



*Andrea Frangi  
Prof. Dr.  
ETH Zürich, Institut für Baustatik  
und Konstruktion  
Zürich, Schweiz*

## **Feuerwiderstand von Verbindungen und Verbindungsmitteln**

**Holz-Holz-Verbindungen und Stahl-Holz-  
Verbindungen: Grundlagen, Planungshilfen,  
Beispiele**



# Feuerwiderstand von Verbindungen und Verbindungsmitteln

## Holz-Holz-Verbindungen und Stahl-Holz-Verbindungen: Grundlagen, Planungshilfen, Beispiele

### Einleitung

In den letzten Jahren steigt der Wunsch der Gesellschaft den Baustoff Holz wieder vermehrt, insbesondere im Wohnungsbau, einzusetzen. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei aber die Sicherstellung einer ausreichenden Brandsicherheit. Die Gewissheit in seiner Wohnung vor den Gefahren des Feuers sicher zu sein, ist ein wichtiger Beitrag zum Wohlbefinden. Die Brandsicherheit von Holzkonstruktionen bildet seit mehreren Jahren einen Schwerpunkt der Forschung am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich [1]. Ziel der Forschungsprojekte ist die Entwicklung von experimentell abgesicherten Tragmodellen zum Brandverhalten von Holzkonstruktionen. Die Forschungsergebnisse bildeten eine wichtige Grundlage für die Überarbeitung und Einführung der neuen Brandschutzvorschriften durch die Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen VKF [2], die die Holzanwendung für das Tragwerk von Wohngebäuden mit bis zu 6 Geschossen erlauben, und dienen der Erweiterung bestehender Entwurfs- und Bemessungsgrundlagen für Architekten und Ingenieure [3].

Verbindungen müssen in der Regel den gleichen Feuerwiderstand aufweisen wie die Tragelemente, z.B. Balken oder Stützen. Neben der Brandsicherheit der Tragelemente spielt somit der Feuerwiderstand von Verbindungen eine entscheidende Rolle. Nägel, Schrauben, Stabdübel, Bolzen sowie eingeleimte profilierte Stäbe (Gewindestangen) aus Stahl sind für den Ingenieurholzbau typische mechanische Verbindungsmittel, welche gemäss den jeweiligen Anforderungen in vielfältigster Art und Weise eingesetzt werden. Stahl erwärmt sich rasch und verliert bei hohen Temperaturen an Steifigkeit und Festigkeit. Aus diesem Grund können hohe Temperaturen die Tragfähigkeit einer Verbindung in beträchtlichem Ausmass reduzieren. Der vorliegende Artikel stellt eine Übersicht zum Tragverhalten von Verbindungen und Verbindungsmitteln im Brandfall und zu deren Bemessungsmethoden für den Brandfall dar.

### Brandverhalten von Verbindungen

#### Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

Das Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen wurde mit umfassenden experimentellen Untersuchungen sowohl bei Normaltemperatur (d.h. Raumtemperatur) als auch im Brandfall an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der EMPA in Dübendorf analysiert [4,5]. Für verschiedene Verbindungsgeometrien wurde mit Zugversuchen sowohl der Tragwiderstand bei Normaltemperatur  $F_u$  als auch die Feuerwiderstandsdauer unter vierseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung ermittelt. Ziel war es, die relevanten Einflussgrössen und deren Auswirkungen auf die Feuerwiderstandsdauer zu analysieren. Folgende Parameter wurden variiert: Stabdübeldurchmesser sowie Anzahl und Anordnung der Stabdübel, Seitenholzdicke sowie Rand- und Endabstände der Stabdübel, Lastniveau im Brandfall.

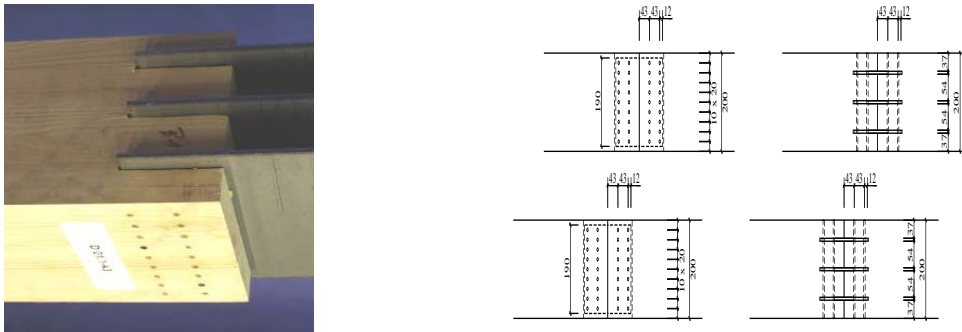


Abbildung 1: Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung (rechts: Versuchskörper D1.1, alle Masse in mm)

Tabelle 1: Versuchsprogramm und gemessene Feuerwiderstandsdauern für die mit mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen durchgeführten Brandversuche

Bezeichnung	Anzahl Versuche	Versuchsart	Beanspruchung [kN]	Feuerwiderstandsdauer [Min.]	Bemerkungen
D1.1	5	Kalt	Bis zum Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche (5mm), 2x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D1.1} = 145$	32 / 34	
	2	Brand	$0.15 \cdot F_{u,D1.1} = 72$	38 / 34.5	
	2	Brand	$0.075 \cdot F_{u,D1.1} = 36$	41.5 / 41	
D1.2	5	Kalt	Bis zum Bruch	---	280x280mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 2x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D1.2} = 173$	73 / 73	
D1.3	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D1.1} = 145$	72 / 57	Gleich wie D1.1; Verbindung mit Dreischichtplatten (27mm) verkleidet
D1.4	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D1.1} = 145$	60.5 / 61	Gleich wie D1.1; Verbindung mit Gipsfaserplatten (15 bzw. 18mm) verkleidet
D2.1	5	Kalt	Bis zum Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 3x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D2.1} = 188$	30.5 / 32	
D3.1	5	Kalt	Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 3x3 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D3.1} = 69$	32 / 33	
D4.1	5	Kalt	Bis zum Bruch	---	200x200mm (GL24h), 2 Stahlbleche, 2x4 Stabdübel (d=12mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D4.1} = 124$	34.5 / 35	

Die Versuchskörper bestanden aus vier- oder sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen (vgl. Abbildung 1). Die Stahlblechdicke betrug 5mm. Es wurden ungeschützte Verbindungen sowie mit Holz- bzw. Gipsplatten geschützte Verbindungen experimentell untersucht. Die Versuchskörper für die Brandversuche wurden in der Regel mit 30% des mittleren Tragwiderstandes bei Normaltemperatur beansprucht. Der Einfluss des Beanspruchungsniveaus wurde für die Verbindung D1.1 mit je zwei weiteren Brandversuchen mit 15 bzw. 7.5% des mittleren Tragwiderstandes bei Normaltemperatur untersucht. Insgesamt wurden 26 Zugversuche bei Normaltemperatur und 18 Brandversuche durchgeführt. Pro Verbindungsart und Parameter wurden zwei identische Brandversuche durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Versuchseinrichtung für die Brandversuche auf dem kleinen Ofen an der EMPA.

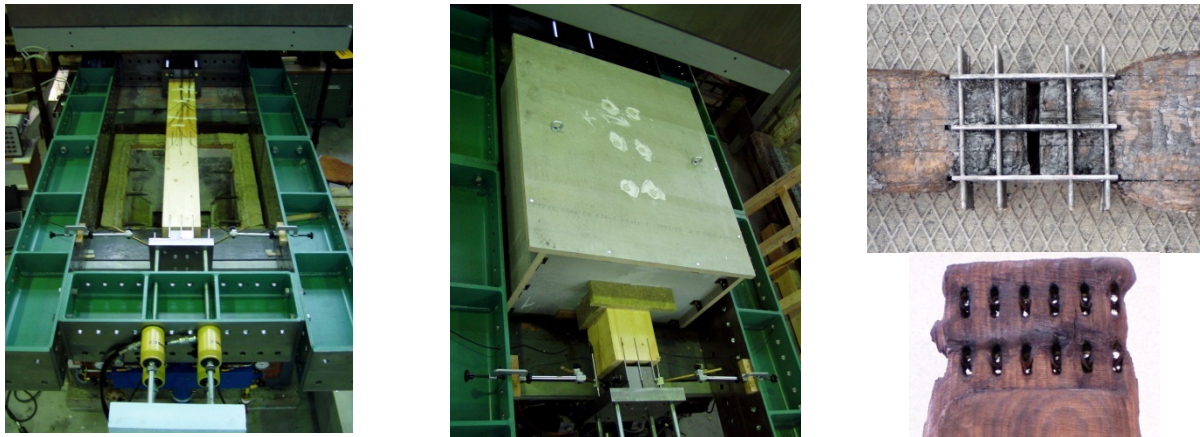


Abbildung 2: Versuchseinrichtung für die Brandversuche (links und Mitte); Versuchskörper nach dem Brandversuch mit Ovalisierung der Stabdübellöcher (rechts)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht zum Versuchsprogramm sowie die gemessenen Feuerwiderstandsdauern. Bemerkenswert sind die sehr geringen Unterschiede bei den gemessenen Feuerwiderstandsdauern für die Brandversuche mit gleichen Parametern. Die höchste Feuerwiderstandsdauer mit 73 Min. erreichte die Verbindung D1.2 mit um 40mm vergrößerten Querschnittsabmessungen. Eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 60 Min. zeigten auch die mit Dreischicht- oder Gipsfaserplatten bekleideten Verbindungen D1.3 und D1.4. Alle anderen geprüften Verbindungen erreichten eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 30 Min. Die Reduktion des Lastniveaus (von 30% auf 15 bzw. 7.5% des Tragwiderstandes bei Normaltemperatur) führte zu keiner signifikanten Erhöhung des Feuerwiderstandes.

