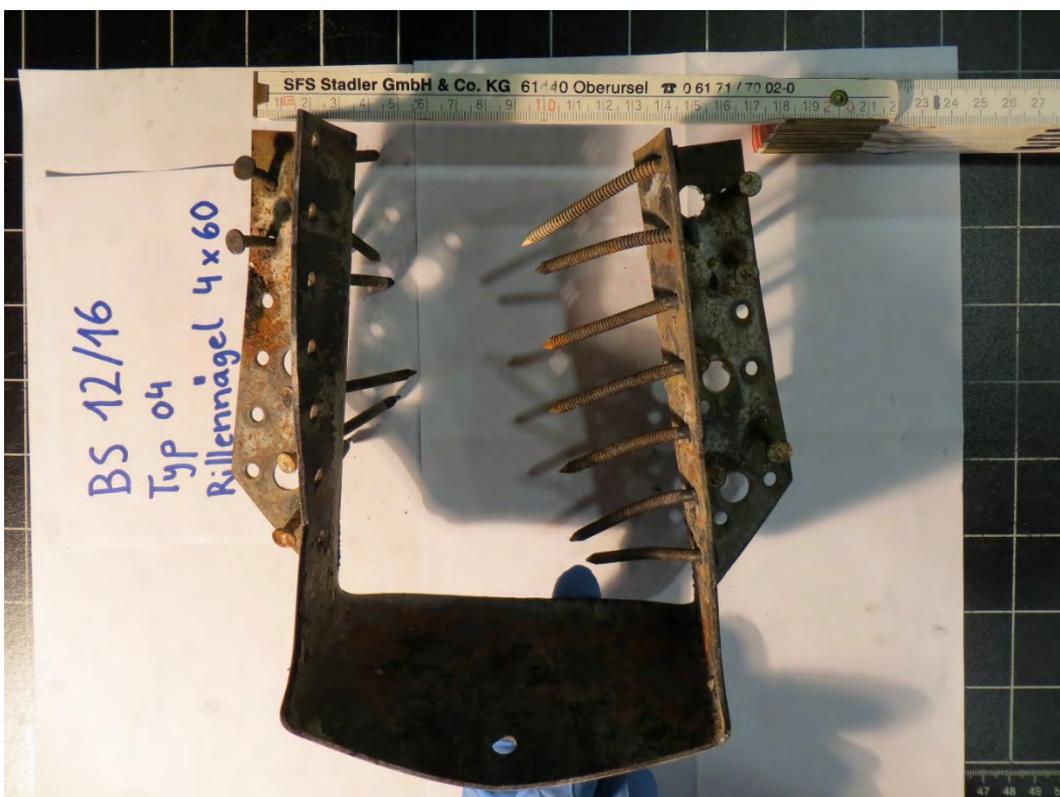


Abbildung 11-75: Versuchskörper B1, Balkenschuh nach Versuchsdurchführung

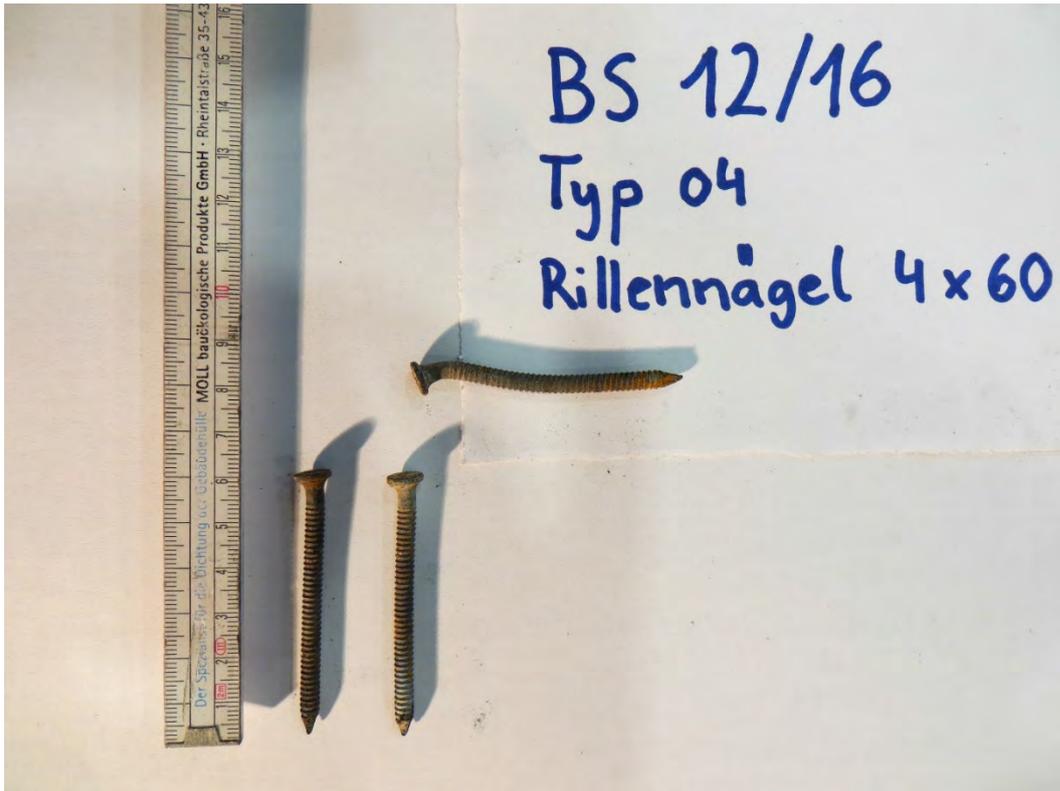


Abbildung 11-76: Versuchskörper B1, Verbindungsmittel nach Versuchsdurchführung



Abbildung 11-77: Versuchskörper B1, Stirnfläche des Nebenträgers

11.5.1.2 B2



Abbildung 11-78: Versuchskörper B2 im Ofen



Abbildung 11-79: Versuchskörper B2 nach der Versuchsdurchführung

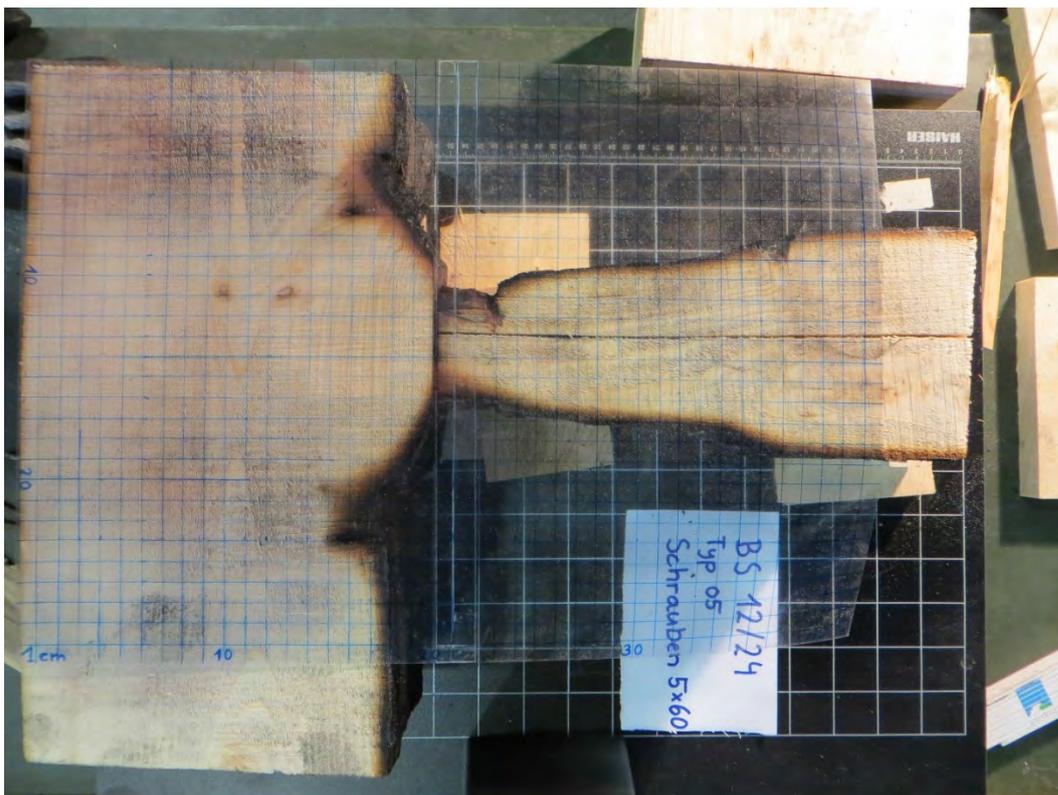


Abbildung 11-80: Versuchskörper B2, Horizontalschnitt



Abbildung 11-81: Versuchskörper B2, Vertikalschnitt des Nebenträgers

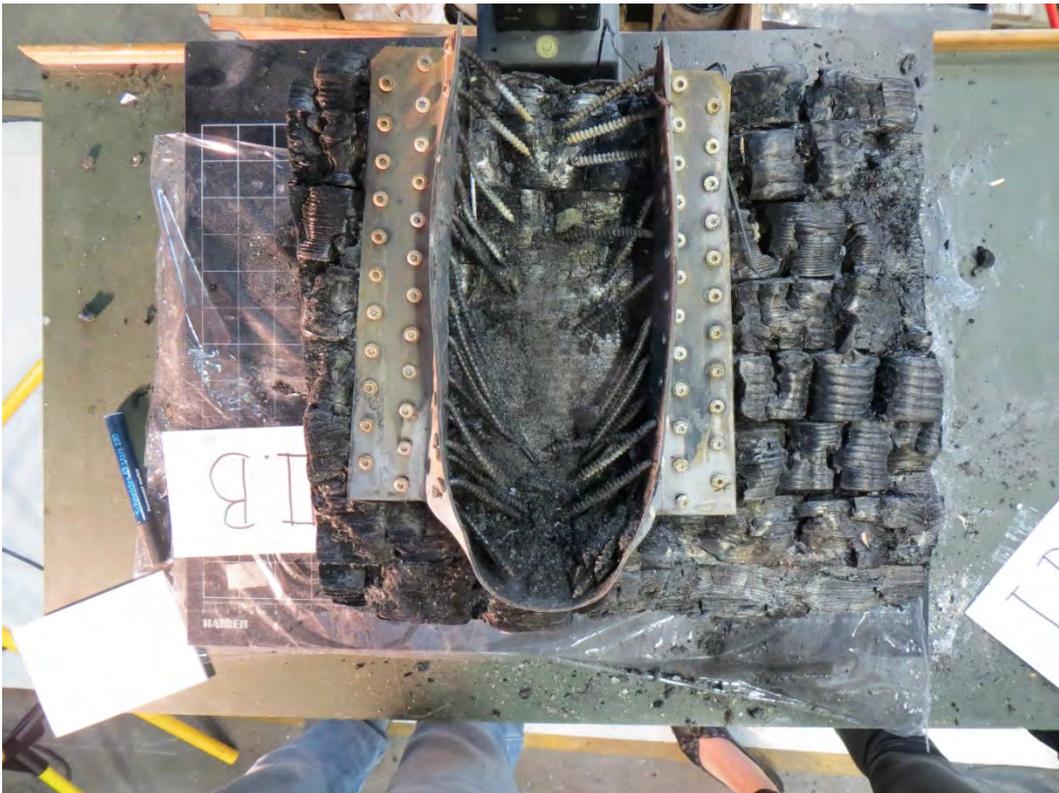


Abbildung 11-82: Versuchskörper B2, Balkenschuh nach Versuchsdurchführung

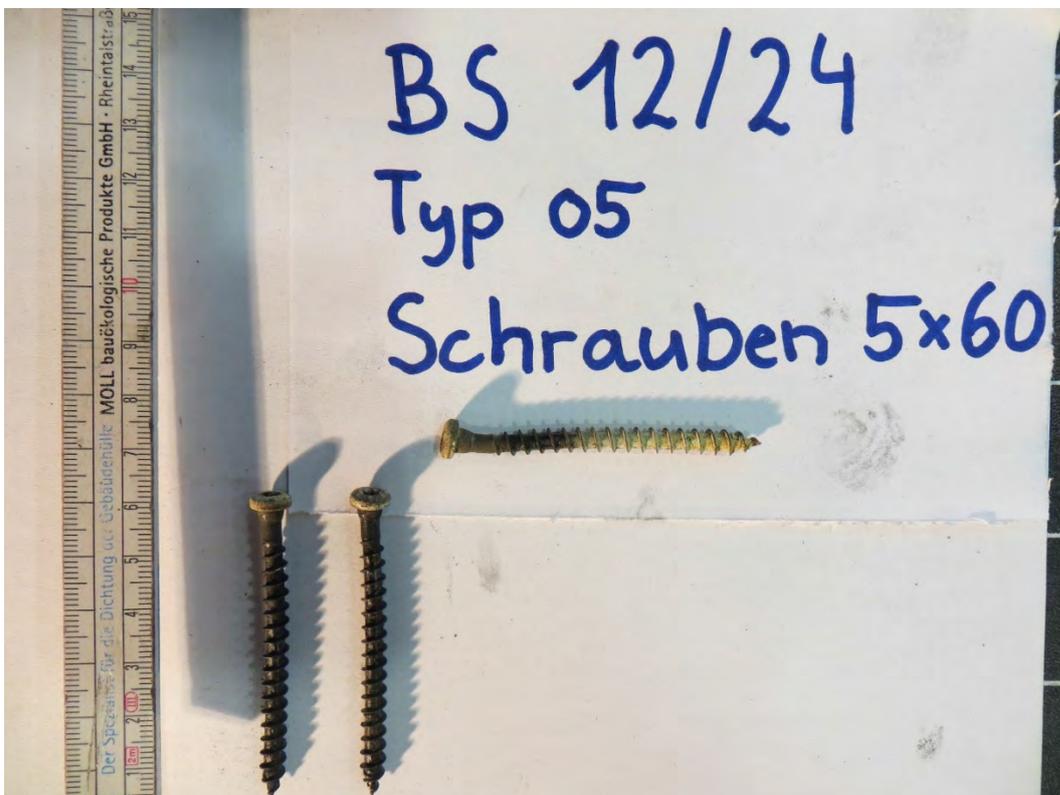


Abbildung 11-83: Versuchskörper B2, Verbindungsmittel nach Versuchsdurchführung



Abbildung 11-84: Versuchskörper B2, Stirnfläche des Nebenträgers

11.5.1.3 B3



Abbildung 11-85: Versuchskörper B3 im Ofen



