

# Technische Universität Berlin

FAKULTÄT VI – Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften  
Institut für Bauingenieurwesen – Fachgebiet Baukonstruktionen  
Holz- und Mauerwerksbau, Darstellungsmethoden

Zusammenfassung zum Forschungsbericht

## **Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall**

**Teil 2: Brandversuche zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse**

gefördert durch  
die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.  
mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik - Berlin und  
der Berliner Stiftung zur Förderung des Holzbaus

DGfH, E-2002/03

Univ.-Prof. a. D. Dipl.-Ing. C. Scheer  
Dr.-Ing. Mandy Peter  
Dr.-Ing. Daniel Povel  
cand.-Ing. Stefan Maack

Berlin, September 2004

## Zusammenfassung

Die derzeitigen Regelungen zur Bemessung der Tragfähigkeit von ungeschützten Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall basieren überwiegend auf empirisch gewonnenen Daten. In einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) geförderten Forschungsvorhaben, „Stabförmige Verbindungsmittel im Brandfall, Grundlagenuntersuchungen“ [2], wurde ein theoretisches Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall entwickelt. Mit Hilfe des entwickelten Modells konnten mit FE-Berechnungen die Temperaturentwicklung innerhalb einer Verbindung im Brandfall für unterschiedliche Branddauern abgebildet werden (Bild 1). Die Untersuchungen zeigten, dass das Holz durch Aufnahme der durch den Stabdübel eingeleiteten Wärmeenergie diesen „kühlt“ und die Stahltemperaturen daher nicht so hoch werden wie ursprünglich erwartet.

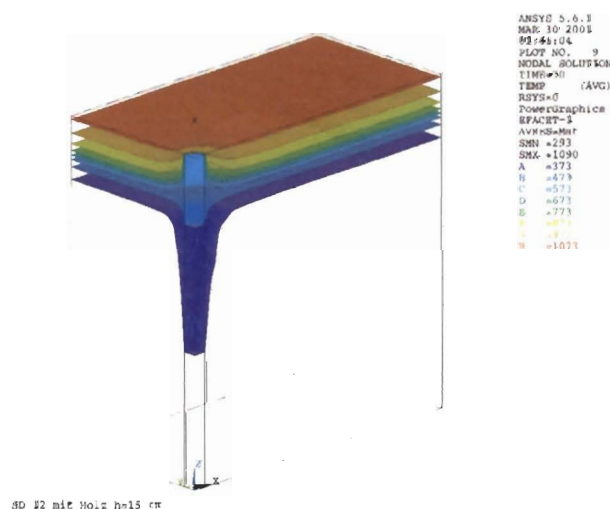


Bild 1: Temperaturverteilung innerhalb einer Holz-Stabdübel-Verbindung nach einer Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten

Auf der Grundlage der Temperaturverläufe wurden Algorithmen zur Tragfähigkeitsbestimmung für den Brandfall erarbeitet. Es wurde nachgewiesen, dass unter Berücksichtigung der anzunehmenden Temperaturverteilung im Stahl und im Holz und den damit verbundenen Abminderungen der Werkstofffestigkeiten eine Bemessung der Verbindungen auf der Grundlage der Theorie von Johanson wie im Kaltfall erfolgen kann. Aus den Ergebnissen umfangreicher Berechnungen wurde ein allgemeingültiges, praxisgerechtes Bemessungskonzept zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall abgeleitet. Es sieht vor, die Tragfähigkeit der Ver-

bindung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer direkt aus der charakteristischen Tragfähigkeit unter Normaltemperaturen zu ermitteln. Das Bemessungsverfahren sieht vor, die Tragfähigkeit  $R_{k,fi}$  im Brandfall, durch eine Reduzierung der Beanspruchbarkeit  $R_k$  unter Normaltemperaturen zu ermitteln. Die ermittelte Tragfähigkeit kann direkt dem Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall gegenübergestellt werden.

