

**BAM-BERICHT Nr. 24** DER BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)  
BERLIN

## Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

von Dipl.- Ing. J. Stanke  
Ing. Grad. E. Klement  
Dipl.- Ing. R. Rudolphi



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	1
2. Versuchsprogramm und Materialeigenschaften.....	1
3. Versuchsausführung.....	5
3.1. Feuerwiderstandsdauer.....	5
3.2. Abbrand.....	10
4. Versuchsergebnisse.....	10
4.1. Feuerwiderstandsdauer.....	10
4.2. Abbrand.....	14
5. Diskussion und Auswertung der Versuchsergebnisse.....	15
5.1. Feuerwiderstandsdauer.....	15
5.1.1. Streuung der Versuchsergebnisse.....	15
5.1.2. Statische Bedingungen.....	16
5.1.3. Einteilige Stützen aus Vollholz.....	17
5.1.4. Einteilige, brettschichtverleimte Stützen.....	18
5.1.5. Mehrteilige Stützen.....	20
5.2. Ermittlung der Abbrandfunktion.....	20
6. Rechnerische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen, brettschichtverleimten Stützen unter Druckbeanspruchung.....	22
6.1. Verhalten von Holzbauteilen unter Wärmebeanspruchung.....	22
6.1.1. Entzündung.....	22
6.1.2. Verkohlung.....	22
6.1.3. Temperaturen und Feuchtigkeiten im brandbeanspruchten Holzquerschnitt.....	23
6.1.4. Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit.....	24
6.2. Grundlagen von Rechenverfahren.....	24
6.3. Erläuterung eines Rechenverfahrens an Stützen mit Rechteckquerschnitt.....	26
6.4. Anwendung des Rechenverfahrens bei Holzstützen mit Rechteckquerschnitt.....	30
6.5. Betrachtungen zur Wahl der Grenzkurve.....	33
7. Zusammenfassung.....	35





## 1. Einleitung

Nach DIN 4102, Blatt 4 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Einreihung in die Begriffe [4] - gelten Holzstützen ohne besonderen Nachweis als feuerhemmend (Feuerwiderstandsklasse F 30), wenn sie mit einem Putz auf Putzträger bekleidet sind. Um auch die Einreihung ungeschützter Holzstützen in die Feuerwiderstandsklassen F 30 und F 60 vorzubereiten, wurde das Brandverhalten von Druckstäben aus Holz unter Normbedingungen untersucht.

## 2. Versuchsprogramm und Materialeigenschaften

Das Versuchsprogramm umfaßte insgesamt 72 Holzstützen aus Nadelholz der Güteklasse I oder II nach DIN 4074. Davon waren 12 als einteilige Vollholz-Stützen, 56 als einteilige, brett-schichtverleimte Stützen und 4 als mehrteilige Vollholz-Stützen ausgebildet. Die Lamellendicke der brett-schichtverleimten Probekörper betrug 2 oder 3 cm. Als Leime waren Resorzinharz und Harnstoffharz verwendet worden. Eine Übersicht über die ausgewählten Stützen und ihre Materialkennwerte geben die Tabellen 1 bis 3.

Die Feuchtigkeit  $u$  im Zeitpunkt der Versuchsausführung und Rohdichte  $\rho$  jeder Probestütze wurden an einer 20 mm dicken Scheibe mit den Querschnittsabmessungen ermittelt. Die Bestimmung der Druckfestigkeit  $\sigma_D$  und des Elastizitätsmoduls  $E_d$  aus dem Druckversuch erfolgte nach DIN 52 185, Blatt 1 an Proben mit den Abmessungen 20 mm x 20 mm x 60 bzw. 120 mm, die jeweils aus einem Querschnitt gleichmäßig verteilt entnommen worden waren. Ferner wurden an einigen Probestützen der Elastizitätsmodul  $E_b$  aus der elastischen Durchbiegung parallel zur Leimfuge nach DIN 52 186 bei einer maximalen Spannung von  $100 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$  sowie der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  nach dem Durchschallungsverfahren mit Hilfe eines Impuls-Schall-Gerätes ermittelt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm und Materialkennwerte - Einteilige Stützen aus Vollholz der Holz-Güteklasse II

Bezeichnung	Abmessungen	Seitenverhältnis	Querschnittsfläche	Feuchtigkeit	Rohdichte	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul
	b x h	h : b	F	u <sup>1)</sup>	$\rho$ <sup>1)</sup>	$\sigma_D$	E
	cm x cm		cm <sup>2</sup>	Gew. - %	kg·m <sup>-3</sup>	kp·cm <sup>-2</sup>	kp·cm <sup>-2</sup> x 10 <sup>3</sup>
V 14 A	14 x 14	1	196	10,0	339	258...383 i.M. 325	E <sub>d</sub> = 84...136 i.M. 107 E <sub>dyn.</sub> = 145
V 14 B	14 x 14	1	196	8,5	351	289...445 i.M. 359	E <sub>d</sub> = 89...141 i.M. 121 E <sub>dyn.</sub> = 139
V 14 C	14 x 14	1	196	11,2	385		
V 14 D	14 x 14	1	196	10,8	418		
V 16 A	16 x 16	1	256	9,4	373		
V 16 B	16 x 16	1	256	9,2	405		
V 20 A	20 x 20	1	400	11,4	351	304...432 i.M. 362	E <sub>d</sub> = 80...140 i.M. 105 E <sub>dyn.</sub> = 116
V 20 B	20 x 20	1	400	11,5	422		
V 20 C	20 x 20	1	400	8,5	413	315...513 i.M. 410	E <sub>d</sub> = 72...186 i.M. 138
V 20 D	20 x 20	1	400	9,5	418	314...369 <sup>2)</sup> i.M. 348 <sup>2)</sup>	E <sub>d</sub> = 41...76 <sup>2)</sup> i.M. 64 <sup>2)</sup>
V 24 A	24 x 24	1	576	12,8	297		
V 24 B	24 x 24	1	576	11,8	362		