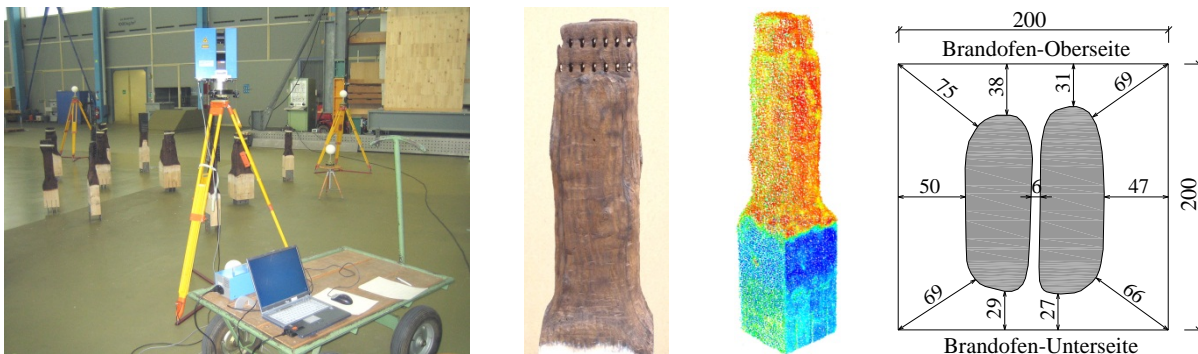


Abbildung 3: Laserscanner (links); Abgebrannter Versuchskörper und 3D-Modell mit Hilfe des Laserscanners (Mitte); Aus dem Laserscanner ermittelter Restquerschnitt im Verbindungsbereich (rechts)

In der Regel zeigte sich im Brandfall ein Versagen der Verbindungen auf Lochleibung ohne Deformation der Stabdübel, was in der Literatur allgemein als Versagensmodus I bezeichnet wird [6] (vgl. Abbildung 2 rechts). Durch den Abbrand der Seitenhölzer geht die Einspannwirkung der Stabdübel verloren. Die hohen Temperaturen am direkten Übergangsbereich zwischen Stabdübel und Holz führen zu einer Ovalisierung der Stabdübellöcher (vgl. Abbildung 2 rechts). Mit Hilfe eines Laserscanners (vgl. Abbildung 3 links) wurden nach dem Entfernen der Verbindungsmittel und der Holzkohleschicht die abgebrannten Versuchskörper vermessen, womit die Restquerschnitte als dreidimensionale Objekte erfasst und dargestellt werden konnten (vgl. Abbildung 3 Mitte). Durch die Weiterverarbeitung der elektronischen Daten kann der Abbrand und folglich die Abbrandrate in jedem beliebigen Schnitt ermittelt werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 3 rechts den Schnitt im Verbindungsbereich der getesteten Verbindung D1.1. Der Laserscanner erwies sich als eine praktische und genaue Methode und bietet zudem den Vorteil der Verfügbarkeit der Daten auch nach einer möglichen Entsorgung der Versuchskörper.

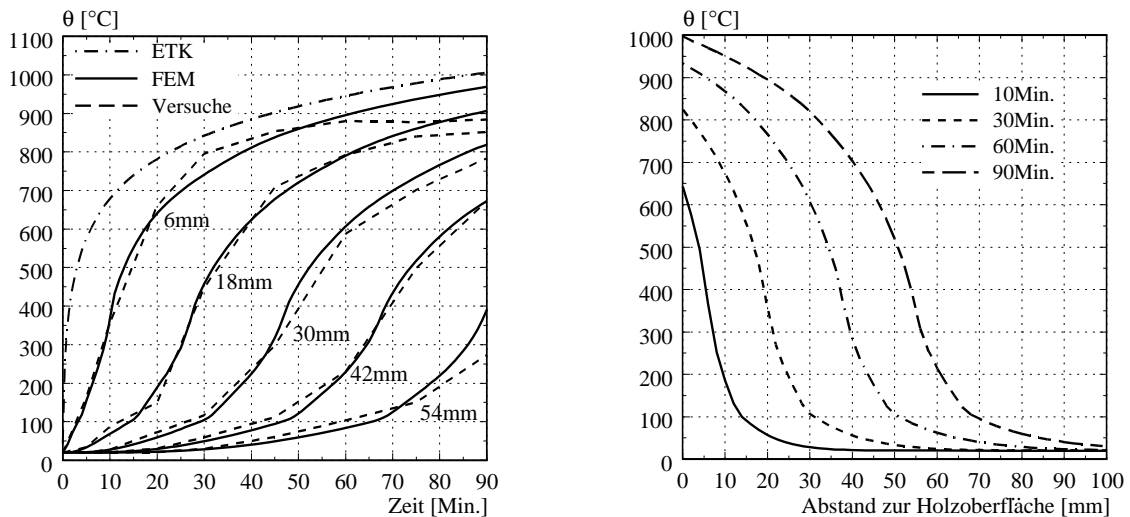


Abbildung 4: Vergleich zwischen experimentell [11] und numerisch ermittelten Temperaturverläufen in unterschiedlichen Holztielen (links); Temperaturgradient im Holz zu verschiedenen Zeitpunkten am Beispiel eines Holzbauteiles bei einseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung (rechts)

In Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt, um die Temperaturverteilung im Verbindungsquerschnitt abzubilden und in einer Parameterstudie die massgebenden Einflussfaktoren auf den Tragwiderstand im Brandfall zu analysieren [7]. Die thermischen FE-Untersuchungen erfolgten mit dem Programm ANSYS [8]. Der FE-thermischen Analyse wurden der Wärmeübergangskoeffizient für die Wärmekonvektion und der resultierende Emissionswert für die Wärmestrahlung gemäss EN 1991-1-2 [9] zugrunde gelegt. Die temperaturabhängigen Eigenschaften (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) für Holz und Holzkohle wurden gemäss EN 1995-1-2 [10] angenommen. Bei Brandversuchen an Holzbauteilen unter einseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung wurde die Temperatur in unterschiedlichen Holztielen (6, 18, 30, 42, 54 mm) gemessen [11]. Diese Versuche dienten als Grundlage zur Validierung der thermischen Materialeigenschaften von Holz und Holzkohle für die durchgeführten numerischen Simulationen. Der Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermittelten Temperaturverläufen zeigt Abbildung 4 links. Die gute Übereinstimmung, insbesondere im festigkeitsrelevanten Temperaturbereich bis etwa  $300^{\circ}\text{C}$  (Abbrandgrenze von Holz gemäss EN 1995-1-2), bestätigt die Annahmen der verwendeten thermischen Materialeigenschaften von Holz und Holzkohle. Der Verlauf des Temperaturgradienten im Holz bei einseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung zeigt Abbildung 4 rechts. Die geringe Wärmeleitfähigkeit bzw. die gute isolierende Wirkung der Holzkohle ist deutlich zu erkennen. Selbst nach einer ISO-Normbrandeinwirkungsdauer von 60 Minuten wird in einem Abstand von etwa 80mm von der Holzoberfläche eine Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  nicht überschritten, obwohl die Oberflächentemperatur über  $930^{\circ}\text{C}$  beträgt.

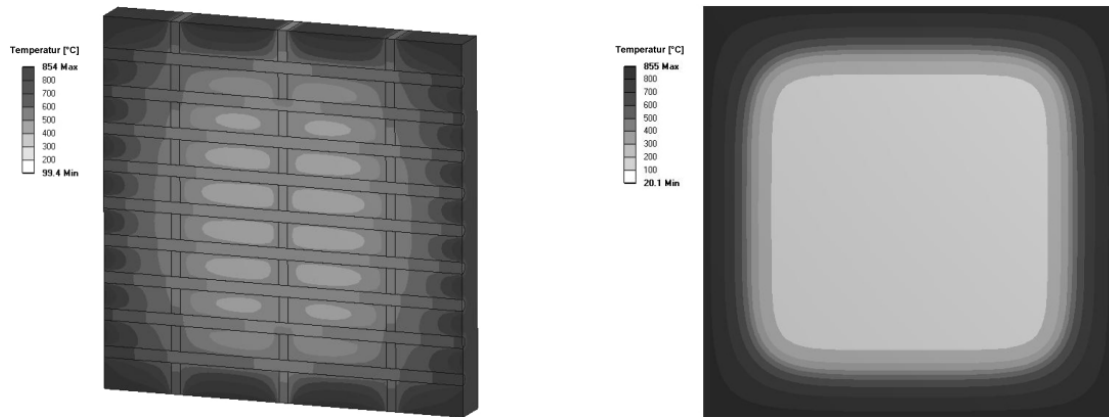


Abbildung 5: Temperaturverteilung nach 33 Minuten ISO-Normbrandeinwirkung im Verbindungsquerschnitt der getesteten Verbindung D1.1 (links) bzw. in einem gleich grossen Holzquerschnitt ohne Stahlelemente (rechts)

Abbildung 5 links zeigt am Beispiel der geprüften Verbindung D1.1 (QS 200x200mm, 9 horizontal angeordnete Stabdübel, 3 vertikal liegende Stahlbleche) die Temperaturverteilung im Querschnitt nach 33 Min. ISO-Normbrandeinwirkung. Es zeigte sich, dass die Stahlelemente einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Querschnitt haben. Während die direkt brandbeanspruchten Oberflächen der Stahlelemente eine niedrigere Temperatur als die sie umgebenden Holzoberflächen aufweisen, leiten sie umso mehr Wärme in das Innere des Verbindungsquerschnittes ein. Nach 33 Min. liegt die minimale Temperatur im Querschnitt bei knapp 100°C, ein vergleichbarer Holzquerschnitt mit gleichen Abmessungen jedoch ohne Stahlelemente weist zu diesem Zeitpunkt im Wesentlichen eine Temperatur von 20°C auf (vgl. Abbildung 5 rechts).

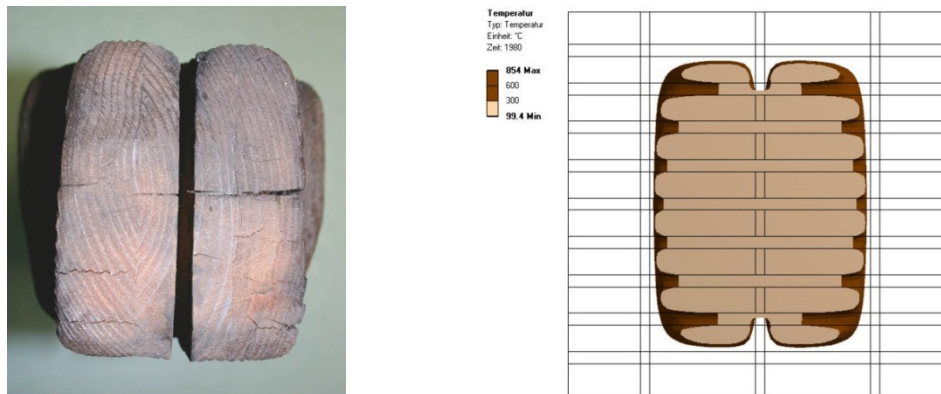


Abbildung 6: Vergleich zwischen experimentell (links) und numerisch (rechts) ermitteltem Restquerschnitt im Verbindungsbereich der getesteten Verbindung D1.1 zum Versagenszeitpunkt nach 33 Minuten

Mit der Ermittlung der Temperaturverteilung im Querschnitt kann der Restquerschnitt mit der Festlegung der Abbrandgrenze zwischen Holz und Holzkohle bei einer Temperatur von 300°C einfach bestimmt werden. Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermitteltem Restquerschnitt für die geprüfte Verbindung D1.1 beim Versagen nach 33 Minuten ISO-Normbrandeinwirkung. Numerisch sind diejenigen Elemente abgebildet, welche eine Temperatur von weniger als 300°C aufweisen. Effekte aus Temperaturüberlagerungen an den Ecken lassen sich dabei numerisch ebenso gut abbilden wie der erhöhte Einbrand am direkten Übergangsbereich zwischen Stahlelementen und Holz. Im mittleren Schlitz wurde kein Abbrand beobachtet, was sich numerisch bestätigen lässt.