$$R_{k,fi} = \eta_{conn} \cdot R_k \quad (1)$$

mit:

$R_k$  charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Abscheren unter Normaltemperaturen

$R_{k,fi}$  charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Abscheren im Brandfall

$\eta_{conn}$  Faktor zur Tragfähigkeitsreduzierung im Brandfall

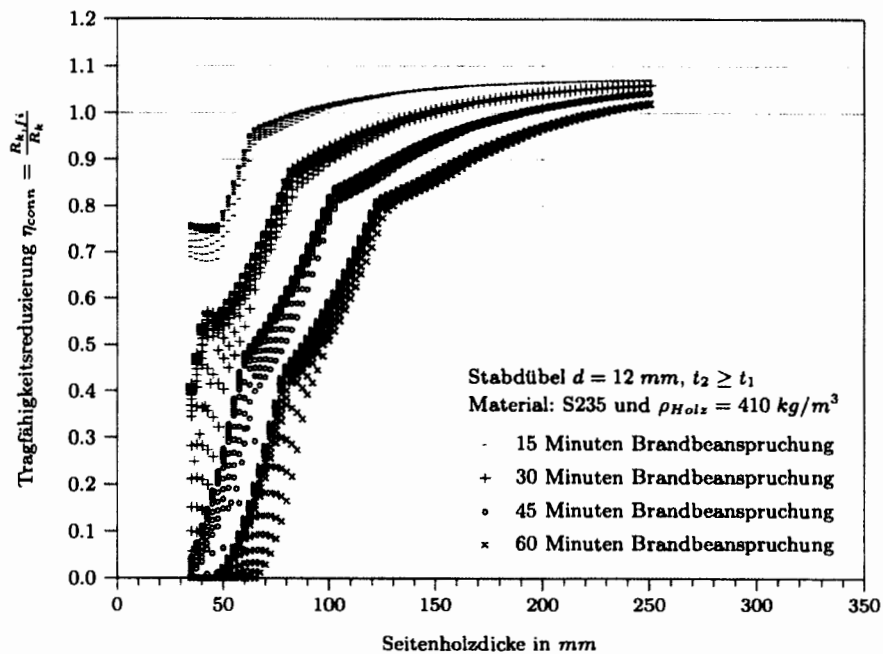


Bild 2: Tragfähigkeitsreduzierung für Stabdübel  $\varnothing 12 \text{ mm}$ , Stahlsorte S235 und Holz mit einer Rohdichte von  $410 \text{ kg/m}^3$  (Mittelholzdicke  $\geq$  Seitenholzdicke  $t_1$ ) nach [2]

Zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse als Voraussetzung für eine Umsetzung in die zukünftige Brandschutznormung wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin Versuchsreihen an zweischnittigen Holzverbindungen durchgeführt.

dungen mit Stabdübeln durchgeführt. Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten Versuche an Verbindungsgeometrien mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Zusätzlich wurden zwei Probekörper für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten bemessen und geprüft.

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurde die Tragfähigkeit zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall untersucht. Die Belastungsversuche erfolgten an 6 verschiedenen Verbindungsgeometrien. Je Verbindungsgeometrie wurden zwei Probekörper getestet, so dass insgesamt 12 Brandversuche durchzuführen waren. Zur Verifizierung der Ergebnisse sowie zum Nachweis der Allgemeingültigkeit des theoretischen Modells war es erforderlich, die Prüfungen unter Variation verschiedener Parameter der Verbindungsgeometrien durchzuführen. Variiert wurden die Anzahl und die Durchmesser der Verbindungsmittel sowie die Dicke der Seiten- und Mittelhölzer. Schwerpunkt der Studie bildeten Untersuchungen bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Zum Nachweis der Gültigkeit des Modells bis zu einer Branddauer von 60 Minuten wurde ein zusätzlicher Versuch geplant und durchgeführt.