Abbildung 11-86: Versuchskörper B3 nach der Versuchsdurchführung

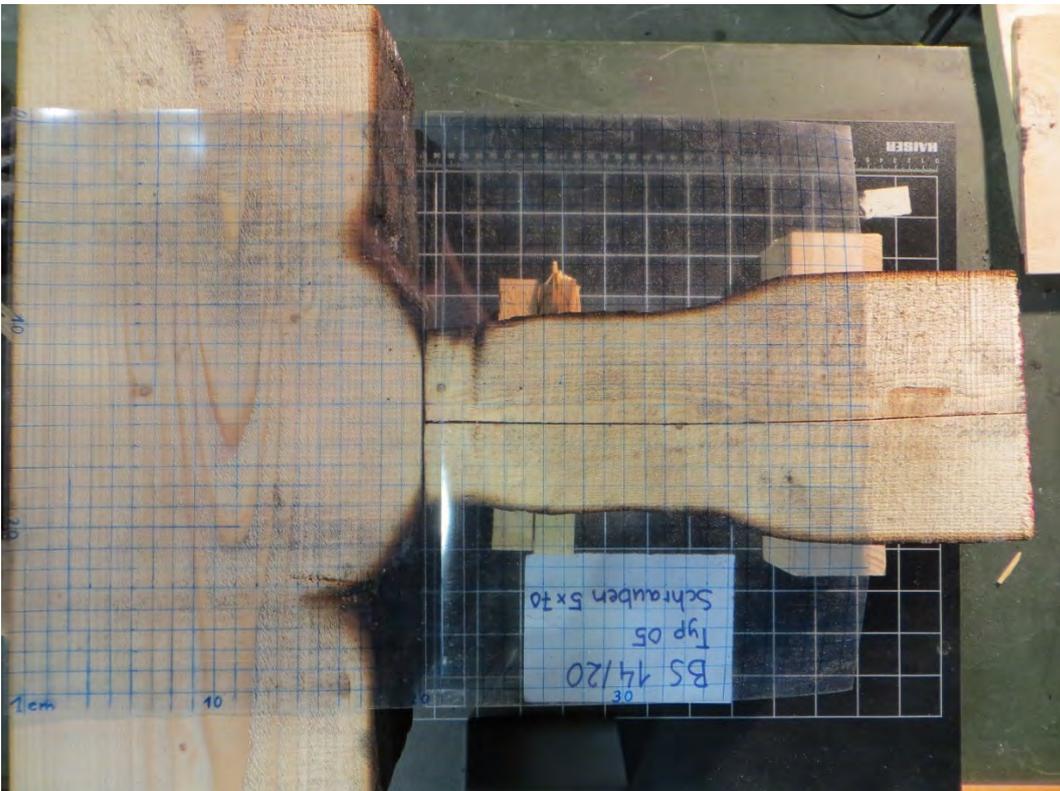


Abbildung 11-87: Versuchskörper B3, Horizontalschnitt

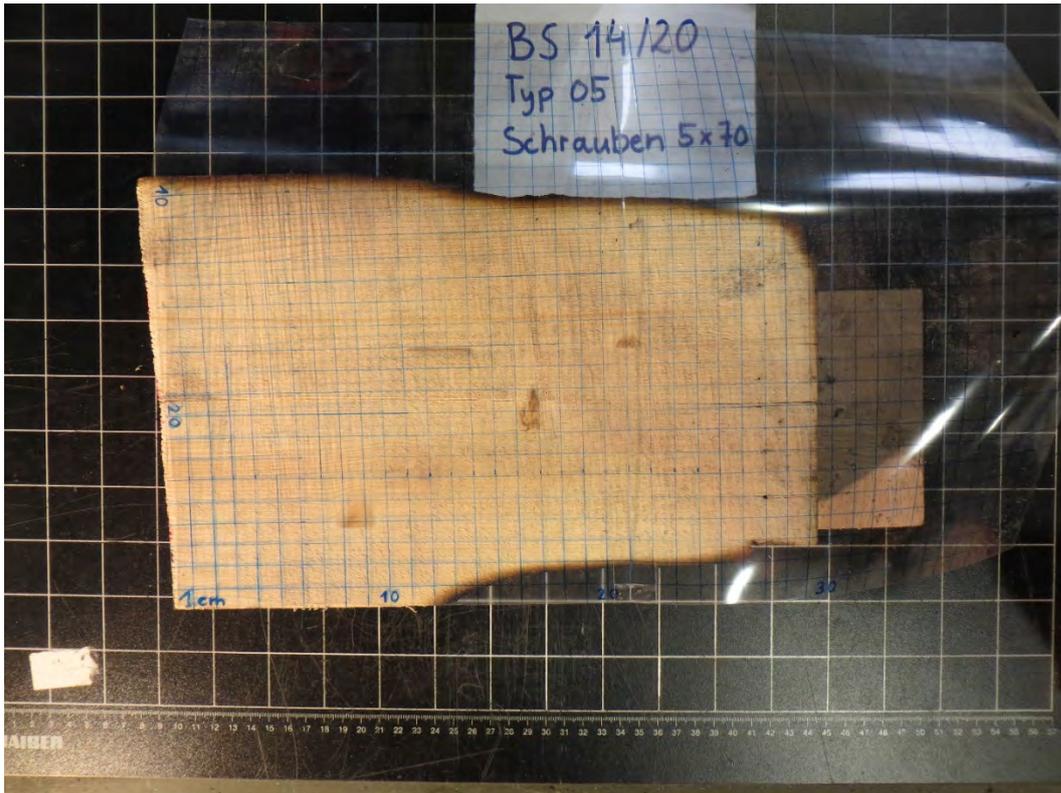


Abbildung 11-88: Versuchskörper B3, Vertikalschnitt



Abbildung 11-89: Versuchskörper B3, Balkenschuh nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-90: Versuchskörper B3, Verbindungsmittel nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-91: Versuchskörper B3, Stirnfläche des Nebenträgers

11.5.1.4 B3a



Abbildung 11-92: Versuchskörper B3a im Ofen



Abbildung 11-93: Versuchskörper B3a nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-94 Versuchskörper B3a, Horizontalschnitt

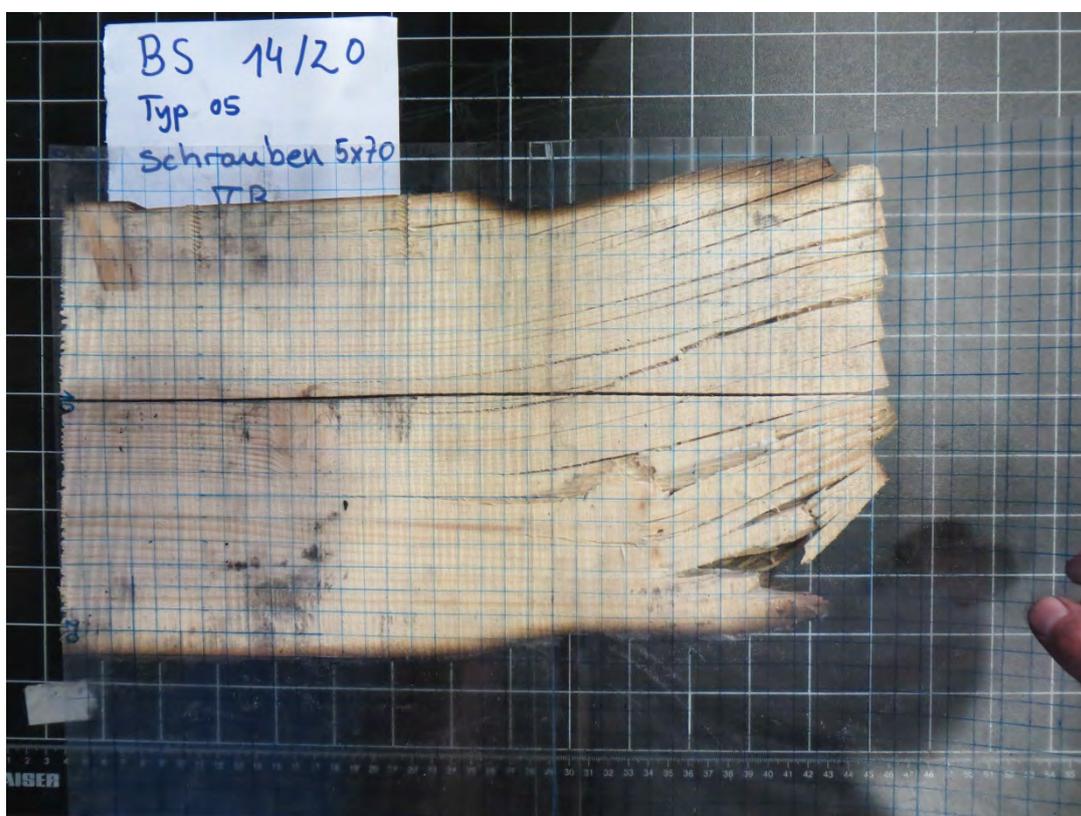


Abbildung 11-95 Vertikalschnitt

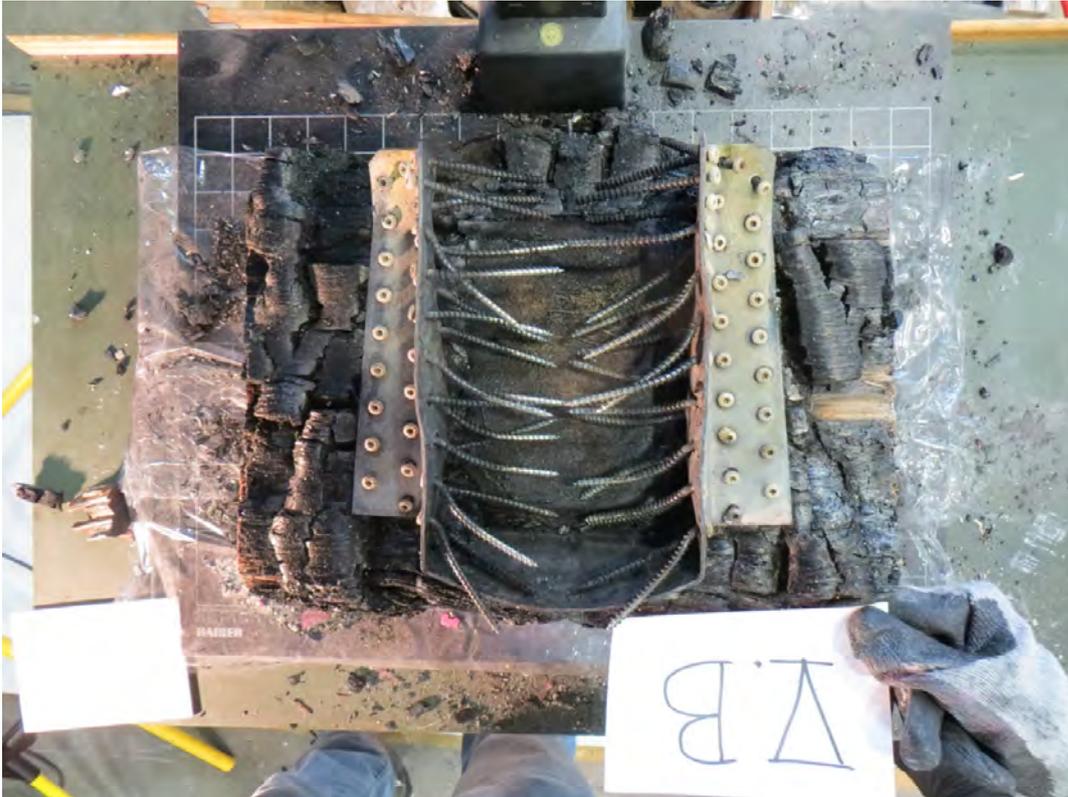


Abbildung 11-96 Balkenschuh nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-97 Verbindungsmittel nach der Versuchsdurchführung