Mit Hilfe der numerischen Untersuchungen war es möglich, eine Parameterstudie durchzuführen und daraus ein Berechnungsmodell für die Ermittlung des Tragwiderstandes der Verbindung im Brandfall zu entwickeln [7,12]. Dem Berechnungsmodell wurde der in den Brandversuchen beobachtete Versagensmodus I (Lochleibungsversagen im Holz) zugrunde gelegt.



Das Berechnungsmodell verwendet den nicht-linearen und temperaturabhängigen Verlauf der Lochleibungsfestigkeit gemäss Abbildung 7 links und betrachtet räumliche Temperaturfelder zwischen zwei in Beanspruchungsrichtung hintereinander liegend angeordneten Stabdübelreihen. Ausgehend von der Lochleibungsfestigkeit bei Normaltemperatur wird jedem Element eines Temperaturfeldes in Abhängigkeit der Brandeinwirkungsdauer eine Lochleibungsfestigkeit entsprechend der wirkenden Temperatur zugeordnet. Damit übertragen randnahe Stabdübel im Brandfall aufgrund von seitlichen Temperaturüberlagerungen nur eine geringe oder bei vollständiger Einbettung in Holzkohle gar keine Kraft. Je näher der Stabdübel an der horizontalen Symmetrieachse liegt, desto grösser ist sein Kraftanteil.

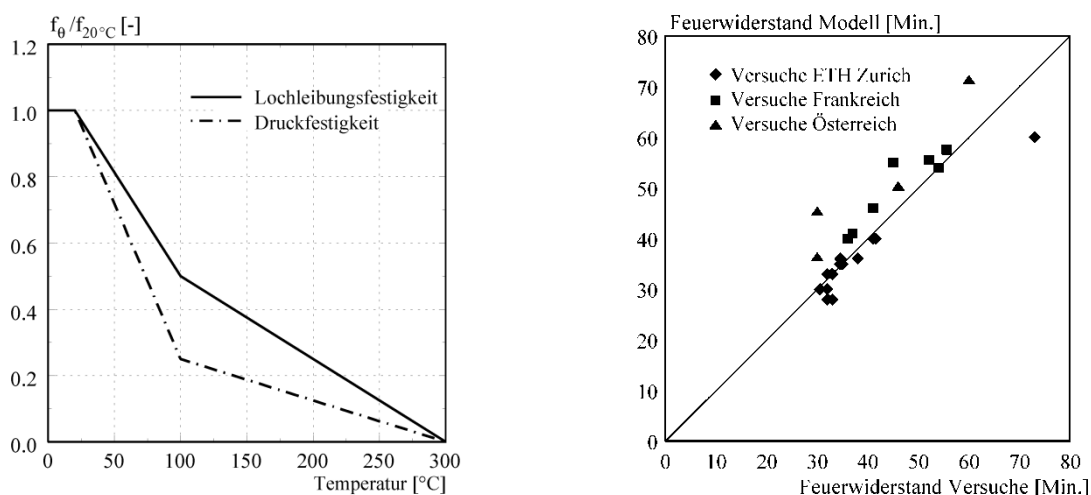


Abbildung 7: Dem Berechnungsmodell zugrunde gelegte temperaturbedingte Abnahme der Lochleibungsfestigkeit im Vergleich zur temperaturbedingten Abnahme der Druckfestigkeit gemäss EN 1995-1-2 (links) und Vergleich der Feuerwiderstandsdauern zwischen Modellberechnungen und Brandversuchen (rechts)

Zum Verhalten von vier- und sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall existieren zurzeit keine weiteren Brandversuche. Experimentelle Untersuchungen an zweischnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen wurden aber beispielsweise in Österreich [13] und Frankreich [14] durchgeführt. Abbildung 7 rechts zeigt den Vergleich der Feuerwiderstandsdauern zwischen Modellberechnungen und Brandversuchen. Daraus erkennt man die gute Übereinstimmung zwischen Modellberechnungen und Brandversuchen.

Die durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen, dass mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen ein günstiges Brandverhalten aufweisen, da die durch den Abbrand des Seitenholzes entstehende Holzkohleschicht die innen liegenden Stahlbleche vor einer direkten Brandeinwirkung schützt. Alle für die Normaltemperatur bemessenen geprüften Verbindungen erreichten einen Feuerwiderstand von 30 Minuten. Mit der Erhöhung der Seitenholzdicke sowie der Rand- und Endabstände der Stabdübel um 40mm oder mit der Abdeckung der Verbindung mit Holz- bzw. Gipsplatten konnte eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 60 Minuten erreicht werden.

### Rillennagelverbindungen mit aussen liegenden Blechen

Das Verhalten von Rillennagelverbindungen mit aussen liegenden Blechen wurde mit einer Serie von experimentellen Untersuchungen sowohl bei Normaltemperatur als auch im Brandfall an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der EMPA in Dübendorf analysiert [4,5]. Die Versuchsdurchführung erfolgte in gleicher Art und Weise wie bei den mehrschnittigen Stabdübelverbindungen (vgl. Abbildung 2). Es wurden ungeschützte Verbindungen als auch Verbindungen mit einem auf die Stahlbleche aufgetragenen, dämmschichtbildenden Brandschutzanstrich untersucht.



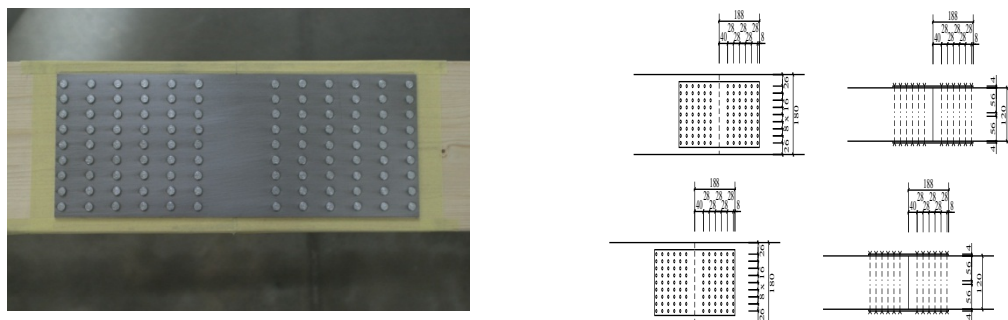


Abbildung 8: Rillennagelverbindung mit aussen liegenden Blechen (rechts: Versuchskörper N1.1, Masse in mm)

Herkömmliche Rillennägel mit einem Durchmesser von  $d = 4\text{mm}$  und einer Länge von  $60\text{mm}$  (Einschlagtiefe von  $54\text{mm}$ ) wurden für die Nagelverbindungen verwendet (vgl. Abbildung 8). Die Dicke der aussen liegenden Stahlbleche betrug  $4\text{mm}$ . Die Versuchskörper für die Brandversuche wurden mit  $30\%$  bzw.  $15\%$  des mittleren Tragwiderstandes bei Normaltemperatur beansprucht. Insgesamt wurden  $13$  Zugversuche durchgeführt, davon  $5$  bei Normaltemperatur und  $8$  unter Brandlast. Pro Verbindungsart und Parameter wurden zwei identische Brandversuche durchgeführt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zum Versuchsprogramm sowie die gemessenen Feuerwiderstandsdauern. Bemerkenswert sind für diese Brandversuche die fast gleichen gemessenen Feuerwiderstandsdauern für die zwei Brandversuche mit gleichen Parametern.

Tabelle 2: Versuchsprogramm und gemessene Feuerwiderstandsdauern für die durchgeführten Brandversuche mit Rillennagelverbindungen und aussen liegenden Blechen

Bezeichnung	Anzahl Versuche	Versuchsart	Beanspruchung [kN]	Feuerwiderstandsdauer [Min.]	Bemerkungen
N1.1	5	Kalt	Bis zum Bruch	---	120x180mm (GL24h), 9x6 Rillennägel mit Durchmesser $d = 4\text{mm}$ , Dicke Stahlbleche $t = 4\text{mm}$
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,N1.1} = 90$	11.5 / 12	
	2	Brand	$0.15 \cdot F_{u,N1.1} = 45$	14 / 12.5	
N1.2	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,N1.1} = 90$	31 / 28.5	Gleich wie N1.1, jedoch mit $2\text{mm}$ dickem dämmschichtbildendem Brandschutzanstrich
	2	Brand	$0.15 \cdot F_{u,N1.1} = 45$	35.5 / 38	

Aufgrund der aussen liegenden Stahlbleche, welche von Versuchsbeginn an direkt der Brandbeanspruchung ausgesetzt waren, unterschied sich das Brandverhalten deutlich von demjenigen der Stabdübelverbindungen mit innen liegenden Blechen. Bei den ungeschützten Verbindungen konnte lediglich ein Feuerwiderstand von etwa  $12$  Minuten erreicht werden. Mit einem Brandschutzanstrich liess sich der Feuerwiderstand auf  $30$  Minuten erhöhen. Die Reduktion des Lastniveaus (von  $30\%$  auf  $15\%$  des Tragwiderstandes bei Normaltemperatur) führte zu keiner signifikanten Erhöhung des Feuerwiderstandes. Abbildung 9 zeigt die Versuchskörper nach dem Brandversuch. Daraus ist die starke Verformung der Rillennägel erkennbar. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass Verbindungen mit aussen liegenden Blechen ein ungünstiges Brandverhalten aufweisen, da sich die Stahlbleche rasch erwärmen und stark verformen.