Tab. 1: Verbindungsgeometrien der Probekörper unter Angabe der Versuchsdauer

Typ des Probekörpers	Durchmesser $d$ der SDü in mm	Länge $l$ der SDü in mm	Anzahl $n$ der SDü in Stk.	Dicke $t_1$ des Seitenholzes in mm	Dicke $t_2$ des Mittelholzes in mm	Branddauer $t_{fi}$ in min
I	12	200	8	50	100	30
II	12	200	16	50	100	30
III	12	280	16	70	140	30
IV	20	280	8	70	140	30
V	20	400	8	100	200	30
VI <sup>(1)</sup>	20	400	8	100	200	60

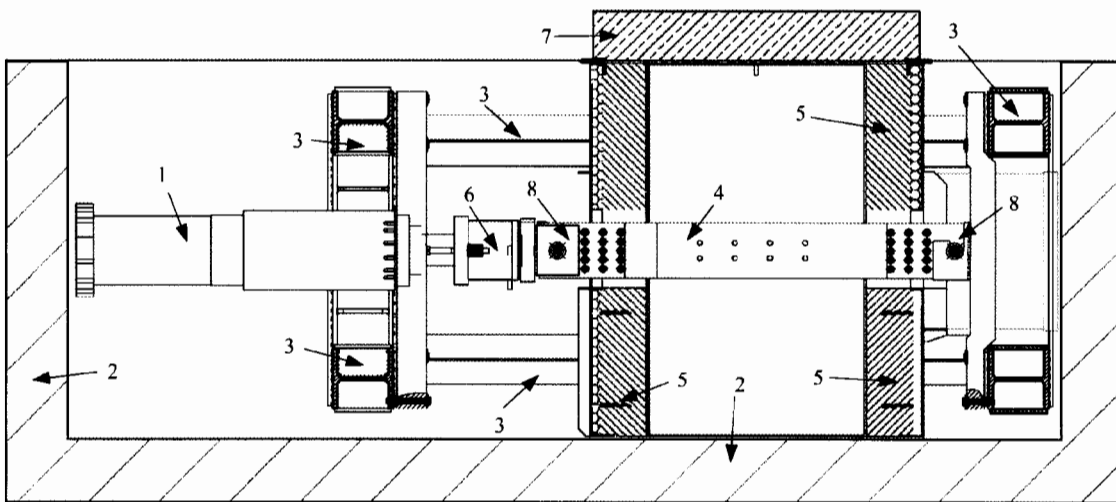
<sup>(1)</sup> entspricht dem Probekörper Typ V unter Erhöhung der Randabstände für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten

Im Vorfeld der Versuchsreihen wurden zur Ermittlung der maximal aufnehmbaren Beanspruchungen der Verbindungen für Feuerwiderstandsdauern von 30 und 60 Minuten Untersuchungen zur Bestimmung der Materialkennwerte an den verwendeten Holz- und Stahlkomponenten durchgeführt. Der Bemessungswert der Tragfähigkeit einer zweischnittigen Holz-Stabdübelverbindung ist von der Rohdichte des Holzes, dem Stabdübeldurchmesser und der Zugfestigkeit des verwendeten Stahls abhängig. Anhand dieser Daten konnten die für die einzelnen Brandversuche erwarteten Tragfähigkeiten mit dem im Teil 1 entwickelten theoretischen Modell ermittelt werden. Die Be-

LB  
S. 5

lastung des Prüfkörpers während des Brandversuchs wurde entsprechend dieser Beanspruchbarkeit gesteuert.

Insgesamt wurden 12 Brandversuche mit 6 verschiedenen Verbindungsgeometrien durchgeführt. In Abhängigkeit der Größe der Beanspruchung für die erwartete Feuerwiderstandsdauer ergaben sich unterschiedliche Versagenszeiten der Verbindungen. Zusätzlich erfolgte im Vorfeld der Brandversuche für jede Verbindungsgeometrie ein Zugversuch unter Normaltemperatur (Kaltversuch). Die Messergebnisse der Kaltversuche dienten einer späteren Beurteilung der in den Brandversuchen erreichten Tragfähigkeiten der Verbindungen.