11.5.1.5 B4



Abbildung 11-98: Versuchskörper B4 im Ofen



Abbildung 11-99: Versuchskörper B4 nach der Versuchsdurchführung

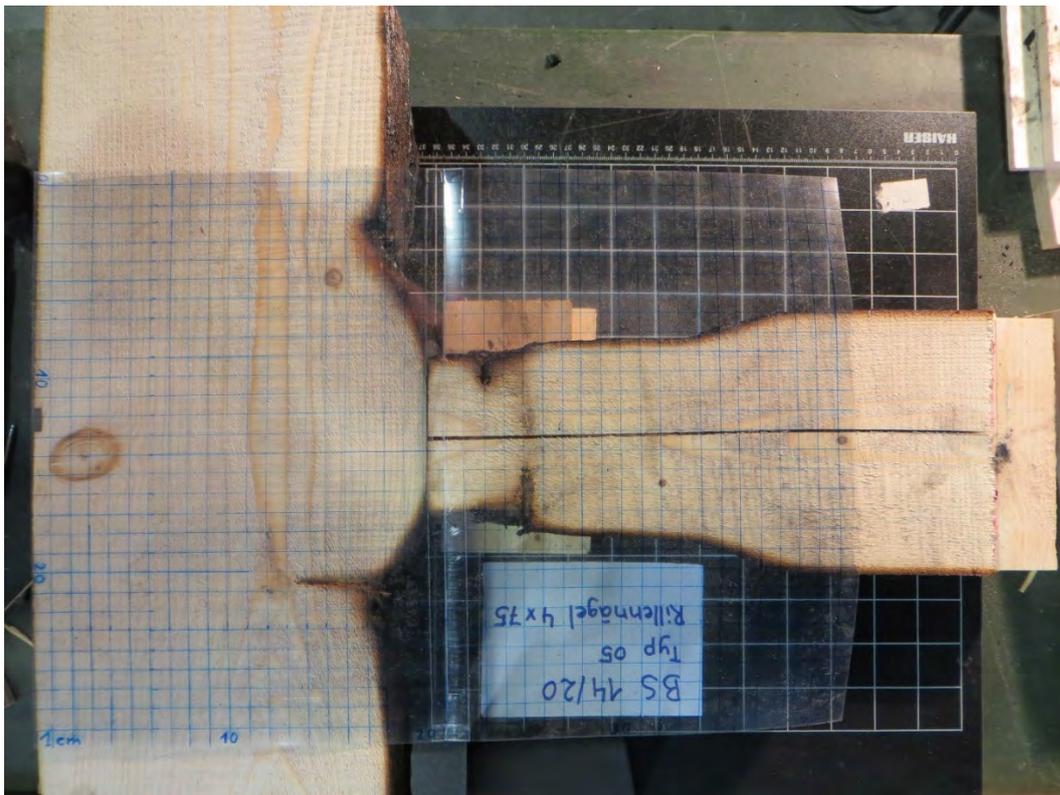


Abbildung 11-100: Versuchskörper B4, Horizontalschnitt



Abbildung 11-101: B4, Vertikalschnitt

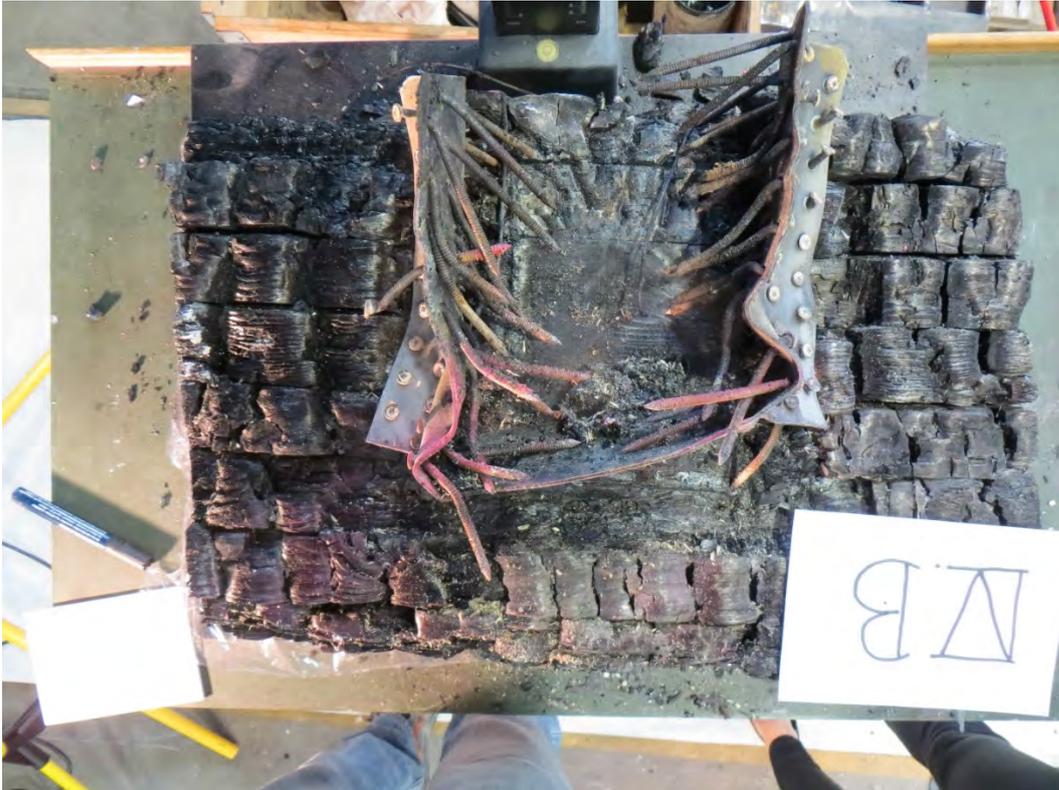


Abbildung 11-102: Versuchskörper B4, Balkenschuh nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-103: Versuchskörper B4, Verbindungsmittel nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-104: Versuchskörper B4, Stirnfläche des Nebenträgers

11.5.2 Schrauben

11.5.2.1 S1



Abbildung 11-105: Versuchskörper S1 im Ofen

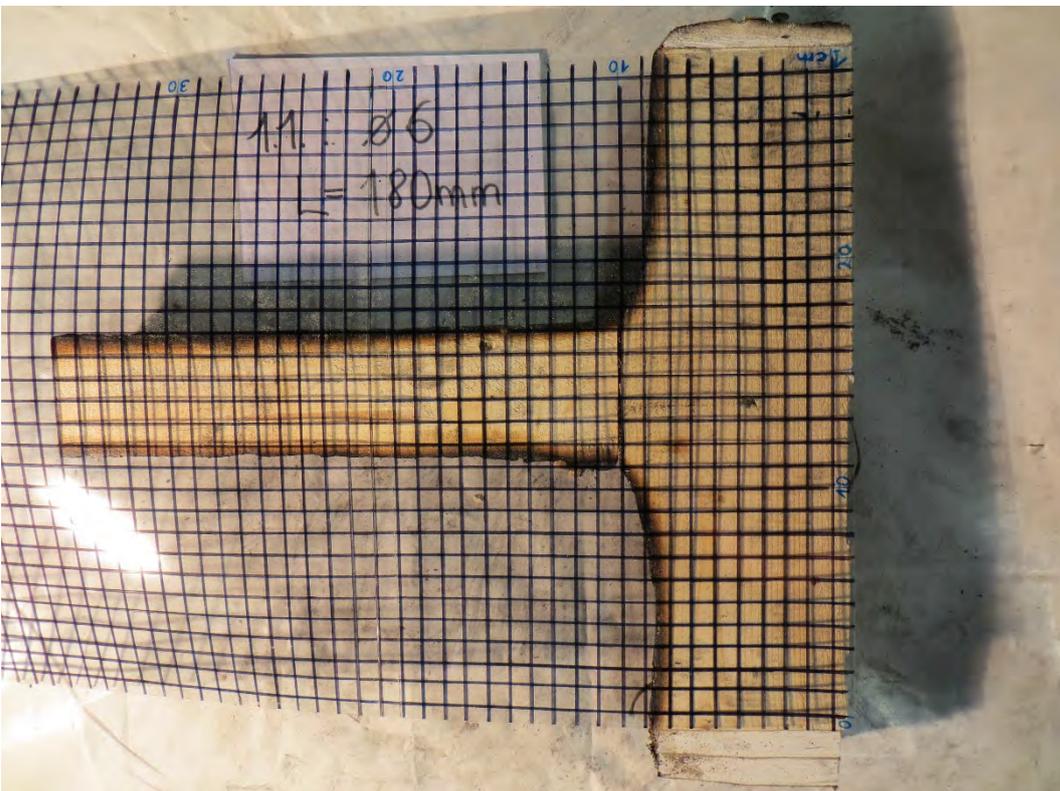


Abbildung 11-106: Versuchskörper S1, unbelastet; Horizontalschnitt

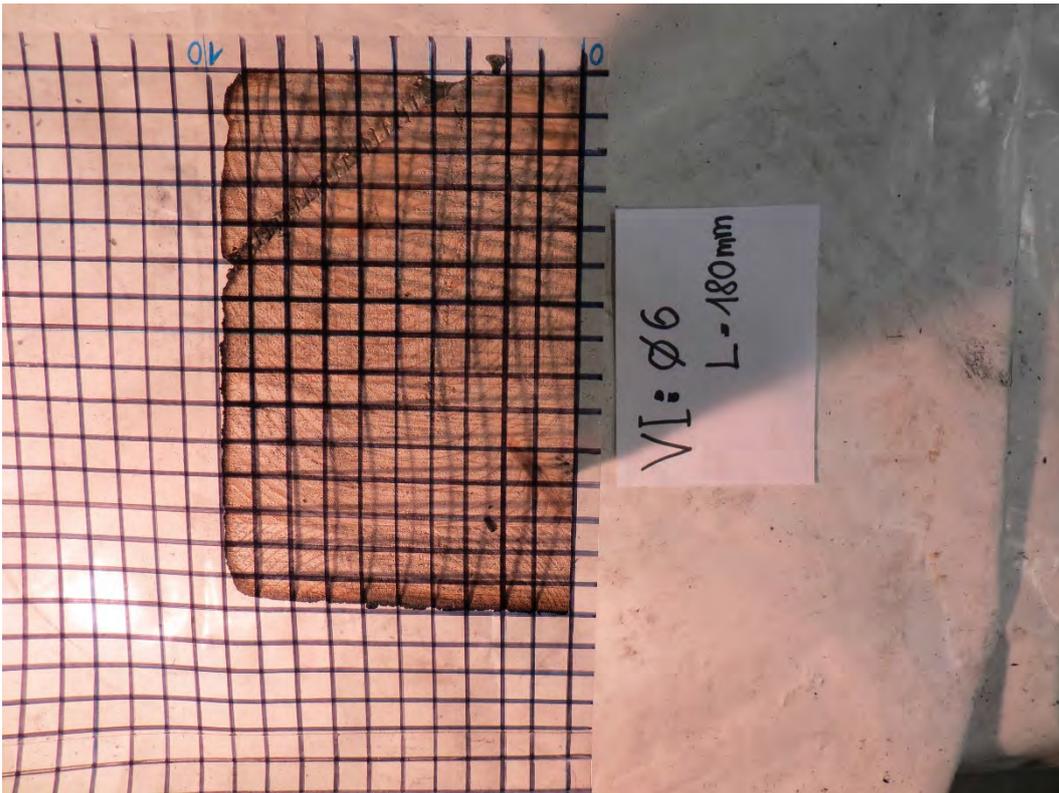


Abbildung 11-107: Versuchskörper S1, Vertikalschnitt durch Schraube des Hauptträgers

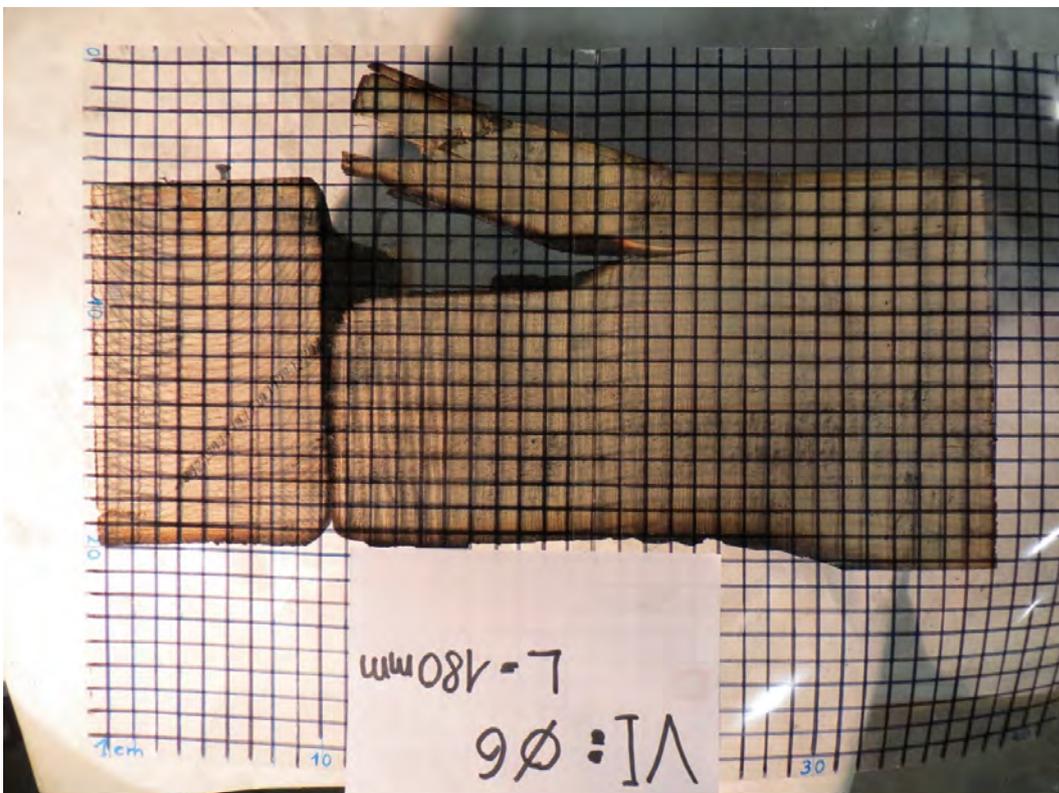


Abbildung 11-108: Versuchskörper S1, Vertikalschnitt durch Schraube des Nebenträgers

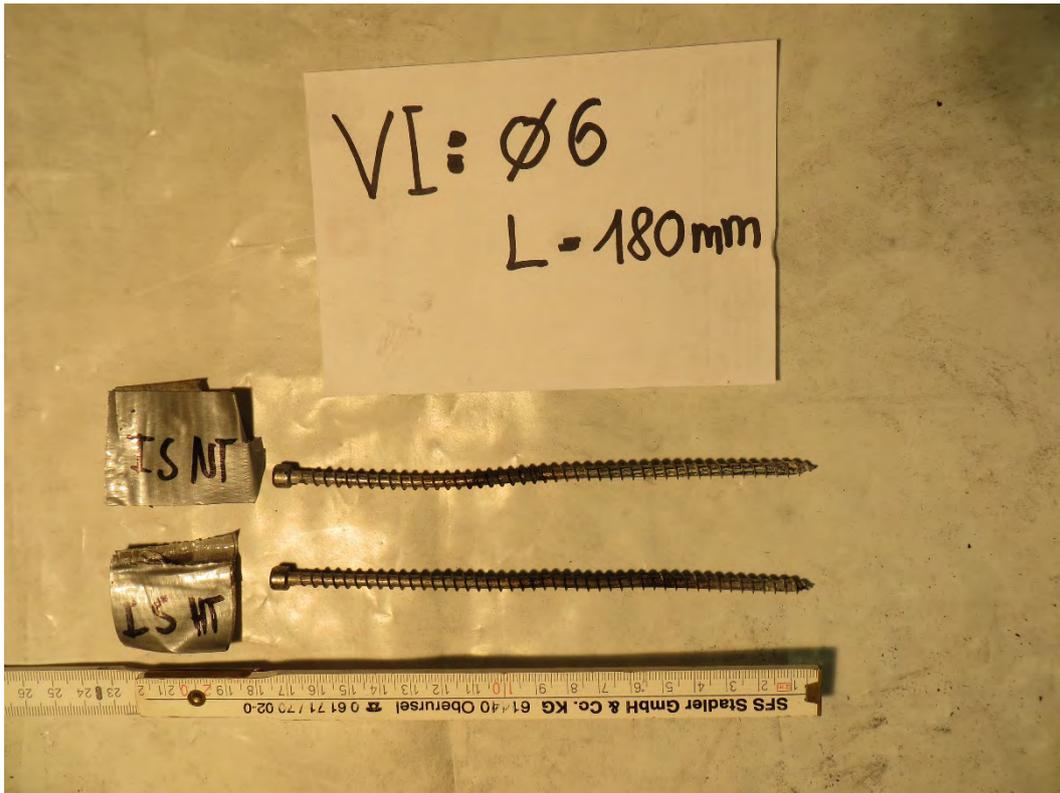


Abbildung 11-109: Versuchskörper S1, Verbindungsmittel nach der Versuchsdurchführung