Abbildung 9: Rillennagelverbindungen mit aussen liegenden Blechen nach den Brandversuchen (links: Versuchskörper N1.1; rechts Versuchskörper N1.2).

## Brandverhalten von in Schaftrichtung beanspruchten Schrauben

Das Brandverhalten von in Schaftrichtung beanspruchten Schrauben wurde mit umfassenden experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes zum Feuerwiderstand von Holz-Beton-Verbunddecken in Zusammenarbeit mit der EMPA in Dübendorf analysiert [15]. Abbildung 10 zeigt schematisch die Versuchseinrichtung der Auszugversuche mit Schrauben, die direkt ohne Vorbohrung durch eine 20mm dicke Schalung 80mm tief ins Holz geschraubt wurden. Pro Versuch wurden zwei Balken in den Ofen gelegt und pro Balken zwei Verbindungsmittel getestet. Als Einflussparameter wurden die seitliche Holzüberdeckung (40 bzw. 60mm), die Holzart (Vollholz und BSH) und der Spalt (0, 3mm) zwischen Schalung und Holzbalken variiert.

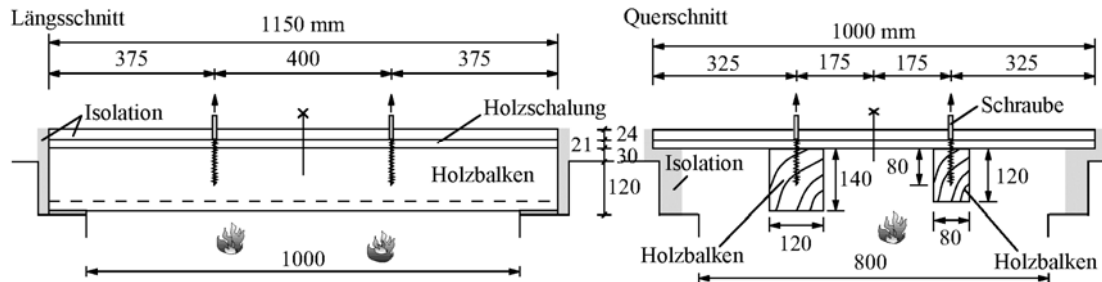


Abbildung 10: Versuchseinrichtung für die Brandversuche mit in Schaftrichtung beanspruchten Schrauben

Die Belastung der Verbindungsmittel im Brandfall wurde auf ca. ein Drittel des Tragwiderstandes bei Normaltemperatur, d.h. 3,6 kN festgelegt. Bei den Brandversuchen wurden zwei Versuchsabläufe gewählt. Beim Versuchsablauf „Test II“ wurden die Verbindungsmittel während der ganzen Versuchsdauer mit der festgelegten Last konstant gezogen, während die Probekörper durch ISO-Normbrand beansprucht wurden. Beim Versuchsablauf „Test I“ wurde nach 30 Min. ISO-Normbrand das Lastniveau der Verbindungsmittel bis zum Bruch gesteigert.

Abbildung 11 zeigt typische Zeit-Verformungsdiagramme der Brandversuche vom Testtyp II für Schrauben mit 40 und 60mm seitlicher Holzüberdeckung sowie den gemessenen Tragwiderstand in Abhängigkeit der Holztemperatur im Bereich der Schraube. Die in der Abbildung angegebene Temperatur entspricht dem Mittelwert der bei unterschiedlichen Tiefen der Schraubenachse gemessenen Holztemperaturen. Aus den Versuchsergebnissen konnten folgende Feststellungen abgeleitet werden:

- der Tragwiderstand der Verbindung ist abhängig von der Holztemperatur im Bereich der Schraube. Mit zunehmender Holztemperatur nimmt die Festigkeit ab und die Bruchverformung zu. Bei einer Temperatur von ca. 105°C betrug die Festigkeit nur noch etwa 45% der Festigkeit bei Normaltemperatur.
- die erreichte Temperatur im Verbindungsbereich nach einer bestimmten Brandzeit hängt von der seitlichen Holzüberdeckung ab. Die untere Holzüberdeckung spielt keine wesentliche Rolle. Mit 40mm seitlicher Holzüberdeckung versagten die durch die konstante Belastung beanspruchten Schrauben nach ca. 54 Min., mit 60mm seitlicher Holzüberdeckung nach ca. 78 Min. ISO-Normbrandeinwirkung.
- ein Spalt zwischen Schalung und Balken hatte keinen ausgeprägten Einfluss auf den Tragwiderstand der Schrauben, weil nur der obere Schraubenteil einer höheren Temperatur ausgesetzt wird.
- durch die konstante Belastung während der Brandversuche kam es zu Kriecherscheinungen, d.h. die Verformungen nahmen während der Brandzeit zu. Dies geschah umso mehr, je höher die Temperaturen stiegen bzw. je länger sie konstant auf einer bestimmten Temperatur blieben.

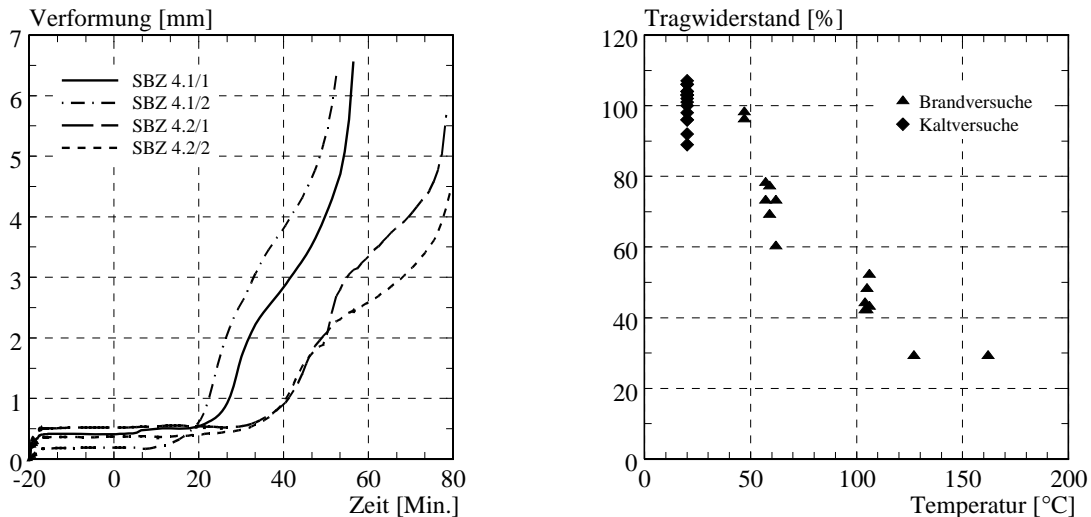


Abbildung 11: Zeit-Verformungsdiagramme der Brandversuche vom Testtyp II für Schrauben mit 40mm (Versuch SBZ4.1) und 60mm (Versuch SBZ4.2) seitlicher Holzüberdeckung (links; der Brandbeginn wird mit Zeit Null bezeichnet) und gemessener Tragwiderstand in Abhängigkeit der Holztemperatur im Bereich der Schraube (rechts)

Das Versagen der in Schaftrichtung beanspruchten Verbindung erfolgte im Brandfall immer durch Ausziehen der Schrauben. Massgebend für das Tragverhalten der Verbindung ist somit die Ausziehfestigkeit des Holzes. Das Brandverhalten der in Schaftrichtung beanspruchten Schrauben ist somit primär von der Holztemperatur im Bereich der Verbindung abhängig. Mit zunehmender Holztemperatur nahm die Steifigkeit und Festigkeit des Holzes auf Ausziehen ab. In Abhängigkeit der Geometrie (Querschnittsabmessungen, Lage der Schrauben im Holzquerschnitt, seitliche Holzüberdeckung) und wegen unvermeidbarer Spalten zwischen der Holzschalung und dem Holzbalken war die Temperaturverteilung entlang der Schraubenachse nicht gleichmässig. Wegen der Nichtlinearität des Materialverhaltens bei hohen Temperaturen konnten keine temperaturabhängigen Stoffgesetze aus der mittleren Temperatur im Verbindungsbereich abgeleitet werden. Für das Trag- und Verformungsverhalten der Verbindung im Brandfall wurde somit ein Berechnungsmodell entwickelt, welches den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen entlang der Schraubenachse berücksichtigt [16,17]. Durch Kalibrierung der Modellberechnungen mit den Versuchsergebnissen wurde die temperaturbedingte Abnahme der Steifigkeit und Festigkeit der Verbindung bei hohen Temperaturen abgeleitet (vgl. Abbildung 12 links). Da die erreichte Temperatur im Verbindungsbereich nach einer bestimmten Brandzeit im Wesentlichen von der seitlichen Holzüberdeckung beeinflusst wird, wurden vereinfachte Bemessungsansätze für die temperaturabhängige Steifigkeit und Festigkeit der Verbindung in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung entwickelt (vgl. Abbildung 12 rechts). Somit kann auf die aufwendige Temperaturberechnung in brandbeanspruchten Holzquerschnitten verzichtet werden.