- |                    |                   |                               |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| 1 – Zugzylinder    | 4 – Probekörper   | 7 – Deckenelement             |
| 2 – Deckenprüfofen | 5 – Brandofen     | 8 – Anschluss an den Prüfrahm |
| 3 – Prüfrahm       | 6 – Kraftmessdose |                               |

Bild 3: Versuchsaufbau (Seitenansicht)

Als Messergebnisse aus den Brandversuchen wurden der Temperaturverlauf in der Brandkammer, die Temperaturen der einzelnen Messpunkte innerhalb der Verbindung, die Verformungen der Verbindungen und die Versagenszeiten der Verbindungen aufgezeichnet. Die Aufzeichnung und Steuerung der Brandraumtemperaturen erfolgte mit 6 Plate-Elementen. Zu Kontroll- und Vergleichszwecken wurde zusätzlich die Temperaturentwicklung mit Hilfe von 6 Mantelthermoelementen erfasst. Die Aufzeichnung der Temperaturmesswerte an den Stabdübeln sowie im Holz erfolgte vollautomatisch in Zeitschritten von 10,2 s. Anhand eines Vergleichs der gemessenen Werte mit den numerisch berechneten Temperaturen konnte eine hohe Genauigkeit des theoretischen Modells zur Temperaturermittlung innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts nachgewiesen werden.

LB  
S. 17  
Bild 13

LB:  
S. 37  
Bild 29

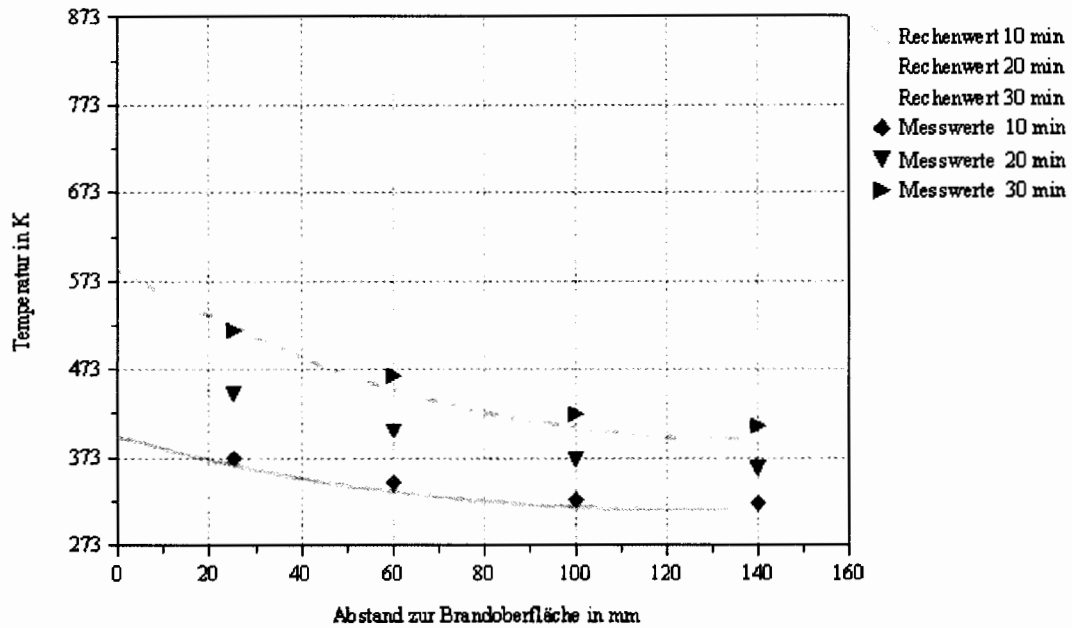


Bild 4: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen  $\varnothing$  20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ IV für unterschiedliche Branddauern