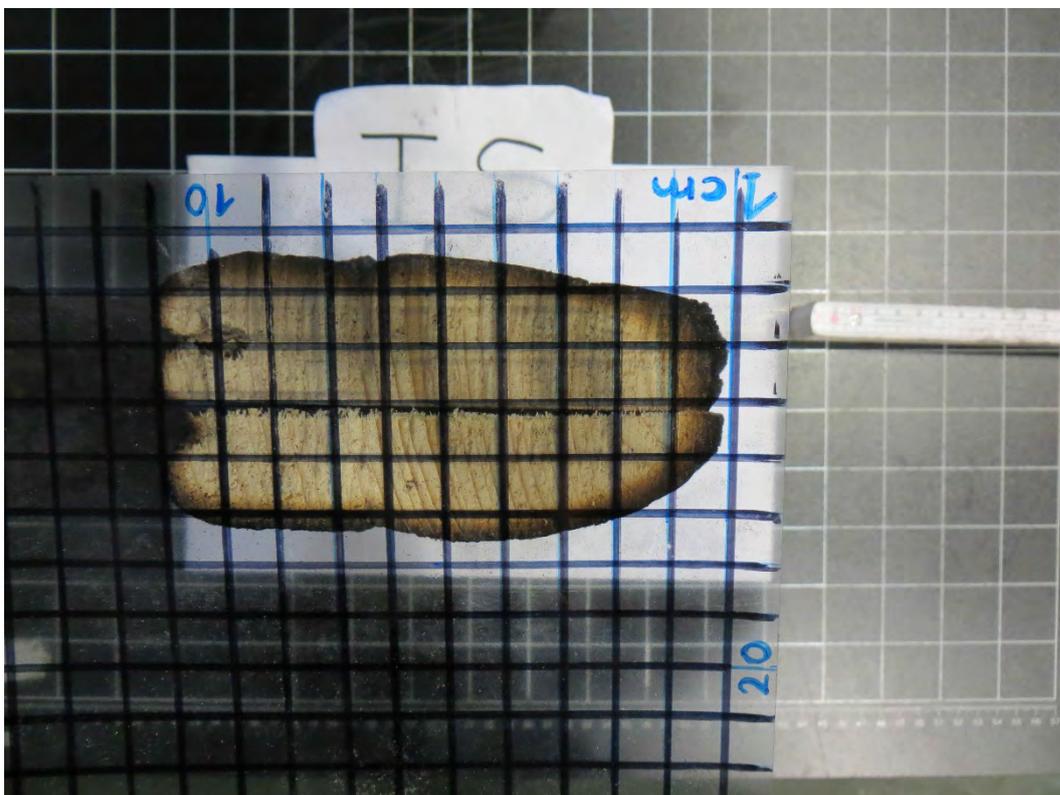


Abbildung 11-110: Versuchskörper S1, Randüberdeckung der Schrauben

11.5.2.2 S2



Abbildung 11-111: Versuchskörper S2 im Ofen



Abbildung 11-112: Versuchskörper S2, unbelastet; Horizontalschnitt



Abbildung 11-113: Versuchskörper S2, Vertikalschnitt durch Schraube des Hauptträgers



Abbildung 11-114: Versuchskörper S2, Vertikalschnitt durch Schraube des Nebenträgers

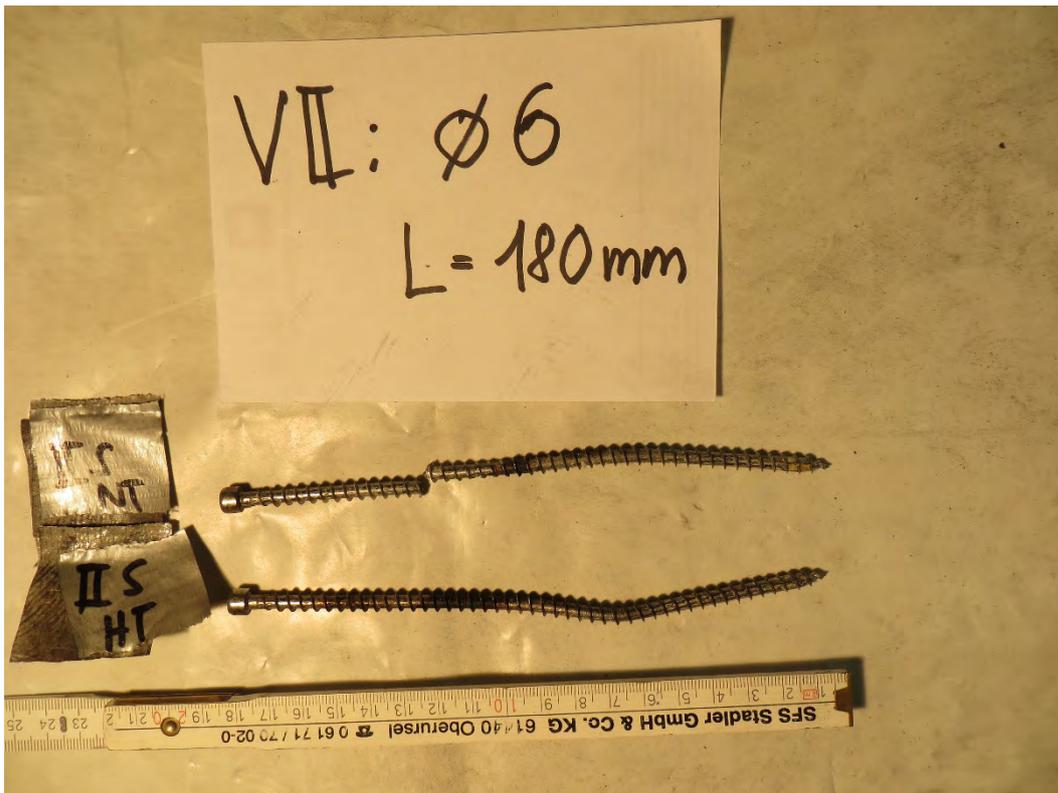


Abbildung 11-115: Versuchskörper S2, Verbindungsmittel nach Versuchsdurchführung

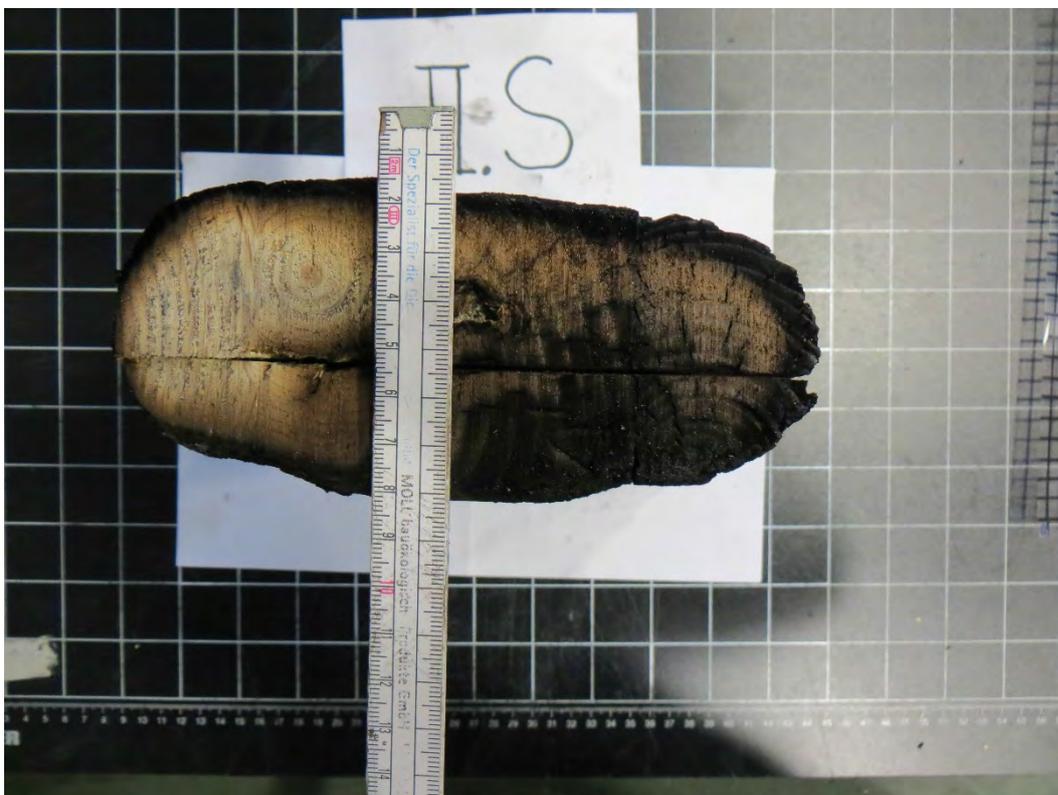


Abbildung 11-116: Versuchskörper S2, Randüberdeckung der Schrauben

11.5.2.3 S3



Abbildung 11-117: Versuchskörper S3 im Ofen

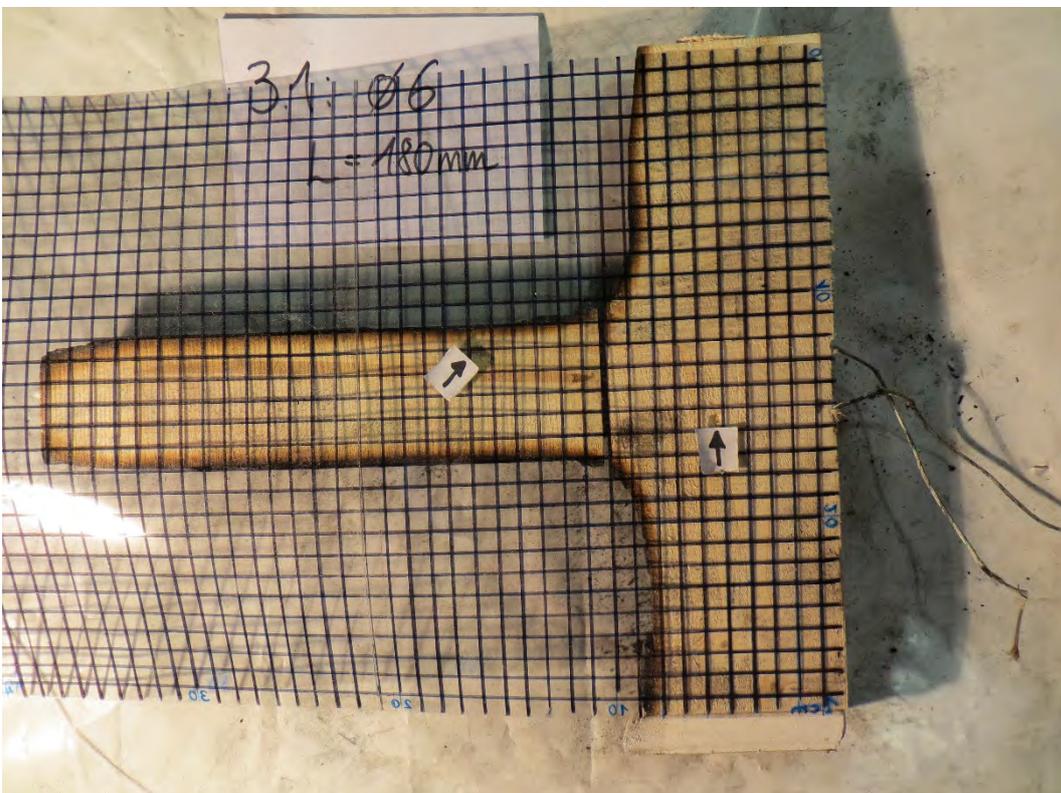


Abbildung 11-118: Versuchskörper S3, unbelastet; Horizontalschnitt



Abbildung 11-119: Versuchskörper S3, Vertikalschnitt durch Schraube des Hauptträgers

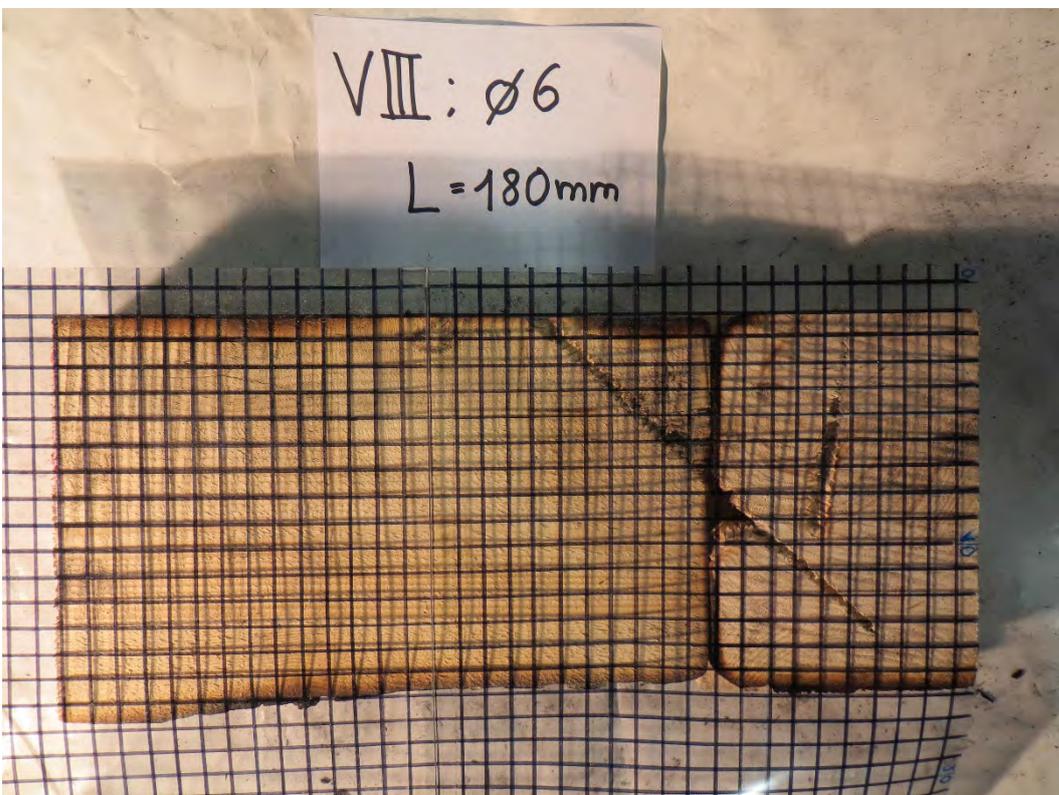


Abbildung 11-120: Versuchskörper S3, Vertikalschnitt durch Schraube des Nebenträgers