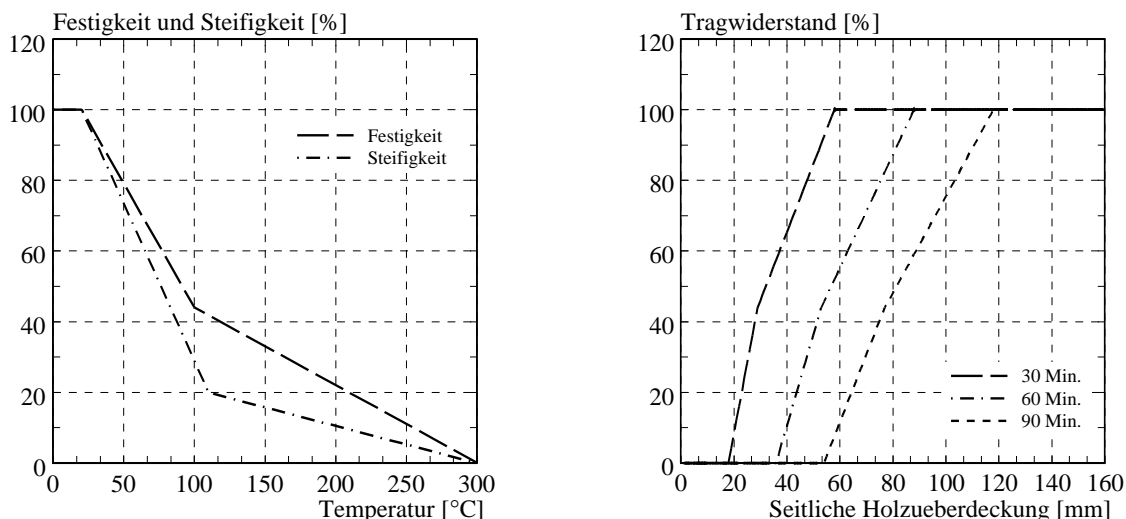


Abbildung 12: Angenommene temperaturabhängige Steifigkeit und Festigkeit der Verbindung (links) und temperaturabhängiger Tragwiderstand der Verbindung in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung (rechts)

## Bemessung von Verbindungen im Brandfall

### Allgemeines

Die in der Schweiz für den Holzbau geltende Norm SIA 265 [18] liefert für die Bemessung von Verbindungen im Brandfall keine Tragmodelle. Sie verweist auf die SIA-Lignum Dokumentation 83 [19], in welcher Methoden zur Bemessung von Verbindungen im Brandfall bis zu einem Feuerwiderstand von 30 Minuten in Form von konstruktiven Regelungen bzw. in tabellarischer Form aufgeführt sind. Die SIA-Lignum Dokumentation 83 wird durch eine in Vorbereitung neue Lignum-Dokumentation Brandschutz „Feuerwiderstandsbemessung - Bauteile und Verbindungen“ [20] ersetzt, welche auf der Grundlage von neuen aktuellen Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung [7, 10, 21] Methoden zur Bemessung von Verbindungen im Brandfall bis zu einem Feuerwiderstand von 60 Minuten enthält.

Bei der Bemessung von Verbindungen im Brandfall wird vorausgesetzt, dass die Verbindungen die Anforderungen und die Tragsicherheit bei Normaltemperatur erfüllen. Die allgemeinen Grundlagen für den Tragsicherheitsnachweis von tragenden Holzbauteilen und Verbindungen im Brandfall sind in der Norm SIA 265 festgehalten. Neben dem Tragsicherheitsnachweis der Verbindung ist der Nachweis des Feuerwiderstands der anzuschliessenden Bauteile zu führen. Die grössere Mindest-Querschnittsabmessung aus dem Nachweis des Bauteils und der Verbindung ist massgebend. Für Verbindungen, die nach Norm SIA 265 bzw. SIA 265/1 [22] für Normaltemperatur bemessen sind, darf ohne weitere Nachweise und Massnahmen eine Feuerwiderstandsdauer von 15 Minuten vorausgesetzt werden.

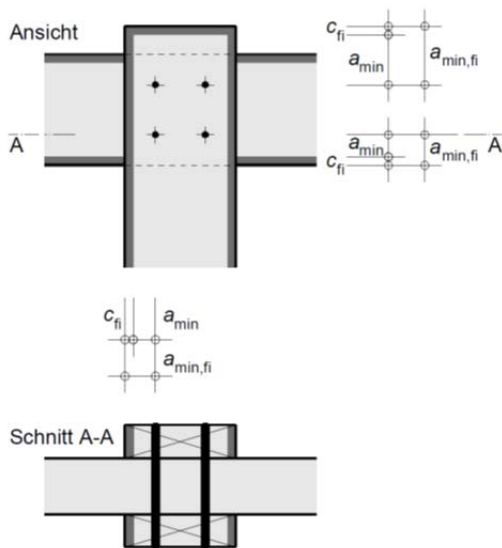
Höhere Feuerwiderstandsdauern von Verbindungen können auf verschiedene Arten nachgewiesen werden:

- Verwendung von geprüften und VKF-anerkannten Verbindungen
- Rechnerischer Nachweis der Tragsicherheit der Verbindung im Brandfall mit anerkannten Bemessungsverfahren (ungeschützte Verbindung)
- Vergrösserung der Abmessungen der Bauteile sowie der Rand- und Endabstände der Verbindungsmittel
- Beplankung/Bekleidung der Verbindung mit Holz, Holzwerkstoffen oder mineralisch gebundenen Werkstoffen (Ausführung als vollständig geschützte Verbindung)
- Kombination von einem rechnerischen Nachweis der Tragsicherheit der Verbindung im Brandfall und einer Beplankung oder Bekleidung (Ausführung als teilweise geschützte Verbindung)

Die Angaben in [20] gelten ausschliesslich für den Verbindungs-, Anschluss- oder Stossbereich von symmetrischen Verbindungen nach Norm SIA 265 und SIA 265/1 mit auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln. Verbindungen mit aussen liegenden Stahlblechen verhalten sich aufgrund der starken Erwärmung der Stahlteile im Brandfall ungünstig und sind aus diesem Grund vorzugsweise als vollständig geschützte Verbindungen auszuführen.

### Konstruktive Anforderungen

Das Verhalten von Verbindungen und Verbindungsmitteln unter Brandeinwirkung ist aufgrund des Einflusses einer Vielzahl von Parametern (Art des Verbindungsmittels, Geometrie der Verbindung, Versagensarten, Einfluss von Stahlelementen) sehr komplex und hängt daher in grossem Masse von der konstruktiven Durchbildung des Verbindungsbereiches ab. Eine geeignete und durchdachte konstruktive Ausarbeitung führt zu einem günstigeren Brandverhalten. Die nach Norm SIA 265 und 265/1 einzuhaltenden Mindest-Randabstände von Verbindungsmitteln sind für die Feuerwiderstandsbemessung um den Wert des Vorhaltemasses  $c_{fi}$  gemäss Abbildung 13 zu vergrössern.



$$a_{\min,fi} = a_{\min} + c_{fi}$$

$a_{\min,fi}$  Mindest-Randabstand von Verbindungsmitteln für die Feuerwiderstandsbemessung

$a_{\min}$  Mindest-Randabstand von Verbindungsmitteln für Normaltemperatur gemäss Norm SIA 265 und 265/1

$c_{fi}$  Vorhaltemass für die Feuerwiderstandsbemessung:

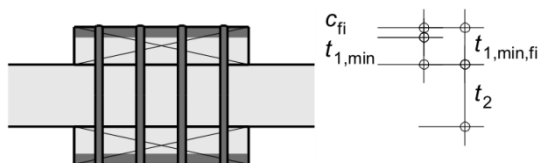
$c_{fi} = 10\text{mm}$  für R30

$c_{fi} = 30\text{mm}$  für R60

(für andere Feuerwiderstandsdauern darf linear interpoliert werden)

Abbildung 13: Mindest-Randabstände für die Feuerwiderstandsbemessung

Generell muss eine minimale Seitenholzdicke von 50mm für R30 bzw. 100mm für R60 eingehalten werden. Sofern nach Norm SIA 265 und 265/1 für die Bemessung bei Normaltemperatur eine Mindest-Seitenholzdicke verlangt ist, muss diese um den Wert  $c_{fi}$  gemäss Abbildung 14 vergrössert werden.



$$t_{1,\min,fi} = t_{1,\min} + c_{fi} \geq 50\text{mm} \text{ für R30}$$

$$t_{1,\min,fi} = t_{1,\min} + c_{fi} \geq 100\text{mm} \text{ für R60}$$

$t_{1,\min,fi}$  Mindest-Seitenholzdicke für die Feuerwiderstandsbemessung

$t_{1,\min}$  Mindest-Seitenholzdicke für Normaltemperatur gemäss Norm SIA 265 und 265/1

$c_{fi}$  Vorhaltemass für die Feuerwiderstandsbemessung:

$c_{fi} = 10\text{mm}$  für R30

$c_{fi} = 30\text{mm}$  für R60

(für andere Feuerwiderstandsdauern darf linear interpoliert werden)

Abbildung 14: Mindest-Holzdicken für die Feuerwiderstandsbemessung

Bei Verbindungen mit eingeschlitzten innen liegenden Stahlblechen (Dicke  $t \geq 2\text{mm}$ ) wird unterschieden zwischen Stahlblechen mit ungeschützten Blechrändern und Stahlblechen mit geschützten Blechrändern. In Abhängigkeit der Blechränder, die der Brandeinwirkung ausgesetzt sind, und der Blechbreite dürfen die Blechränder ungeschützt bleiben. Konstruktive Anforderungen können in [20] gefunden werden.

### Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

Für die Bemessung von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt [7,12]. Das Bemessungsverfahren orientiert sich an die Methode mit reduziertem Querschnitt (ideeller Restquerschnitt) gemäss Norm SIA 265 und EN 1995-1-2 an, welche für die Bemessung von ungeschützten Holzbauteilen verwendet wird. Die effektive Abbrandtiefe  $d_{ef}$  kann mit den Gleichungen (1) und (2) berechnet werden (vgl. Abbildung 15). Zur Vereinfachung wird seitlich (Index s) und oberseitig (Index o) derselbe Wert  $d_{red}$  angenommen.

$$d_{ef,s} = d_{char,s} + d_{red} \tag{1}$$

$$d_{ef,o} = d_{char,o} + d_{red} \tag{2}$$

Der Bemessungswert des Tragwiderstandes  $R_{d,fi}$  der Verbindung im Brandfall für eine Zugbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ergibt sich zu:

$$R_{d,fi} = A_{ef} \cdot f_{t,0,k} \cdot k_{fi} \tag{3}$$

Dabei ist

$A_{ef}$  Ideeller Restquerschnitt:  $A_{ef} = b_{ef} \cdot h_{ef}$

$k_{fi}$  Modifikationsfaktor zur Anpassung der charakteristischen Werte an die 20%-Fraktilwerte. Vereinfacht darf  $k_{fi} = 1.15$  angenommen werden.