LB:  
S. 38  
Bild 37

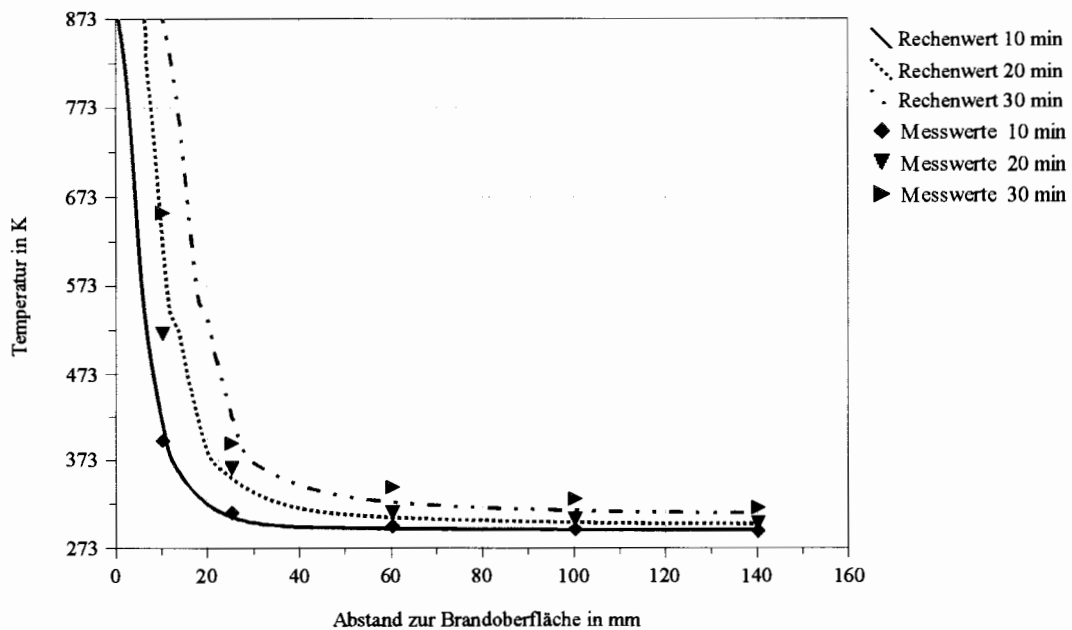


Bild 5: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ IV mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern

Im Bereich des Abbrands liegen die numerisch berechneten Temperaturen deutlich über den gemessenen Werten. Die Ursachen werden im Forschungsbericht detailliert beschrieben. Die Ermittlung der Temperaturverteilung sowie der Tragfähigkeiten der Verbindungen wurden anhand des tragfähigen Restquerschnitts vorgenommen, so dass ausschließlich dieser Bereich zur Verifizierung des theoretischen Modells herangezogen wird. Innerhalb dieses Bereichs zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturdaten.

Je Probekörper wurden die Versagenszeit und die zum Zeitpunkt des Überschreitens der Tragfähigkeit eingetretene Verformung aufgezeichnet. Die Verformungen wurden am Zugzylinder des Prüfstands gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: erreichte Versagenszeiten und aufgetretene Verformungen der Verbindungen im Brandversuch mit Angabe der angestrebten Feuerwiderstandsdauer

Probekörpertyp	geplante Branddauer $t_f$ in min	Versuchsdauer $t$ in min	Verformung in mm
I a	30	39,1	16,1
I b	30	36,3	16,1
II a	30	33,8	10,8
II b	30	32,7	5,3
III a	30	40,7	19,9
III b	30	42,6	18,5
IV a	30	37,8	13,9
IV b	30	39,7	9,6
V a	30	45,2	23,5
V b	30	48,1	22,8
VI a	60	64,6	18,0
VI b	60	63,7	17,6