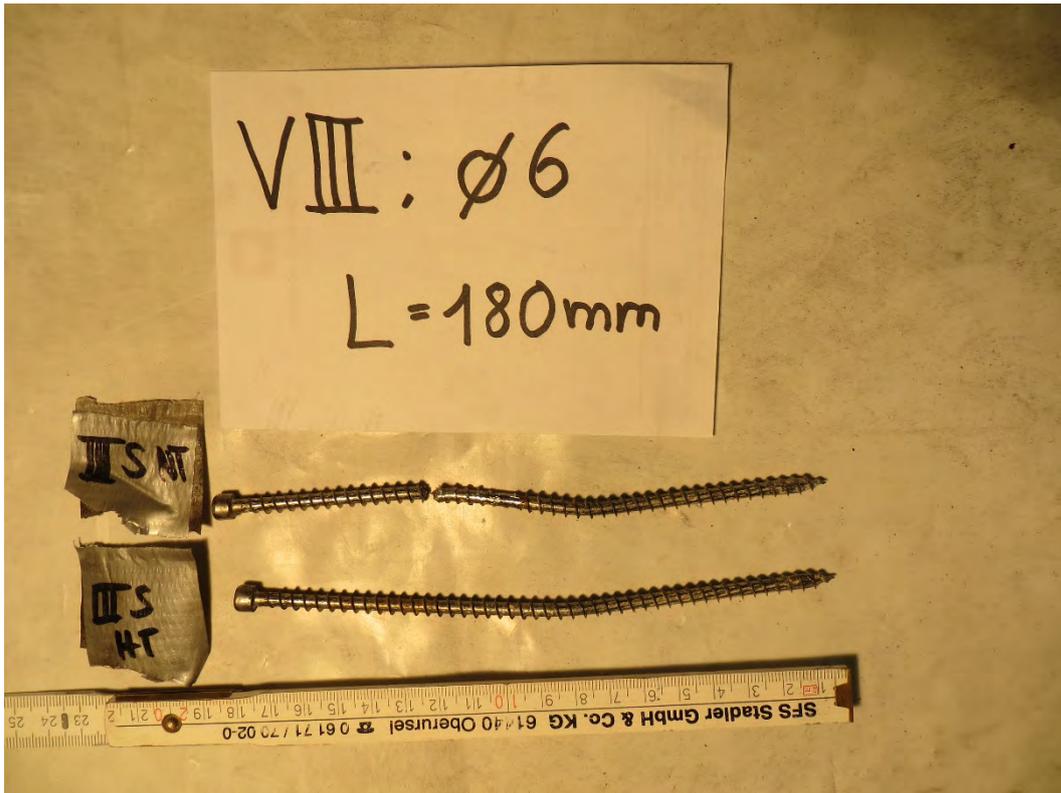


Abbildung 11-121: Versuchskörper S3, Verbindungsmittel nach Versuchsdurchführung



Abbildung 11-122: Versuchskörper S3, Randüberdeckung der Schrauben

11.5.2.4 S4



Abbildung 11-123: Versuchskörper S4 im Ofen

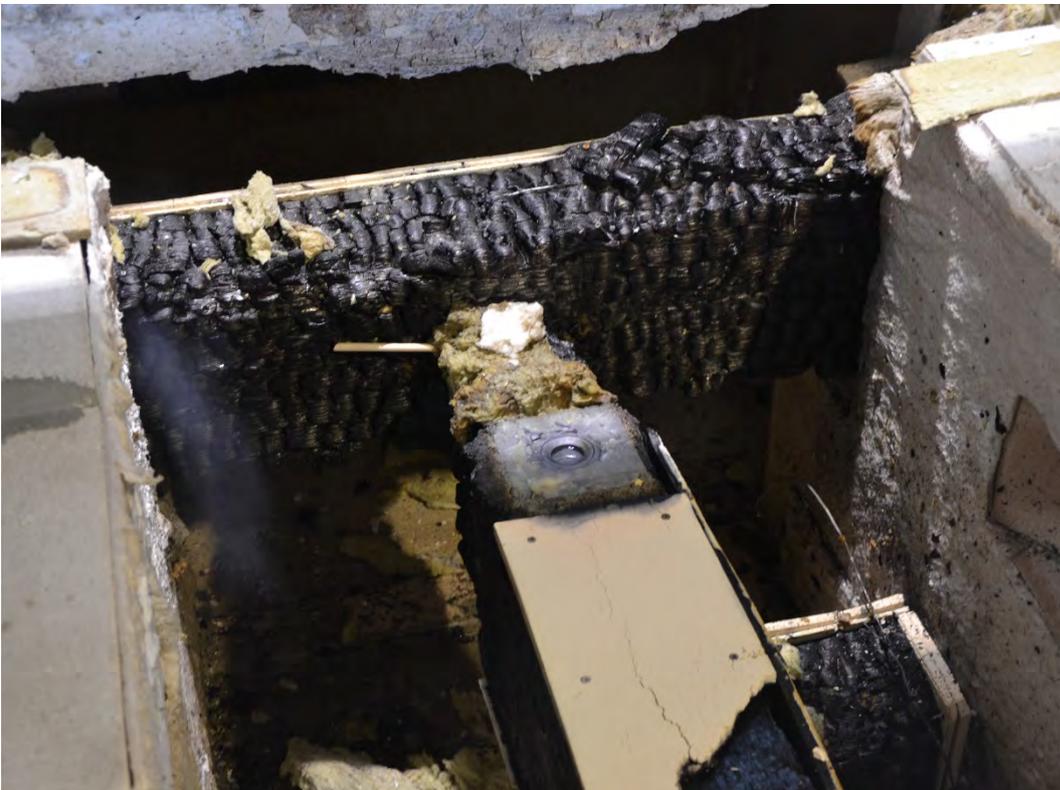


Abbildung 11-124: Versuchskörper S4 nach der Versuchsdurchführung



Abbildung 11-125: Versuchskörper S4, unbelastet; Horizontalschnitt



Abbildung 11-126: Versuchskörper S4, Vertikalschnitt durch Schraube des Hauptträgers

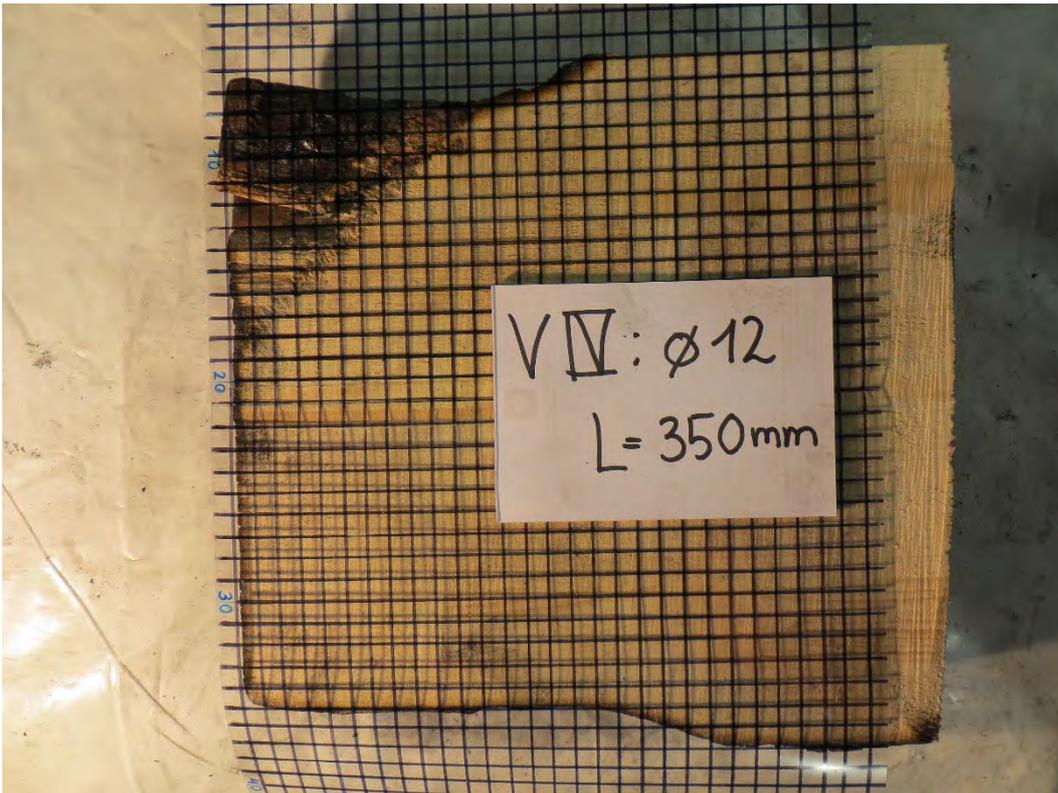


Abbildung 11-127: Versuchskörper S4, Vertikalschnitt durch Schraube des Nebenträgers



Abbildung 11-128: Versuchskörper S4, Verbindungsmittel nach der Versuchsdurchführung, die Schraube des Nebenträgers wurde abgerissen



Abbildung 11-129: Versuchskörper S4, Randüberdeckung der Schrauben

11.6 Lastdiagramme Prüfungen im Kaltzustand

11.6.1 Balkenschuhe

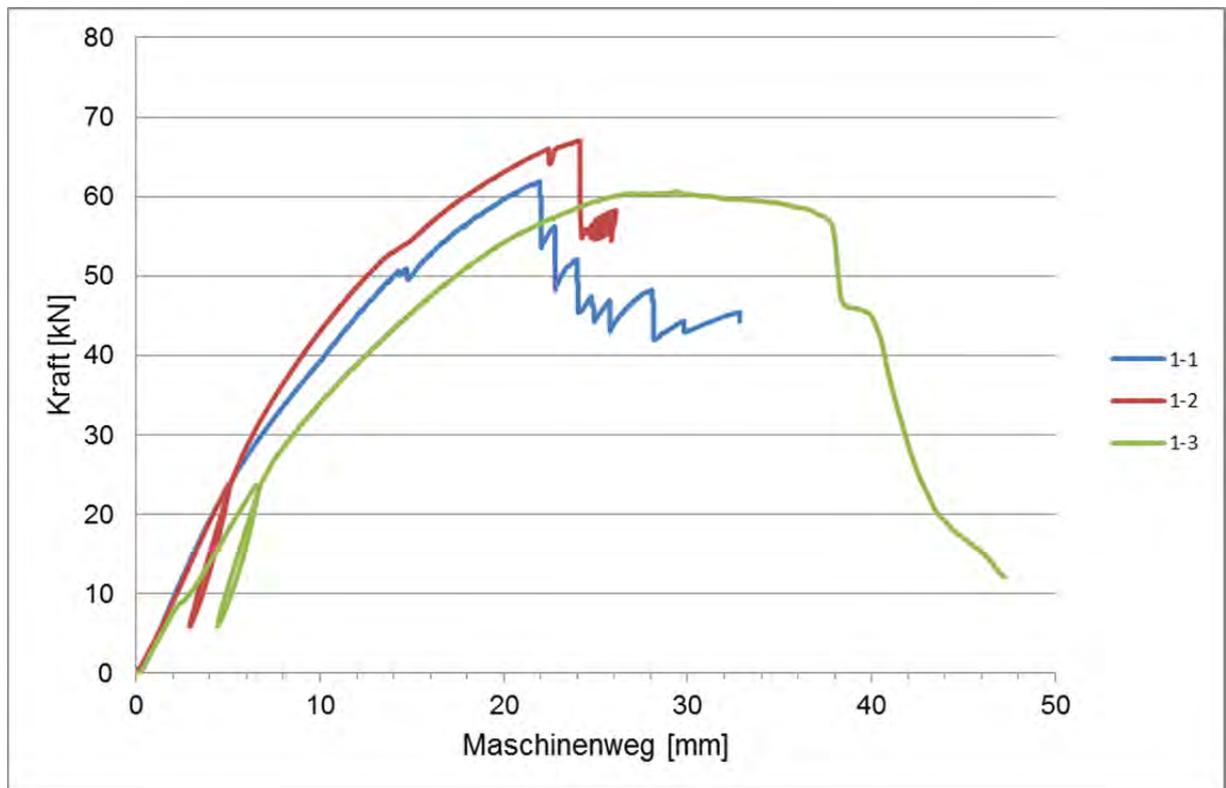


Abbildung 11-130: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit Balkenschuh B1 Typ 04 ($h/b = 120/160\text{mm}^2$, Nägel 4x60) unter Raumtemperatur

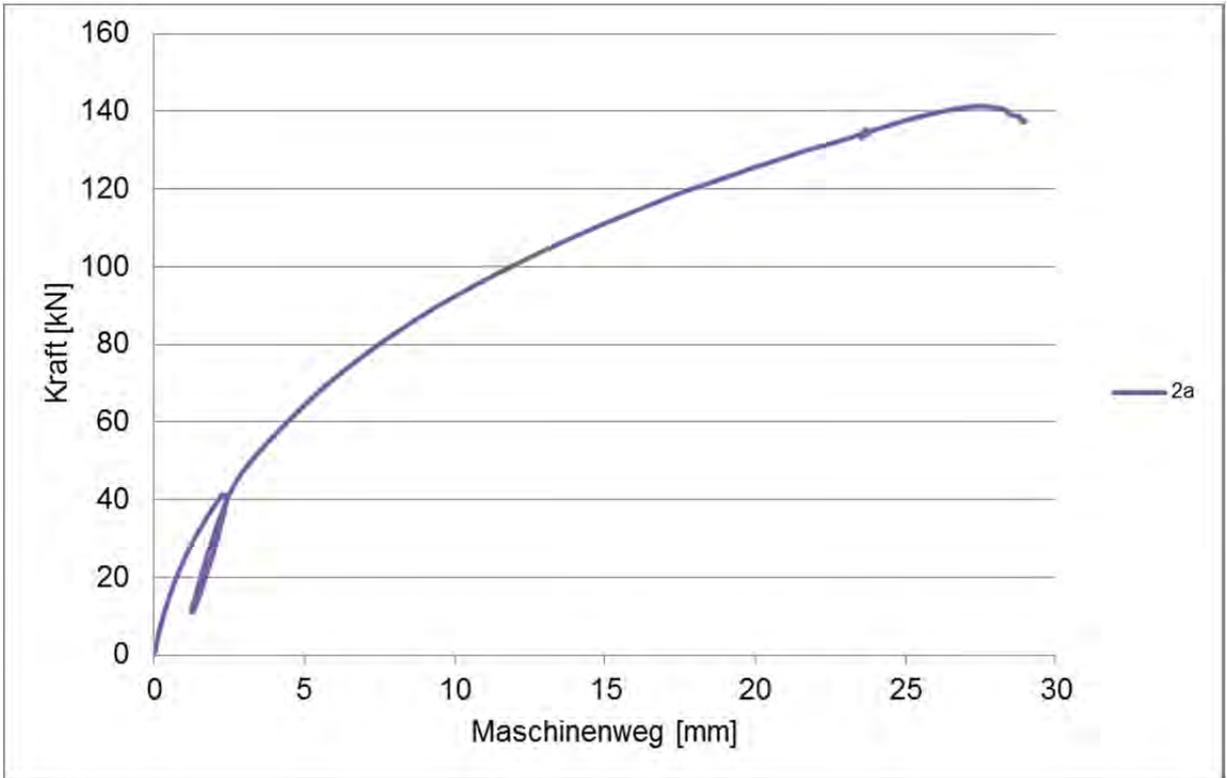


Abbildung 11-131: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit Balkenschuh B2 Typ 05 ($h/b = 120/240\text{mm}^2$, Schrauben 5x60) unter Raumtemperatur