$f_{t,0,k}$  Charakteristischer Wert (5% Fraktilwert) der Zugfestigkeit des Holzes parallel zur Faserrichtung bei Normaltemperatur

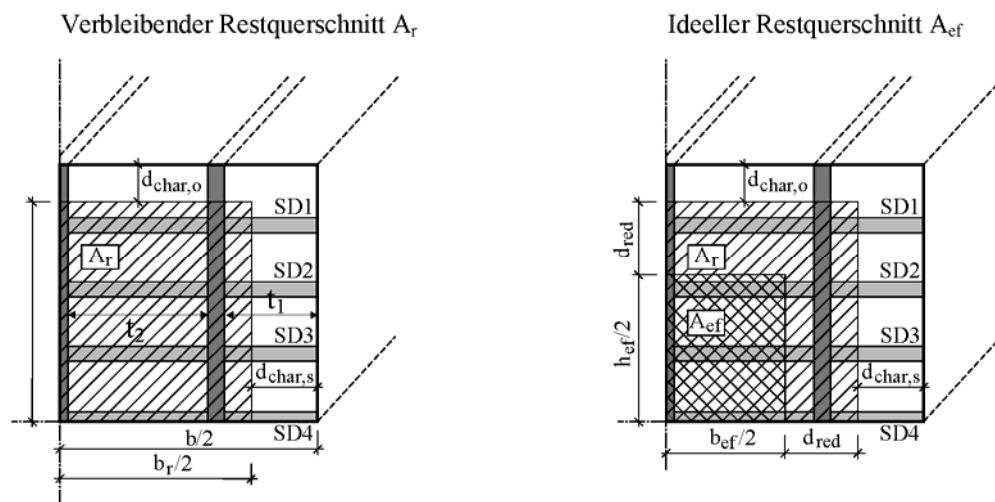


Abbildung 15: Verbleibender und ideeller Restquerschnitt zur Ermittlung des Tragwiderstandes von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall, dargestellt am Viertelsquerschnitt einer sechs-schnittigen Verbindung

Dem Bemessungsmodell liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Ungeschützte zwei-, vier- und sechs-schnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen unter zentrischer Zugbeanspruchung parallel zur Faserrichtung und unter vierseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung (das Bemessungsmodell kann auf der sicheren Seite liegend

z.B. auch für eine Druckbeanspruchung bzw. eine dreiseitige ISO-Normbrandbeanspruchung näherungsweise angewendet werden)

- Max. Dicke der eingeschlitzten Stahlbleche von 6mm und maximaler Überstand der Stabdübel  $\bar{u} \leq 5\text{mm}$
- Mindestbreite der Verbindung  $b \geq 160\text{mm}$  und Mindestdicke des Seitenholzes  $t_1 \geq 35\text{mm}$
- Minimale Rand-, End- und Zwischenabstände der Verbindungsmittel für die Bemessung bei Normaltemperatur gemäss Norm SIA 265. Die Dicke des Mittelholzes  $t_2$  ist gemäss den Angaben der Holzbautabelle HBT1 [23] auf den 8-fachen Wert des Stabdübeldurchmessers  $d$  festzulegen:  $t_2 = 8d$ .
- Die zugrunde gelegten Festigkeitsklassen richten sich nach der Anzahl an hintereinander liegend angeordneten Stabdübelreihen  $n$  gemäss Abbildung 16. Es wird grundsätzlich die Festigkeitsklasse GL24h vorausgesetzt. Für hochbeanspruchte Verbindungen mit 3 Stabdübelreihen ( $n=3$ ) muss in der Regel zur Vermeidung eines Nettoversagens im Holz eine höhere Festigkeitsklasse verwendet werden.

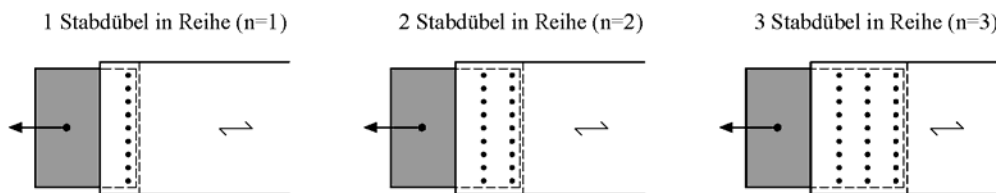


Abbildung 16: Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit  $n$  hintereinander liegend angeordneten Stabdübelreihen

Für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ist ein Vorhaltemass  $c_{fi}$  (Holzaufdickung) gemäss Abbildung 17 erforderlich. Das Vorhaltemass  $c_{fi}$  ist definiert als diejenige allseitige Holzaufdickung (ohne Vergrösserung der Stahlblechabmessungen), welche notwendig ist, um denselben Tragwiderstand im Brandfall nach 60 Minuten wie nach 30 Minuten Brandeinwirkungsdauer (ohne Vorhaltemass) zu erreichen. Die Versenktiefe der Stahlbleche entspricht somit dem oberseitigen Vorhaltemass.

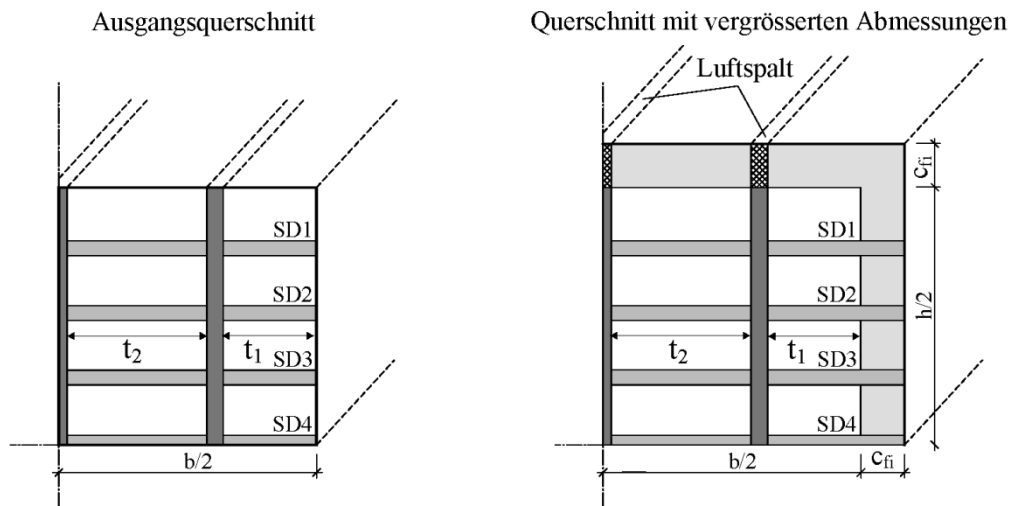


Abbildung 17: Definition des Vorhaltemasses  $c_{fi}$  zum Erreichen einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten (dargestellt am Viertelsquerschnitt einer sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindung, SD=Stabdübel)

Für das Vorhaltemass gilt:

$$c_{fi} = 1.5 \cdot t_{fi,erf} - 45 \quad \text{für } b < 200 \text{ mm} \quad \text{und } 30 \leq t_{fi,erf} \leq 60 \text{ Minuten} \quad (4)$$

$$c_{fi} = 4/3 \cdot t_{fi,erf} - 40 \quad \text{für } b \geq 200 \text{ mm} \quad \text{und } 30 \leq t_{fi,erf} \leq 60 \text{ Minuten} \quad (5)$$



Die seitliche Abbrandtiefe  $d_{\text{char,s}}$  hängt im Wesentlichen von der Dicke des Seitenholzes  $t_1$  ab und kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{\text{char,s}} = \beta_0 \cdot t_{\text{fi,erf}} \quad \text{für } 0 \leq t_{\text{fi,erf}} \leq 30 \text{ Minuten} \quad (6)$$

$$d_{\text{char,s}} = \beta_0 \cdot 30 + 1.5 \cdot \beta_0 \cdot (t_{\text{fi,erf}} - 30) \quad \text{für } 30 \leq t_{\text{fi,erf}} \leq 60 \text{ Minuten} \quad (7)$$

Die ober-/unterseitige Abbrandtiefe  $d_{\text{char,o}}$  kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{\text{char,o}} = 1.1 \cdot \beta_0 \cdot t_{\text{fi,erf}} \quad \text{für } 0 \leq t_{\text{fi,erf}} \leq 60 \text{ Minuten} \quad (8)$$

Dabei ist:

$\beta_0$ : eindimensionale Abbrandrate:  $\beta_0 = 0.65 \text{ mm/Min.}$

$t_{\text{fi,erf}}$ : erforderliche Feuerwiderstandsdauer in Minuten

Der Wert  $d_{\text{red}}$  kann nach den Gleichungen 9 bis 14 für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Min. bzw. nach den Gleichungen 15 bis 26 für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Min. berechnet werden. Für andere Feuerwiderstandsdauern kann linear interpoliert werden.

### Feuerwiderstandsdauer R30

- Zweischnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -120(b/b_r) - 0.8d + 211 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 16 \text{ mm} \quad (9)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -40(b/b_r) - 0.8d - 7n + 114 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 16 \text{ mm} \quad (10)$$

- Vierschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -60(b/b_r) - 0.1d + 126.5 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 16 \text{ mm} \quad (11)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -40(b/b_r) + n(2 - 0.5d) + 94 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 16 \text{ mm} \quad (12)$$

- Sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -60(b/b_r) - 0.4d + 133 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (13)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -40(b/b_r) - 0.4d(n+2) + 101 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (14)$$

### Feuerwiderstandsdauer R60

- Zweischnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -120(b/b_r) - 0.8d + 211 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 12 \text{ mm} \quad (15)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -40(b/b_r) - 0.8d - 7n + 114 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 12 \text{ mm} \quad (16)$$

- Vierschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -30(b/b_r) - 0.6d + 117 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 12 \text{ mm} \quad (17)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -20(b/b_r) + d(-0.2n - 1.4) + 101.5 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 12 \text{ mm} \quad (18)$$

- Sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

$$n=1: \quad d_{\text{red}} = -30(b/b_r) + 115.5 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 8 \text{ mm} \quad (19)$$

$$n=2,3: \quad d_{\text{red}} = -20(b/b_r) - 4n + 94 \text{ [mm]} \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 8 \text{ mm} \quad (20)$$

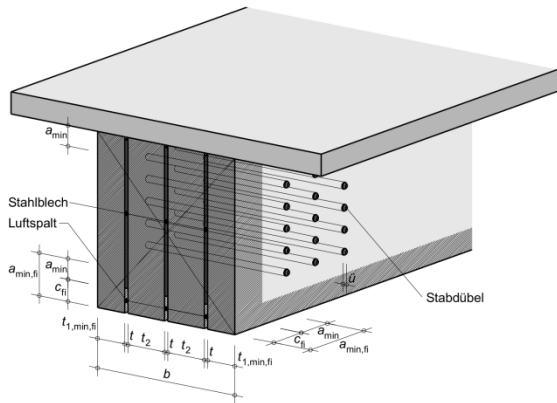
Mit  $d$ : Stabdübeldurchmesser [mm]

$n$ : Stabdübelreihen [-]

Als Alternative zum vorgestellten Bemessungsverfahren darf die Tragsicherheit im Brandfall von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit eingeschlitzten Stahlblechen unter einer beliebigen Beanspruchung vereinfachend nachgewiesen werden, wenn die Tragfähigkeit der Verbindung für Normaltemperatur gewährleistet ist und die minimalen Seitenholz-

dicken  $t_{1,min,fi}$  und die Randabstände  $a_{min,fi}$  gemäss Abbildung 18 eingehalten sind. Für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer zwischen 30 und 60 Minuten müssen die Stahlbleche um das Vorhaltemass  $c_{fi}$  von den Bauteilaussenflächen zurückversetzt sein, hingegen dürfen die Stabdübel bis an die Holzoberfläche bzw. bis  $\ddot{u} \leq 5\text{mm}$  darüber hinaus reichen.