LB:  
S. 41  
Tab. 6

Zur Bestimmung der Versagensfälle der Verbindungen der Probekörper wurden die Stabdübel nach den Versuchen ausgebaut und vermessen. In Tab. 3 sind die aufgetretenen Versagensfälle für die Versuche unter Normaltemperatur und die Brandversuche vergleichend gegenübergestellt. Die Auswertung zeigt, dass für eine Verbindungsgeometrie für beide Prüfkörper sowohl in den Kalt- als auch in den Brandversuchen erwartungsgemäß jeweils der gleiche Versagensfall eingetreten ist.

LB:  
S. 42  
Bild 43

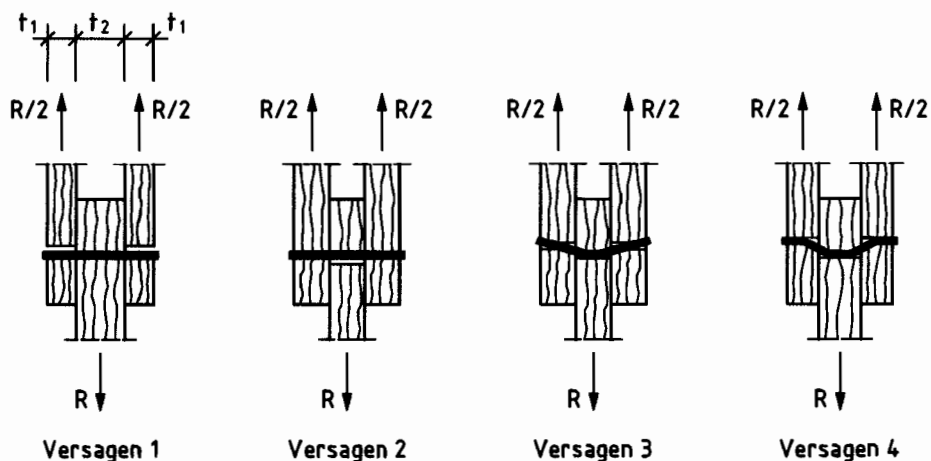


Bild 6: Versagensfälle zweischnittiger auf Abscheren beanspruchter Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Tab. 3: Maßgebende Versagensfälle der Verbindungen nach K.W. Johansen

LB:  
S. 42  
Tab. 7

Probekörpertyp	Versagensfall im Kaltversuch	Versagensfall im Brandversuch
I a	1	3
I b	1	3
II a	1	Zugversagen der Seitenhölzer
II b	1	Zugversagen der Seitenhölzer
III a	4	3
III b	4	3
IV a	1	1
IV b	1	1
V a	1	3
V b	1	3
VI a	4	1
VI b	4	1

Prinzipiell konnte anhand der Brandversuche festgestellt werden, dass der unter Normaltemperaturen angestrebte Versagensfall 4 für duktile Verbindungen, die durch eine Kombination aus Lochleibungsversagen und der Ausbildung von Fließgelenken sowohl im Mittelholz als auch in den Seitenhölzern gekennzeichnet sind, für übliche Verbindungsgeometrien nicht maßgebend wird. Dieses Phänomen ist durch den Abbrand im Bereich der Seitenhölzer begründet. Die Verringerung der Seitenholzdicke und die gleichzeitige Erwärmung führen zu einer Verringerung der Verbindungsmittelspannung in diesem Bereich. Eine Verdrehung des Verbindungsmittels wird möglich, die dazu führt, dass sich im Bereich der Seitenhölzer keine Fließgelenke ausbilden. Dem-



zufolge geht für diese Verbindungen der unter Normaltemperaturen maßgebende Versagensfall 4 im Brandfall in den Versagensfall 3 über.