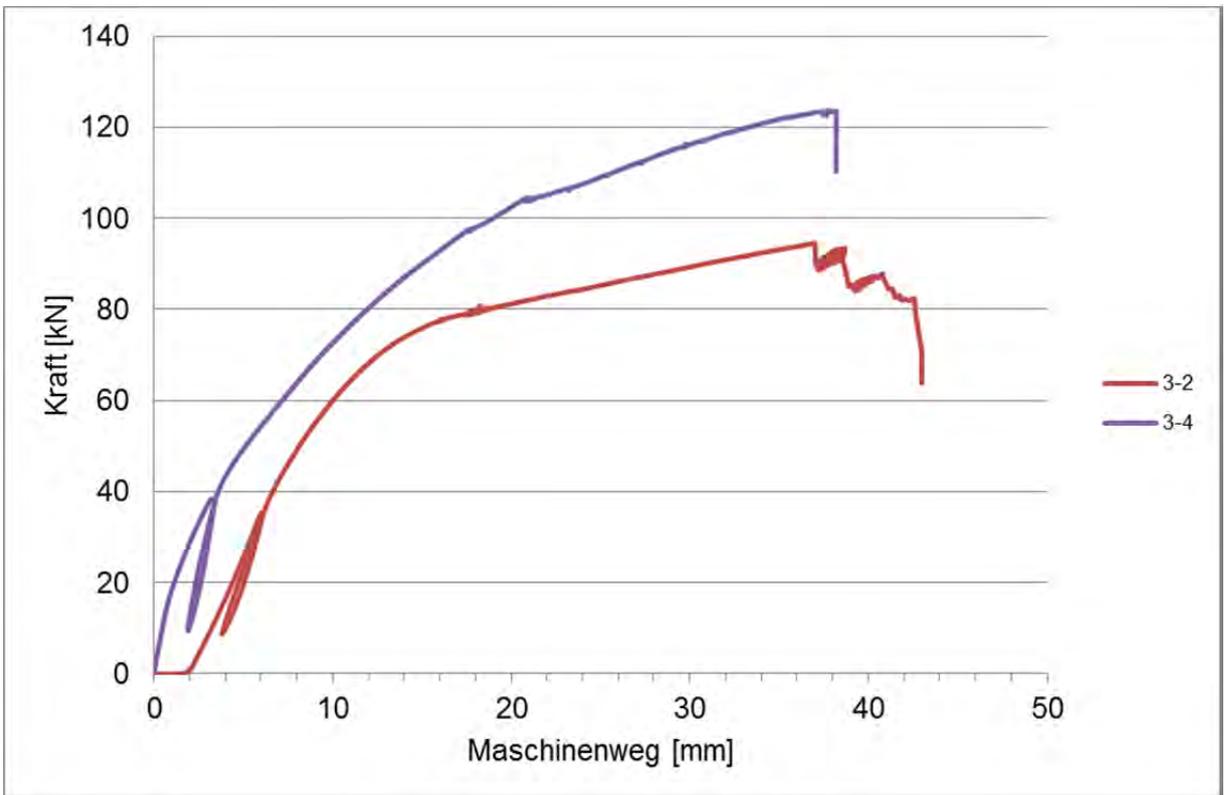


Abbildung 11-132: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit Balkenschuh B3 Typ 05 ($b/h = 140/200\text{mm}^2$, Schrauben 5x70) unter Raumtemperatur

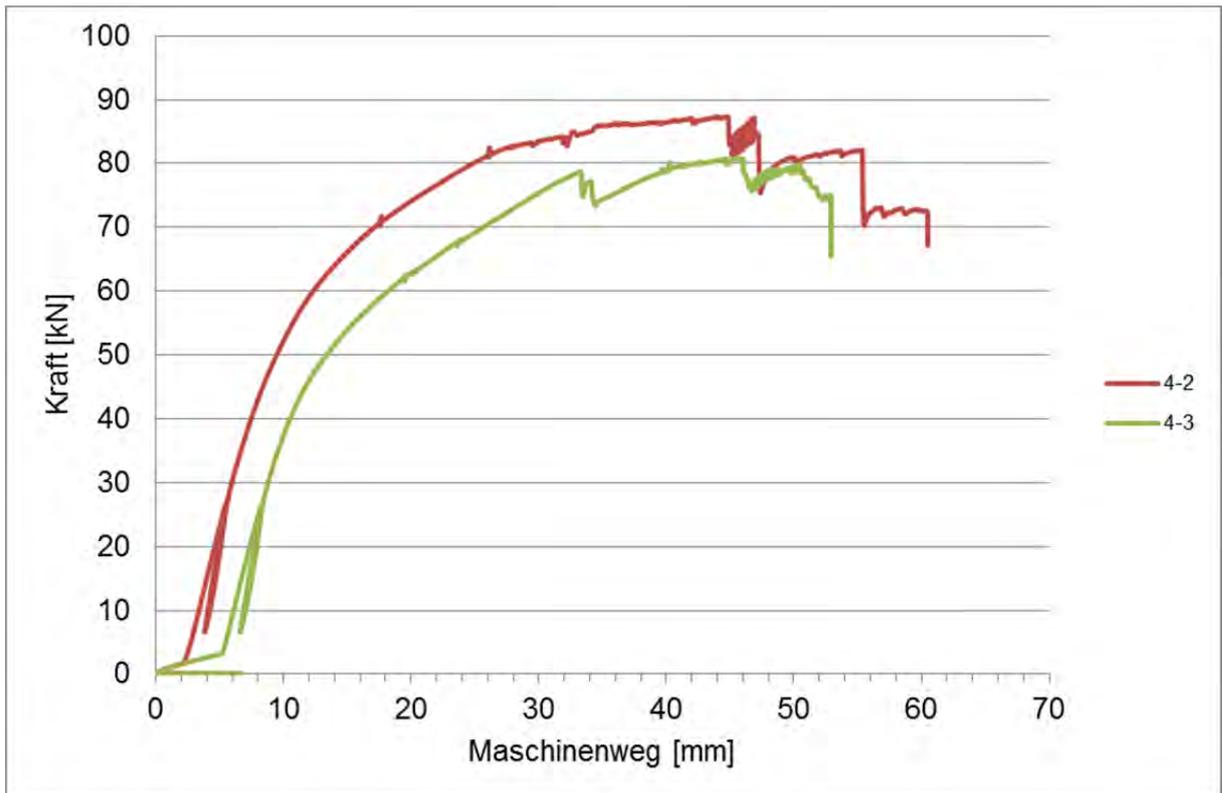


Abbildung 11-133: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit Balkenschuh B4 Typ 05 ($b/h = 140/200\text{mm}^2$, Nägel 4x75) unter Raumtemperatur

11.6.2 Schrauben

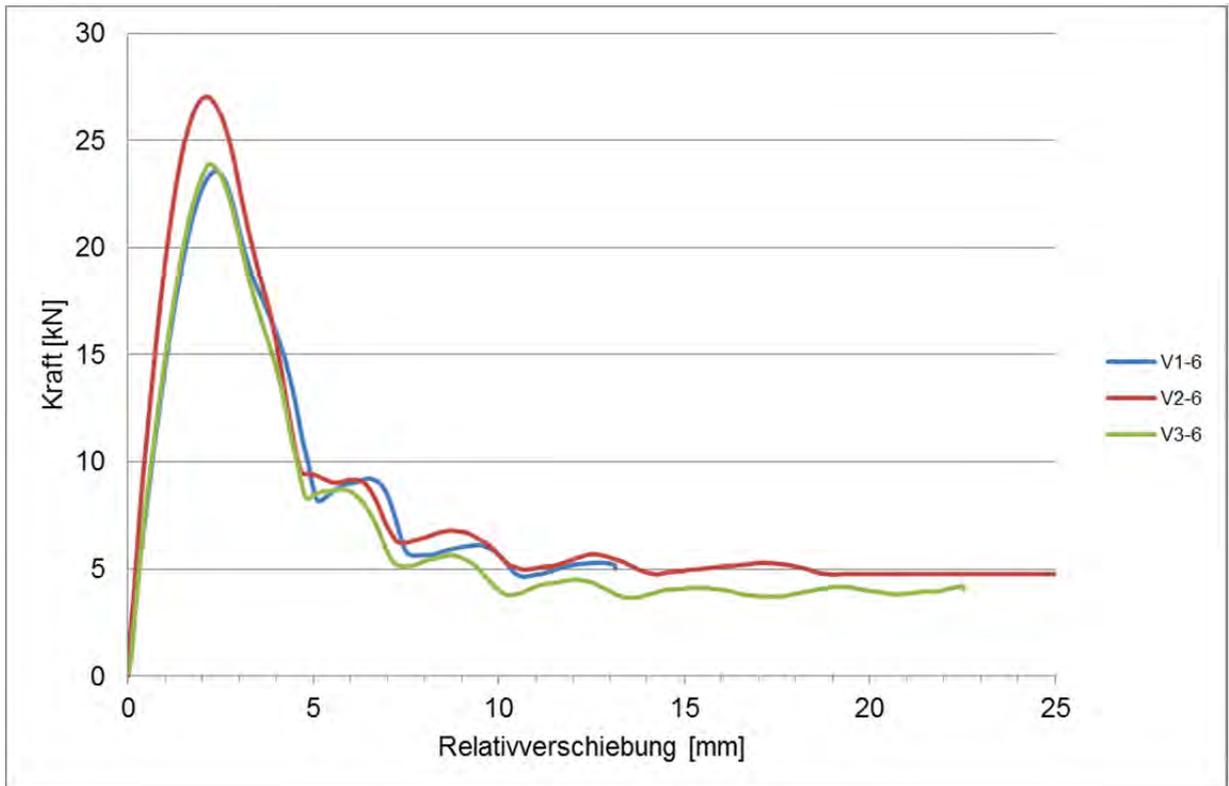


Abbildung 11-134: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben (\varnothing 6 mm, Länge 180 mm, Winkel 45° zur Faser) unter Raumtemperatur

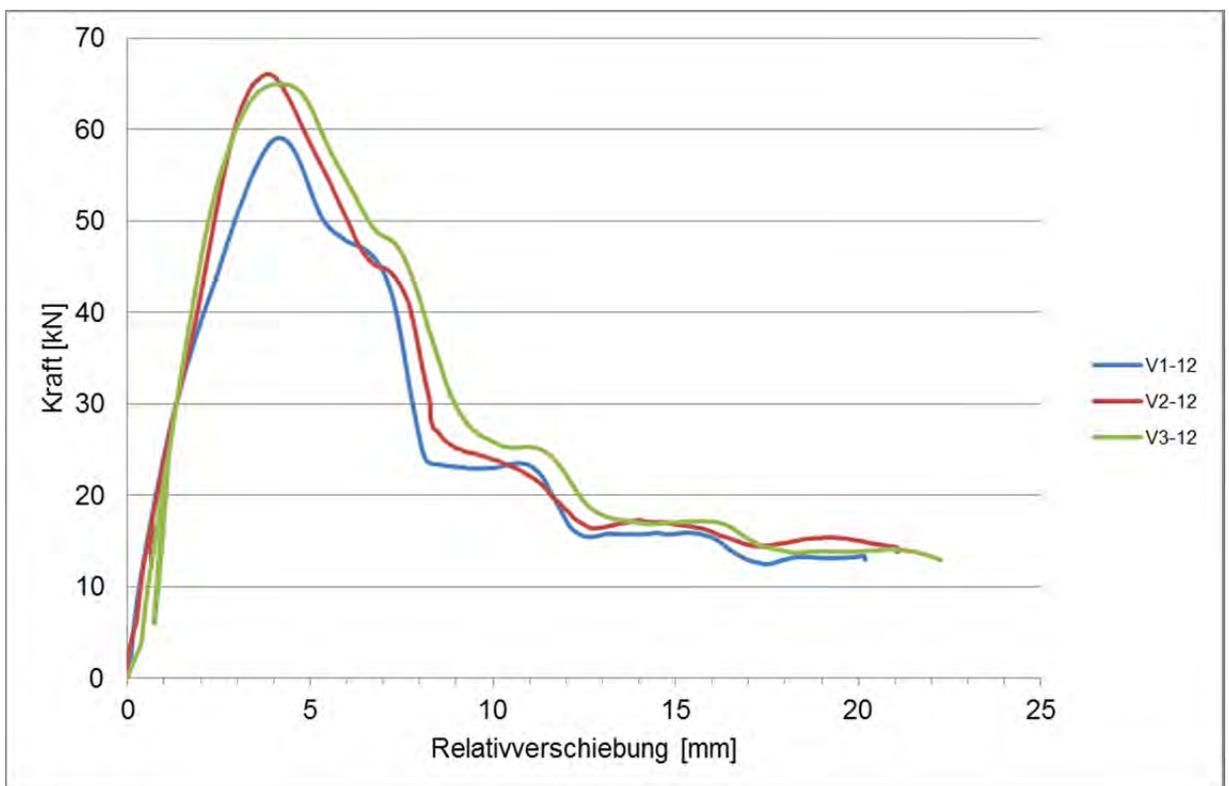


Abbildung 11-135: Kraft-Weg-Diagramm der Haupt-Nebenträgerverbindung mit gekreuzten Vollgewindeschrauben (\varnothing 12 mm, Länge 350 mm, Winkel 45° zur Faser) unter Raumtemperatur

11.7 Lastdiagramme belastete Brandversuche

11.7.1 Balkenschuhe

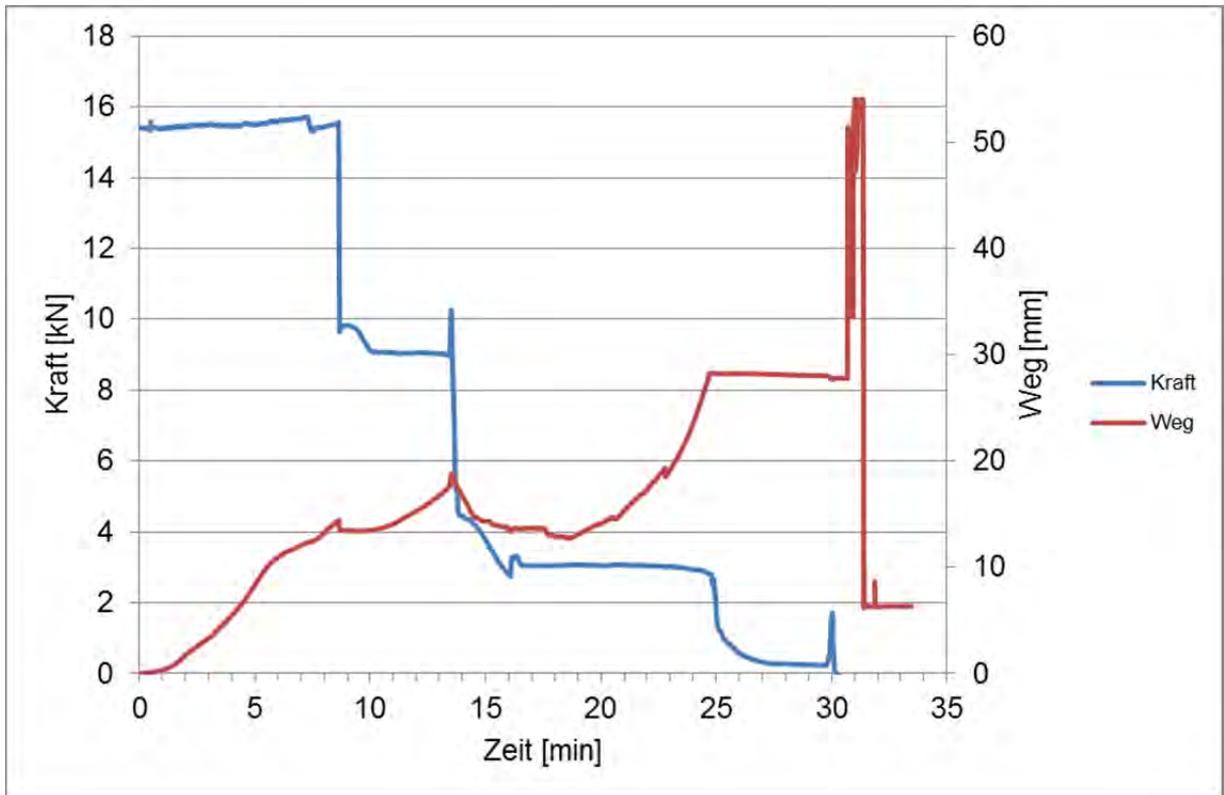


Abbildung 11-136: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung B1 ($b/h = 120/160\text{mm}^2$, Nägel 4x60)