1



$$t_{1,min,fi} \geq 40\text{mm für R30}$$

$$t_{1,min,fi} \geq 80\text{mm für R60}$$

$$a_{min,fi} = a_{min} + c_{fi}$$

$t_{1,min,fi}$  Mindest-Seitenholzdicke für die Feuerwiderstandsbemessung

$a_{min,fi}$  Mindest-Randabstand von Stabdübeln für die Feuerwiderstandsbemessung

$a_{min}$  Mindest-Randabstand von Stabdübeln für Normaltemperatur gemäss Norm SIA 265 und 265/1

$c_{fi}$  Vorhaltemass für die Feuerwiderstandsbemessung:

$$c_{fi} = 0\text{mm für R30}$$

$$c_{fi} = 40\text{mm für R60}$$

(für andere Feuerwiderstandsdauern dürfen die Werte  $t_{1,min,fi}$  und  $c_{fi}$  linear interpoliert werden)

Mindestbreite der Verbindung:

$$b \geq 160\text{mm für R30}$$

$$b \geq 240\text{mm für R60}$$

2

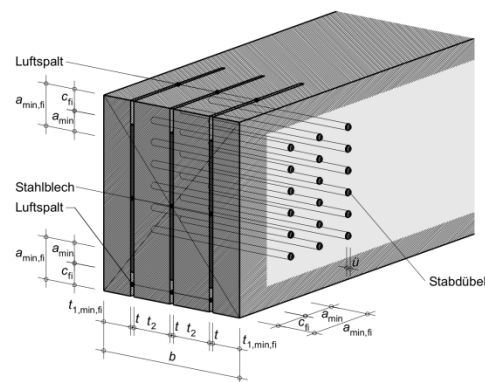


Abbildung 18: Mindest-Seitenholzdicken und Randabstände für die Feuerwiderstandsbemessung von Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit eingeschlitzten Blechen: 1: Dreiseitiger Abbrand; 2: Vierseitiger Abbrand

### Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln oder Nägeln

Für die Bemessung Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln oder Nägel im Brandfall gibt das Holz-Brandschutz-Handbuch [21] ein vereinfachtes Bemessungsverfahren, das in der neuen Lignum-Dokumentation Brandschutz, „Feuerwiderstandsbemessung - Bauteile und Verbindungen“ [20] übernommen wurde. Das Bemessungsverfahren beruht im Wesentlichen auf langjährigen Erfahrungen mit Feuerwiderstandsprüfungen an Holzbauteilen und Verbindungen. Dem Berechnungsmodell wurde der in den Brandversuchen beobachtete Versagensmodus I (Lochleibungsversagen im Holz) zugrunde gelegt und es verwendet die temperaturbedingte Abnahme der Lochleibungsfestigkeit des Holzes.

Der Bemessungswert des Tragwiderstands  $R_{d,fi,St}$  pro Stabdübel und Schnittenebene für einen Feuerwiderstand bis 30 Minuten (R30) kann wie folgt berechnet werden [20]:

$$R_{d,fi,St} = k_{conn,fi} \cdot f_{h,1,k} \cdot (t_{1,fi} - \beta_n \cdot t_{fi,erf}) \cdot d \cdot \eta \quad (21)$$

$R_{d,fi,St}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Stabdübel und Schnittenebene im Brandfall

$k_{conn,fi}$  Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Erwärmung des Holzes:

$$k_{conn,fi} = (0,18 + 0,003 \cdot d) \cdot \frac{450}{\rho_k}$$

$d$  Durchmesser des Stabdübeln in mm

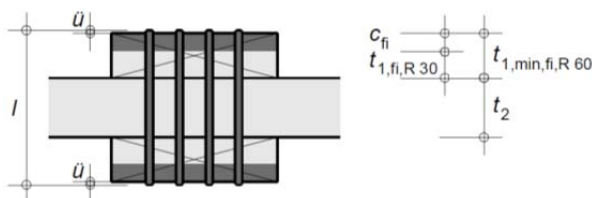
$\rho_k$	Charakteristische Rohdichte des Seitenholzes in $\text{kg/m}^3$ gemäss Norm SIA 265
$f_{h,1,k}$	Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit (5%-Fraktilwert) des Seitenholzes in Abhängigkeit des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung für Normaltemperatur in $\text{N/mm}^2$ gemäss Norm SIA 265
$t_{1,fi}$	Dicke des Seitenholzes für die Feuerwiderstandsbemessung in mm
$t_{2,fi}$	Dicke des Mittelholzes für die Feuerwiderstandsbemessung in mm
$\beta_n$	Ideelle Abbrandrate in $\text{mm/min}$ gemäss Norm SIA 265
$t_{fi,erf}$	Erforderliche Feuerwiderstandsdauer in min: $t_{fi,erf} \leq 30 \text{ min}$
$\eta$	Abminderungsfaktor: $\eta = \frac{\frac{d}{t_{1,fi}}}{0,16 \cdot \sqrt{\frac{t_{2,fi}}{t_{1,fi}} \left(1 + \left(\frac{110}{1}\right)^4\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right)}} \leq 1,0$
$\alpha$	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
$l$	Stabdübellänge in mm

Die Voraussetzungen für Holz-Holz-Verbindungen nach Norm SIA 265 sowie die konstruktiven Anforderungen gemäss vorherigem Abschnitt sind einzuhalten. Zusätzlich sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

Minimale Stabdübellänge im Holz  $l \geq 120 \text{ mm}$

Maximaler Überstand der Stabdübel  $\ddot{u} \leq 5 \text{ mm}$

Um einen Feuerwiderstand R60 zu erreichen, ist die Seitenholzdicke  $t_{1,fi,R 30}$  von einer für Feuerwiderstand R30 konzipierten und nach Gleichung 21 nachgewiesenen Verbindung um den Wert des Vorhaltemasses  $c_{fi}$  gemäss Abbildung 19 zu vergrössern. Ebenfalls sind die minimalen Randabstände gemäss vorherigem Abschnitt zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Damit entspricht der Bemessungswert des Tragwiderstands  $R_{d,fi,St}$  pro Stabdübel und Schnittebene für R60 dem Wert nach Gleichung 21 für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten.



$$t_{1,min,fi,R 60} = t_{1,fi,R 30} + c_{fi} \geq 100 \text{ mm}$$

$t_{1,min,fi,R 60}$	Mindest-Seitenholzdicke für die Feuerwiderstandsbemessung von 60 Min.
$t_{1,fi,R 30}$	Seitenholzdicke aus dem Feuerwiderstandsnachweis R30
$c_{fi}$	Vorhaltemass für die Feuerwiderstandsbemessung: $c_{fi} = 40 \text{ mm}$ (für andere Feuerwiderstandsdauern darf linear interpoliert werden)

Abbildung 19: Mindest-Seitenholzdicke von Holz-Holz-Stabdübelverbindungen für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten

Der Bemessungswert des Tragwiderstands  $R_{d,fi,N}$  pro Nagel und Schnittebene für Holz-Holz-Verbindungen mit glattschaftigen Nägeln bzw. Rillen- und Schraubennägeln für einen Feuerwiderstand bis 30 Minuten (R30) kann wie folgt berechnet werden [20]:

$$R_{d,fi,N} = k_{conn,fi} \cdot f_{h,1,k} \cdot (t_{1,fi} - \beta_n \cdot t_{fi,erf}) \cdot d \cdot \eta \tag{22}$$

$R_{d,fi,N}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Nagel und Schnittebene im Brandfall  
 $k_{conn,fi}$  Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Erwärmung des Holzes:

$$k_{conn,fi} = (0,18 + 0,003 \cdot d) \cdot \frac{450}{\rho_k}$$

$d$	Durchmesser des Nagels in mm
$\rho_k$	Charakteristische Rohdichte des Seitenholzes in $\text{kg/m}^3$ gemäss Norm SIA 265
$f_{h,1,k}$	Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit (5%-Fraktilwert) des Seitenholzes in Abhängigkeit des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung für Normaltemperatur in $\text{N/mm}^2$ gemäss Norm SIA 265
$t_{1,fi}$	Dicke des Seitenholzes für die Feuerwiderstandsbemessung in mm
$\beta_n$	Ideelle Abbrandrate in $\text{mm/min}$ gemäss Norm SIA 265
$t_{fi,erf}$	Erforderliche Feuerwiderstandsdauer in min: $t_{fi,erf} \leq 30 \text{ min}$
$\eta$	Abminderungsfaktor:
	$\eta = \frac{\frac{d}{t_{1,fi}}}{0,05 \cdot \left(1 + \left(\frac{110}{l}\right)^4\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right)} \leq 1,0$
$\alpha$	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
$l$	Nagellänge in mm

Die Voraussetzungen für Nagelverbindungen nach Norm SIA 265 sowie die konstruktiven Anforderungen gemäss vorherigem Abschnitt sind zu erfüllen. Zusätzlich ist eine minimale Nagellänge von  $l \geq 90 \text{ mm}$  einzuhalten.

Um einen Feuerwiderstand R60 zu erreichen, ist die Seitenholzdicke  $t_{1,fi,R 30}$  von einer für Feuerwiderstand R30 konzipierten und nach Gleichung 22 nachgewiesenen Verbindung um den Wert des Vorhaltemasses  $c_{fi}$  gemäss Abbildung 20 zu vergrössern. Ebenfalls sind die minimalen Randabstände gemäss vorherigem Abschnitt zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Damit entspricht der Bemessungswert des Tragwiderstands  $R_{d,fi,N}$  pro Nagel und Schnittebene für R60 dem Wert nach Gleichung 22 für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten.