Für die Tragfähigkeiten der Verbindungen kann festgestellt werden, dass für die nach Teil 1 des Forschungsvorhabens aufgebrauchten Beanspruchungen die angestrebten Feuerwiderstandsdauern für alle Probekörper eingehalten wurden. Die Abweichungen für die Probekörper Typ a und Typ b je Verbindungsgeometrie sind nahezu gleich, so dass die Tragfähigkeiten als kennzeichnend für die ausgeführten Geometrien gelten. Die Mittelwerte der Versagenszeiten von Probekörper Typ a und Typ b je Verbindungsgeometrie sind für die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten in Bild 7 vergleichend gegenübergestellt.

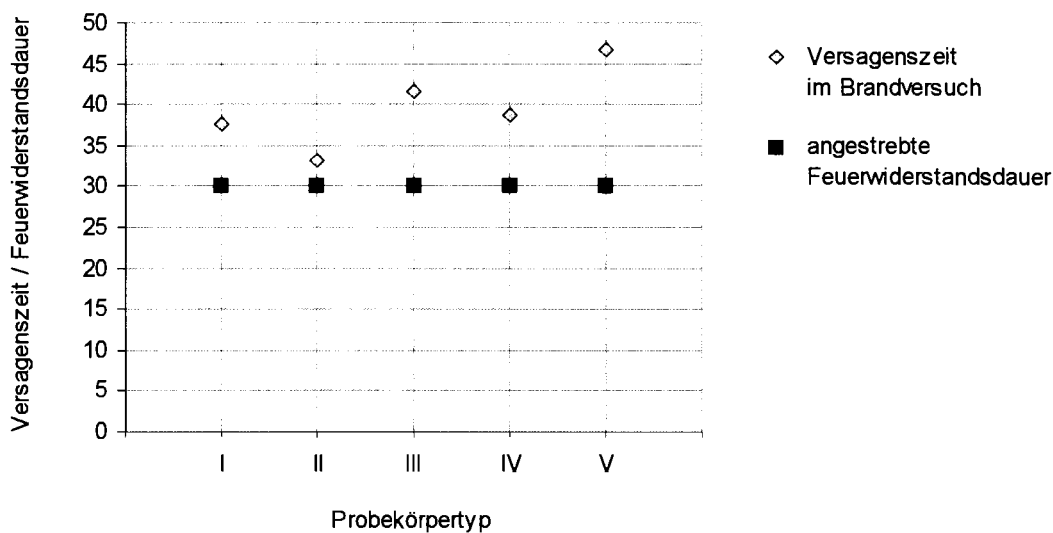


Bild 7: Vergleich der Mittelwerte der Versagenszeiten von Probekörper a und b je Verbindungsgeometrie für die Probekörper Typ I bis V mit den angestrebten Feuerwiderstandsdauern

Anhand der Brandversuche konnte das entwickelte Bemessungskonzept verifiziert werden, so dass es möglich und empfehlenswert ist, dass Verfahren in die zukünftige Brandschutznormung zu integrieren. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass es sinnvoll ist, das Verfahren auch auf andere Verbindungsarten zu erweitern. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen belegen, dass für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln bei Kenntnis der Temperaturverteilung innerhalb der Verbindung die üblichen Bemessungsverfahren verwendet werden können und damit häufig ausreichende Tragfähigkeiten auch ungeschützter Verbindungen im Brandfall für Feuerwiderstandszeiten von 30 bis 60 Minuten nachgewiesen werden können. Damit würde sich der konstruktive Aufwand im Vergleich zu bisher geschützt auszuführenden Verbindungen wesentlich verringern.

## Literatur

- [1] Johansen, K. W.: Theory of Timber Connections. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. Veröffentlichung Nr. 9, S. 249-262, Bern, Switzerland, 1949.
- [2] Scheer, C.; Povel, D.: Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall; Teil 1: Grundlagenuntersuchungen. Forschungsbericht, Technische Universität Berlin, 2002.