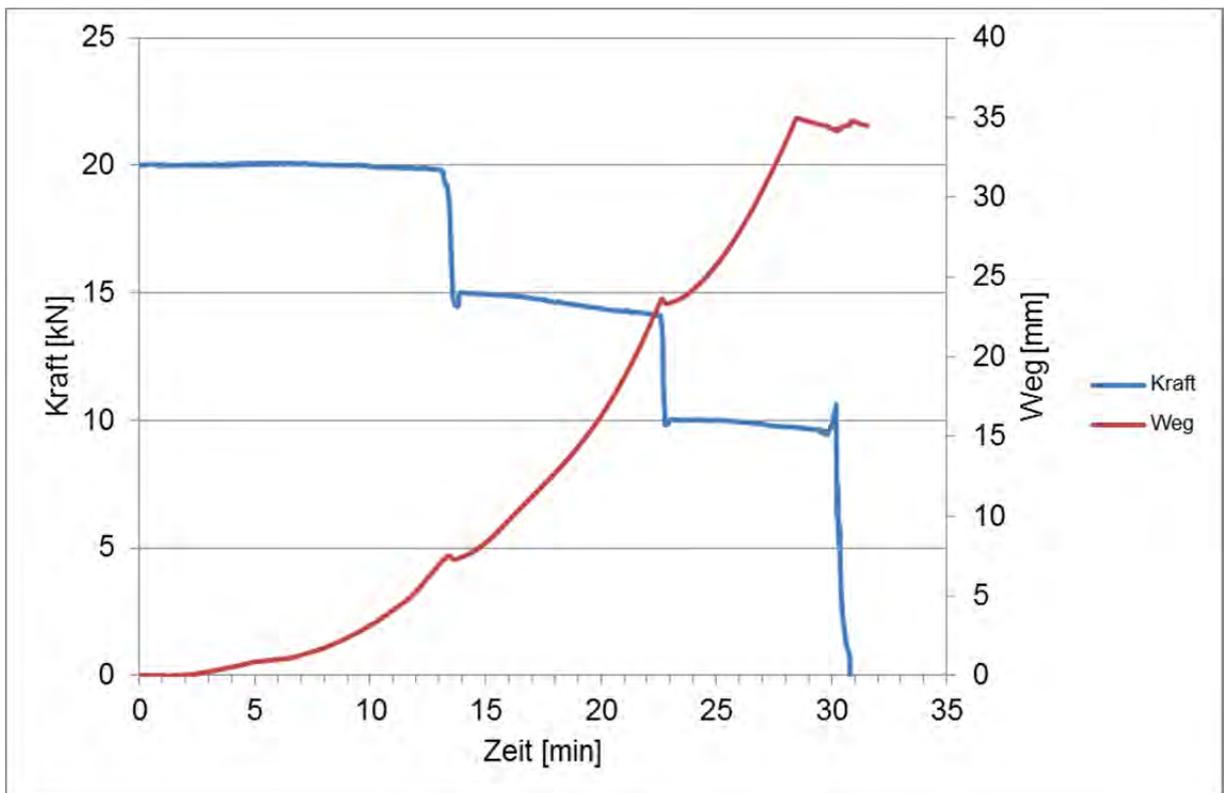


Abbildung 11-137: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung B2 ($b/h = 120/240\text{mm}^2$, Schrauben 5x60)

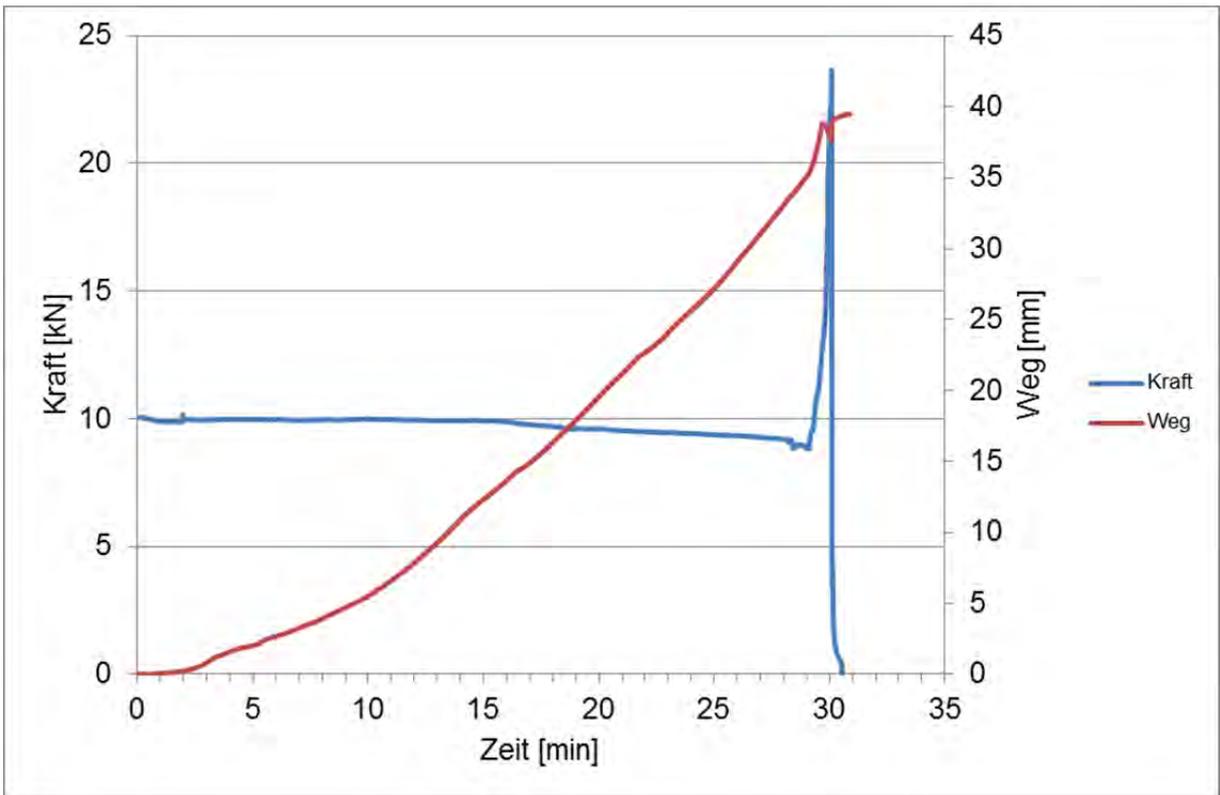


Abbildung 11-138: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung B3 ($b/h = 140/200\text{mm}^2$, Schrauben 5x70)

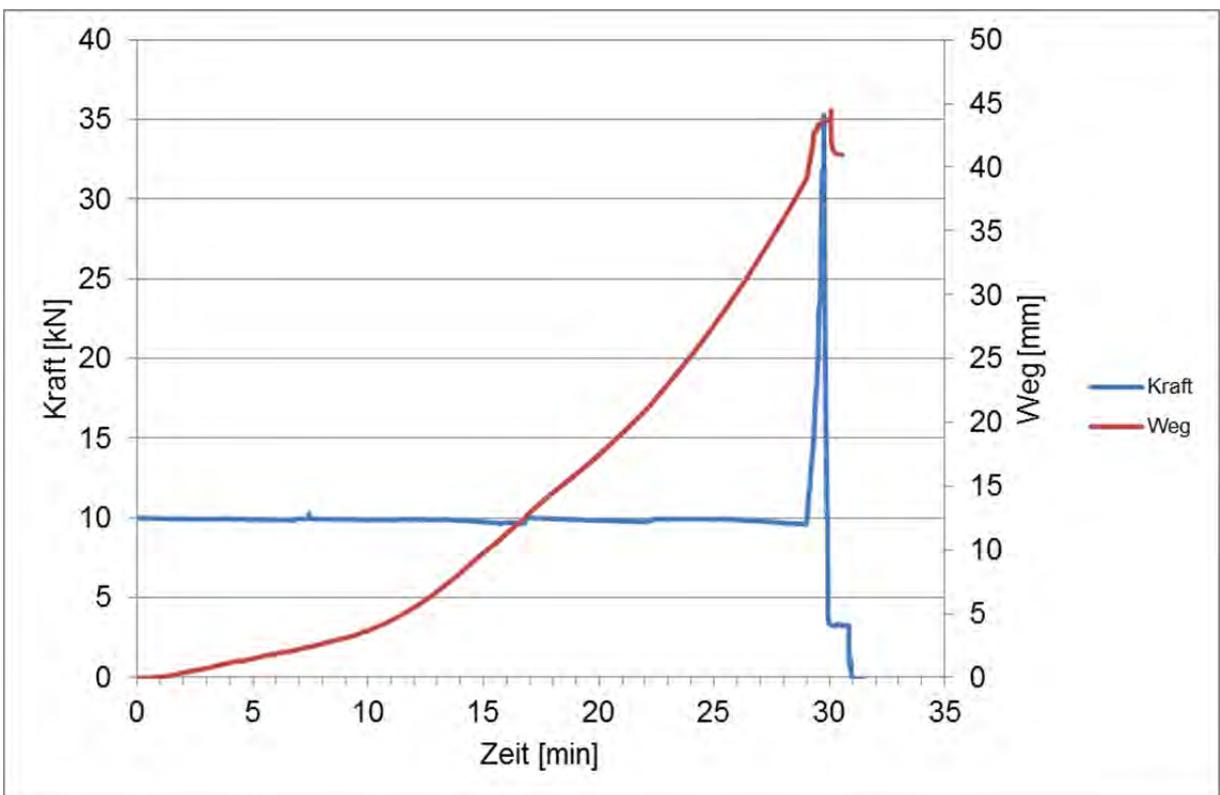


Abbildung 11-139: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung B3a ($b/h = 140/200\text{mm}^2$, Schrauben 5x70, Vollausschraubung)

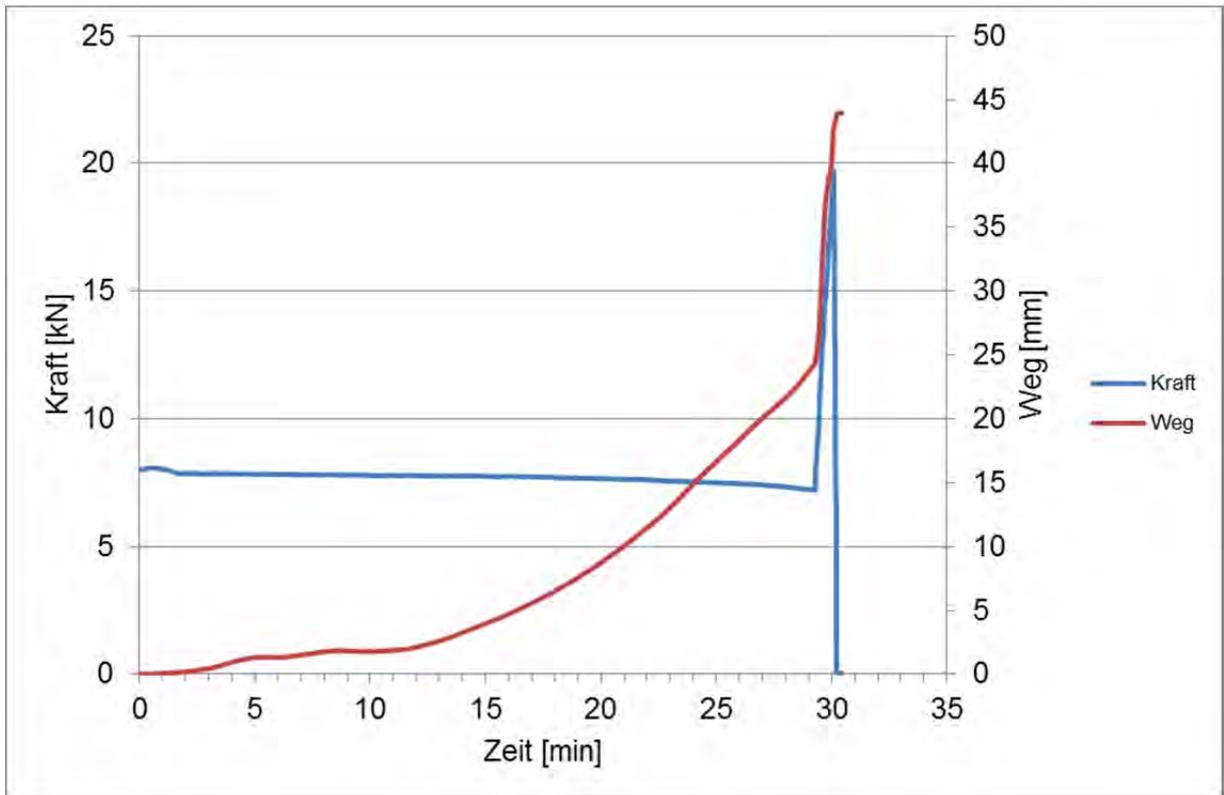


Abbildung 11-140: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung B4 ($b/h = 140/200\text{mm}^2$, Nägel 5x70)