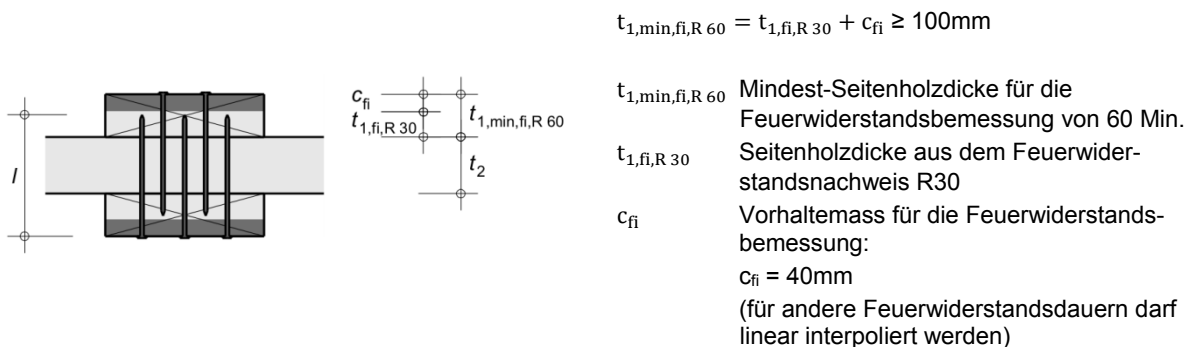


Abbildung 20: Mindest-Seitenholzdicke von Nagelverbindungen für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten

## Zimmermannsmässige Verbindungen

Für den Nachweis der Tragsicherheit von zimmermannsmässigen Verbindungen für den Brandfall sind die gleichen Nachweise wie für Normaltemperatur gemäss Norm SIA 265 bzw. SIA 265/1 zu führen, jedoch mit den für die Brandeinwirkung geltenden Bemessungswerten der Auswirkung für die aussergewöhnlichen Bemessungssituationen, den Bemessungswerten des Tragwiderstands sowie den ideellen Restquerschnitten der dem Brand ausgesetzten Querschnittsteile.

## Bemessung von in Schafrichtung beanspruchten Schrauben

Für die Bemessung von in Schafrichtung beanspruchten Schrauben wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt [16, 17]. Das Bemessungsverfahren berücksichtigt die temperaturbedingte Abnahme der Ausziehfestigkeit des Holzes im Bereich der Verbindung. Es wird angenommen, dass die für die Bemessung im Normalfall zu untersuchenden weiteren Versagensarten (z.B. Abreissen bzw. Durchziehen des Schraubenkopfs, Zugversagen der Schrau-

be) im Brandfall nicht massgebend sind. Der Bemessungswert des Tragwiderstandes  $R_{ax,d,fi}$  der in Schaftrichtung beanspruchten Verbindung für den Brandfall ergibt sich zu:

$$R_{ax,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot R_{ax,k} \tag{23}$$

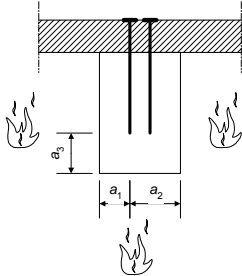
$R_{ax,k}$ : Charakteristischer Tragwiderstand (5% Fraktilwert) der in Schaftrichtung beanspruchten Verbindung bei Normaltemperatur

$k_{mod,fi}$ : Beiwert zur Berücksichtigung des Festigkeitsverlustes bei Brand nach Tabelle 3

$k_{fi}$ : Modifikationsfaktor zur Anpassung der charakteristischen Werte an die 20%-Fraktilwerte. Vereinfacht darf  $k_{fi} = 1.05$  angenommen werden.

Die temperaturbedingte Festigkeitsabnahme der Verbindung darf mit dem Abminderungsfaktor  $k_{mod,fi}$  gemäss Tabelle 3 in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung der Verbindung sowie der Brandzeit berücksichtigt werden. Der Einfluss des Wärmestroms von unten darf vernachlässigt werden, wenn die untere Holzüberdeckung mindestens 20mm grösser als die massgebende seitliche Holzüberdeckung ist.

Tabelle 3: Modifikationsfaktor  $k_{mod,fi}$  zur Berücksichtigung der temperaturbedingten Festigkeitsabnahme der Verbindung in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung  $a_1$  in mm und der Brandzeit  $t$  in Minuten

Modifikationsfaktor $k_{mod,fi}$	gültig für		Mit $a_2 \geq a_1$ $a_3 \geq a_1 + 20$ [mm]  mit $a_1$ in mm, $t$ in Min.  und $a_{1,min} = 25$ mm für R30 $a_{1,min} = 50$ mm für R60
$k_{mod,fi} = 0$	$a_1 \leq 0.6 \cdot t$		
$k_{mod,fi} = \frac{0.44 \cdot a_1 - 0.264 \cdot t}{0.2 \cdot t + 5}$	$0.6 \cdot t \leq a_1 \leq 0.8 \cdot t + 5$		
$k_{mod,fi} = \frac{0.56 \cdot a_1 - 0.36 \cdot t + 7.32}{0.2 \cdot t + 23}$	$0.8 \cdot t + 5 \leq a_1 \leq t + 28$		
$k_{mod,fi} = 1.0$	$a_1 \geq t + 28$		

## Zusammenfassung

Das Brandverhalten von Verbindungen und Verbindungsmitteln ist durch mehrere Parameter beeinflusst und sehr komplex zu erfassen und modellieren. Erfahrungen aus experimentellen Untersuchungen zeigen, dass durch konstruktive Massnahmen (Einhaltung von Mindestanforderungen der Bauteile und der Rand- bzw. Endabstände der Verbindungsmittel) das Brandverhalten von Verbindungen positiv beeinflusst werden kann. Höhere Feuerwiderstandsdauern von Verbindungen können mit der Vergrösserung der Abmessungen der Bauteile sowie der Rand- und Endabstände der Verbindungsmittel oder der Beplankung/Bekleidung der Verbindung mit Holz, Holzwerkstoffen oder mineralisch gebundenen Werkstoffen am besten erreicht werden. In der Regel weisen Verbindungen mit innen liegenden Stahlblechen ein besseres Brandverhalten auf als Verbindungen mit aussen liegenden Stahlblechen oder mit Stahlblechformteilen, die direkt der Brandeinwirkung ausgesetzt werden. Zu beachten ist jedoch, dass Verbindungsmittel aus Stahl (Stabdübel, Bolzen) und innen liegende Stahlbleche zu einem erhöhten Temperatureintrag in den Querschnitt führen.

Die Vielzahl an Verbindungen im Holzbau erlaubt bis heute kein einheitliches Bemessungsverfahren für den Brandfall. Der vorliegende Artikel stellt eine Übersicht von vereinfachten Bemessungsmethoden für im Holzbau typische Verbindungen (auf Abscheren beanspruchte Verbindungen wie mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen und Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln oder Nägeln sowie in Schaftrichtung beanspruchte Schrauben) dar, die in der neuen Lignum-Dokumentation Brandschutz „Feuerwiderstandsbemessung - Bauteile und Verbindungen“ [20] grösstenteils übernommen werden.

## Literatur

- [1] Frangi A., Fontana M., *Fire safety of multistorey timber buildings*, Structures and Buildings 2010; 163: 213–226.
- [2] Schweizerische Brandschutzvorschriften VKF, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Bern, 2003.
- [3] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.1 Bauteile in Holz – Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand, Lignum, Zürich, 2007.
- [4] Erchinger C., Fontana M., Mischler A., Frangi A., *Versuche an mehrschichtigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen und Rillennagelverbindungen bei Raumtemperatur und Normbrandbedingungen*, IBK-Bericht Nr. 293, Institut für Baustatik und Konstruktion IBK, ETH Zürich, 2006.
- [5] Frangi A., Erchinger C., Fontana M., *Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails*, Fire and Materials 2010; 34: 1–19.
- [6] Johansen K.W., *Theory of timber connections*, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE 1949; 98: 249-262.
- [7] Erchinger C., *Zum Verhalten von mehrschichtigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall*, (Dissertation ETH Zürich Nr. 18208), IBK-Bericht Nr. 314, Institut für Baustatik und Konstruktion IBK, ETH Zürich, 2009.
- [8] ANSYS Inc., ANSYS Workbench Version 11.0, Canonsburg, USA.
- [9] EN 1991-1-2 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, CEN, Brüssel, 2002.
- [10] EN 1995-1-2 (Eurocode 5): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, CEN, Brüssel, 2004.
- [11] König J., Walleij L., *One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situation*, Swedish Institute for Wood Technology, Report I9908029, Stockholm, 1999.
- [12] Erchinger C., Frangi A., Fontana M., *Fire design of steel-to-timber dowelled connections*, Engineering Structures 2010; 32: 580–589.
- [13] Fleischer H., Fornather J., Bergmeister K., Luggin W., *Versuche an Holz-Stahlblech Verbindungen mit Stabdübeln, Grossbrandversuchsreihe 1 – GBV 1*, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, 2002.
- [14] Ayme N., Joyeux D., *Rapport du comportement au feu d'assemblages bois. Assemblages bois-métal en double cisaillement*, Rapport SR2I-0.3/121-NA/PB, No CA 030156, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique CTICM, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France, 2003.
- [15] Frangi A., Fontana M., *Versuche zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken bei Raumtemperatur und Normbrandbedingungen*, IBK-Bericht Nr. 249, Institut für Baustatik und Konstruktion IBK, ETH Zürich, 2000.
- [16] Frangi A., *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken*, (Dissertation ETH Zürich Nr. 14328), IBK-Bericht Nr. 269, Institut für Baustatik und Konstruktion IBK, ETH Zürich, 2001.
- [17] Frangi A., Knobloch M., Fontana M., *Fire design of timber-concrete composite slabs with screwed connection*, Journal of Structural Engineering 2010, 136: 219–228.
- [18] SIA Norm 265, Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003.
- [19] SIA/Lignum Dokumentation 83, Brandschutz im Holzbau, SIA/Lignum, Zürich, 1997.
- [20] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 3.1 Feuerwiderstandsbemessung - Bauteile und Verbindungen, Lignum, Zürich, Vorgesehene Veröffentlichung Ende 2011.
- [21] Holz Brandschutz Handbuch, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, München, 2009.
- [22] SIA Norm 265/1, Holzbau– Ergänzende Festlegungen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2009.
- [23] Holzbautabelle HBT1: Handbuch für die Bemessung, Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 1. Auflage, Zürich, 2005.