11.7.2 Schrauben

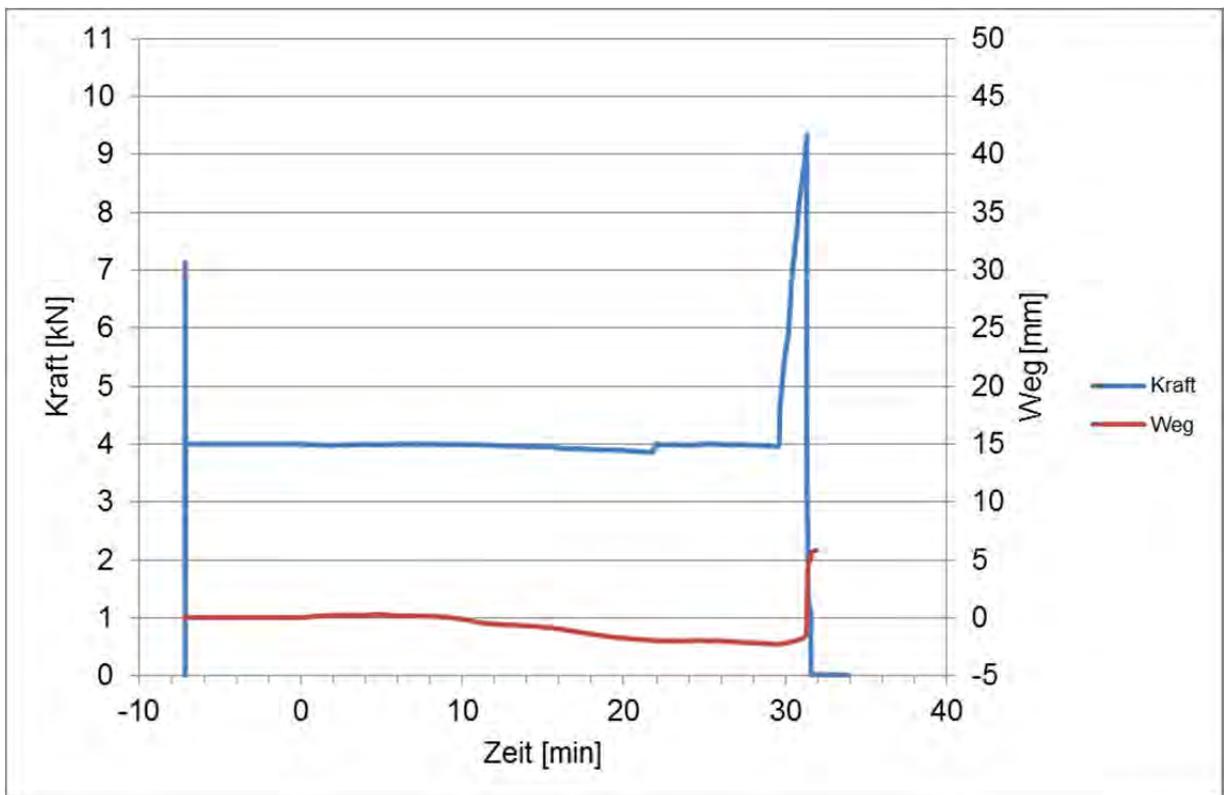


Abbildung 11-141: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung S1 ($d=6\text{mm}$, $l= 180\text{ mm}$, 45°)

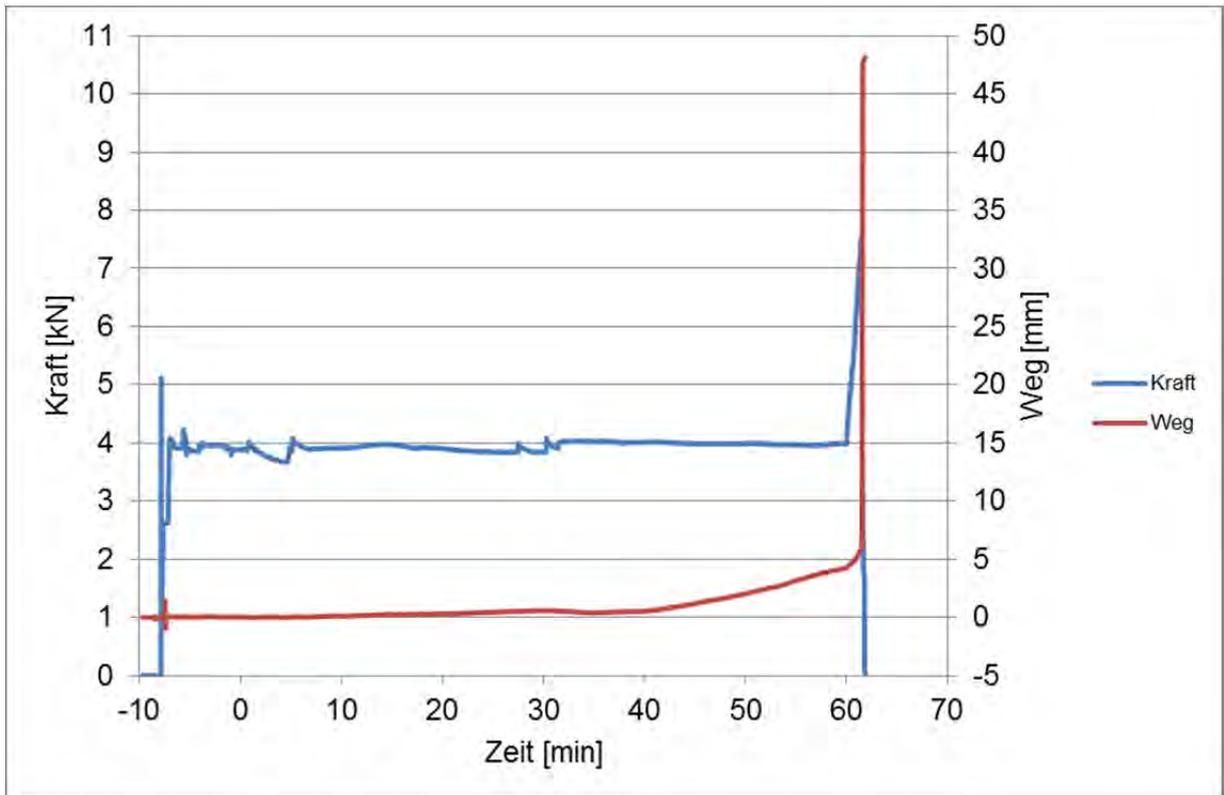


Abbildung 11-142: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung S2 (d=6mm, l= 180 mm, 45°)

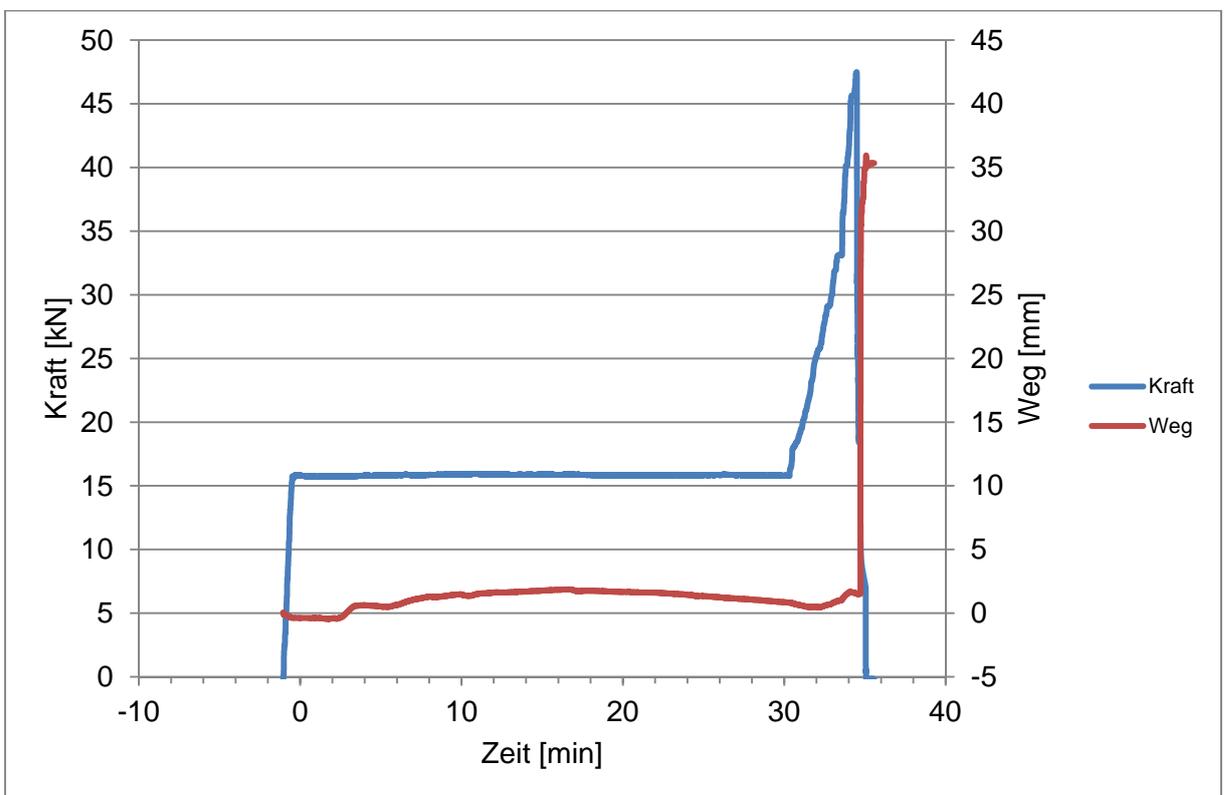


Abbildung 11-143: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit- Diagramm der Verbindung S4 (d=12mm, l= 350 mm, 45°)

11.8 Schutzmaßnahmen

11.8.1 Vollgewindeschrauben

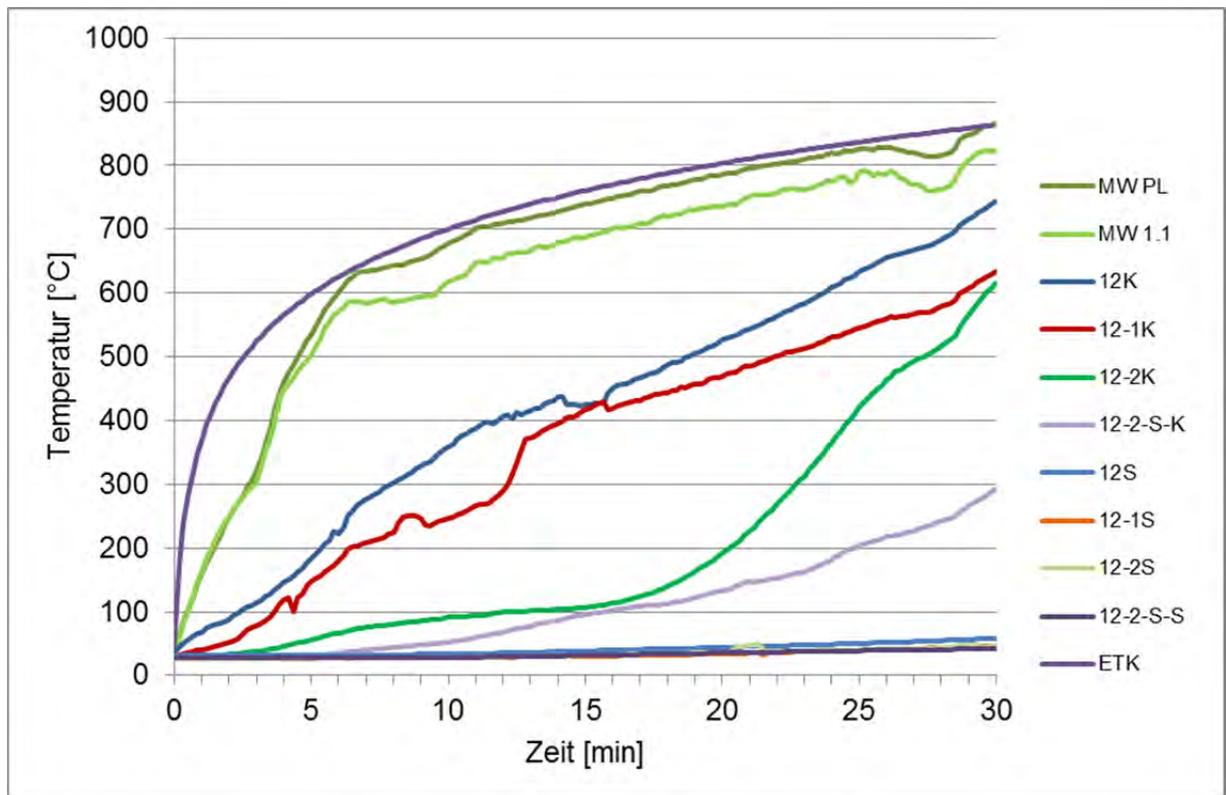


Abbildung 11-144: Vergleich der Schutzwirkung verschiedener Versenkiefen von Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 200 mm

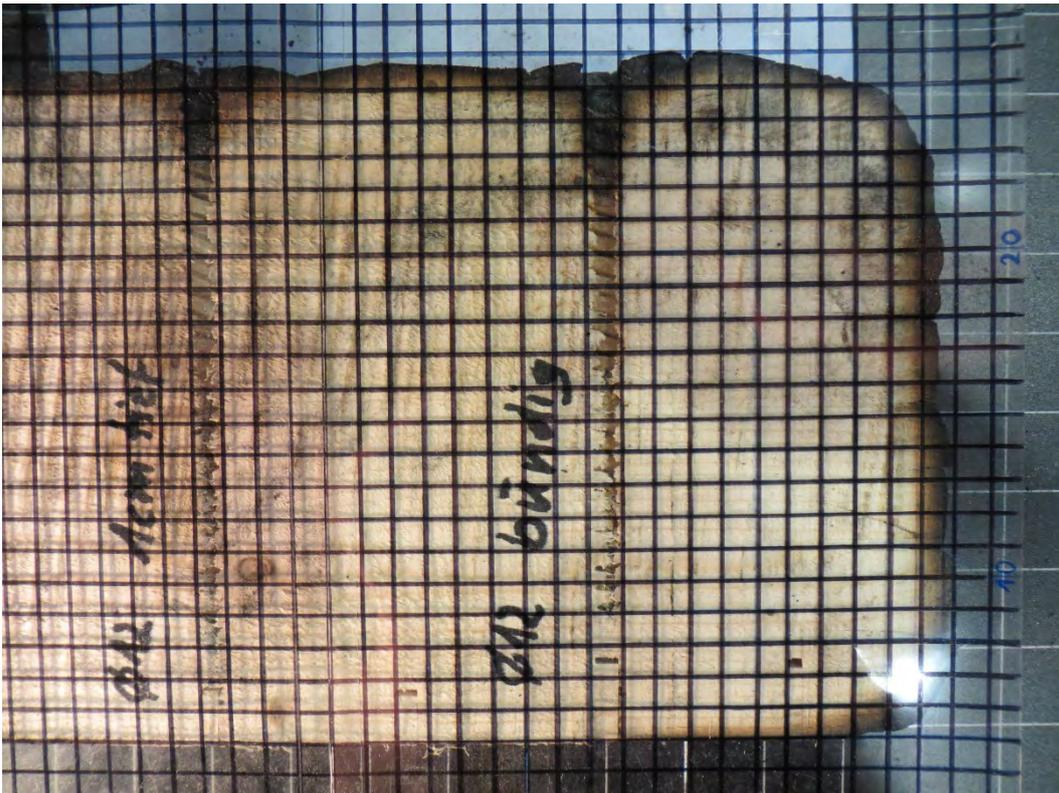


Abbildung 11-145: Verkohlungstiefe an bündig eingeschraubter und 10 mm tief versenkter Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 12 mm



Abbildung 11-146: Verkohlungstiefen an 20 mm tief versenktern Vollgewindeschrauben des Durchmessers von 12 mm mit und ohne zusätzlichen Schutz durch einen Holzstößel