1) Bezogen auf das Trockengewicht

2) Nach dem Brandversuch am Restquerschnitt im erkalteten Zustand ermittelt.

Tabelle 2: Versuchsprogramm und Materialkennwerte - Einteilige Stützen aus Brettschichtholz der Holz-Güteklasse I

Bezeichnung <sup>1)</sup>	Abmessungen	Seitenverhältnis	Querschnittsfläche	Feuchtigkeit	Rohdichte	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul
	b x h	h : b	F	u <sup>2)</sup>	$\rho$ <sup>2)</sup>	$\sigma_D$	E
	cm x cm		cm <sup>2</sup>	Gew. - %	kg·m <sup>-3</sup>	kp·cm <sup>-2</sup>	kp·cm <sup>-2</sup> x 10 <sup>3</sup>
R 12/16 A	12 x 16	1,33	192	7,3	420		
R 12/16 B	12 x 16	1,33	192	8,0	437		
H 12/16 A	12 x 16	1,33	192	8,7	444		
H 12/16 B	12 x 16	1,33	192	8,4	423		
H 12/30	12 x 30	2,50	360	8,7	437		
H 12/46 A	12 x 46	3,83	552	6,8	440		
H 12/46 B	12 x 46	3,83	552	6,9	413		
R 14 A	14 x 14	1,00	196	4,6	440	453...555 i.M. 518	E <sub>d</sub> = 106...239 i.M. 176 E <sub>dyn.</sub> = 184

Tabelle 2: Fortsetzung

Bezeichnung <sup>1)</sup>	Abmessungen b x h	Seitenverhältnis h : b	Querschnittsfläche F	Feuchtigkeit u <sup>2)</sup>	Rohdichte $\rho^2)$	Druckfestigkeit $\sigma_D$	Elastizitätsmodul E
	cm x cm		cm <sup>2</sup>	Gew. - %	kg·m <sup>-3</sup>	kp·cm <sup>-2</sup>	kp·cm <sup>-2</sup> x 10 <sup>3</sup>
R 14 B	14 x 14	1,00	196	8,4	445		
R 14 C	14 x 14	1,00	196	9,5	452		
R 14 D	14 x 14	1,00	196	9,7	428		
H 14 A	14 x 14	1,00	196	8,0	442	525...625 i.M. 566	E <sub>d</sub> = 101..170 i.M. 142 E <sub>dyn.</sub> = 198
H 14 B	14 x 14	1,00	196	9,2	483	470...622 i.M. 533	E <sub>d</sub> = 156..200 i.M. 170 E <sub>dyn.</sub> = 203
H 14 C	14 x 14	1,00	196	10,2	452		
H 14 D	14 x 14	1,00	196	10,2	428		
H 14/24 A	14 x 24	1,71	336	8,8	408		
H 14/24 B	14 x 24	1,71	336	8,9	405		
H 14/30 A	14 x 30	2,14	420	8,6	446		
H 14/30 B	14 x 30	2,14	420	9,5	467	420...740 i.M. 611	E <sub>d</sub> = 114..250 i.M. 190 E <sub>b</sub> = 151..157 i.M. 153
H 14/30 C	14 x 30	2,14	420	9,2	456		
H 14/40	14 x 40	2,86	560	8,6	451		
R 15 A	15 x 15	1,00	225	10,2	377		
R 15 B	15 x 15	1,00	225	10,6	376		
H 15 A	15 x 15	1,00	225	10,8	397		
H 15 B	15 x 15	1,00	225	18,6	372		
R 16	16 x 16	1,00	256	7,9	309		
H 16 A	16 x 16	1,00	256	7,4	369		
H 16 B	16 x 16	1,00	256	8,5	403		
R 16/30	16 x 30	1,87	480	9,6	406		
H 16/30 A	16 x 30	1,87	480	15,4	418		
H 16/30 B	16 x 30	1,87	480	11,7	436		
H 16/30 C	16 x 30	1,87	480	10,5	428		
H 16/30 D	16 x 30	1,87	480	9,7	396		
R 20 A	20 x 20	1,00	400	8,1	395	390...430 i.M. 417	E <sub>d</sub> = 87...152 i.M. 110 E <sub>dyn.</sub> = 137
R 20 B	20 x 20	1,00	400	8,0	389	410...545 i.M. 463	E <sub>d</sub> = 92...180 i.M. 120 E <sub>dyn.</sub> = 151
R 20 C	20 x 20	1,00	400	8,8	463	545...690 i.M. 633	E <sub>d</sub> = 114..211 i.M. 156 E <sub>b</sub> = 163..164 i.M. 164



Tabelle 2: Fortsetzung

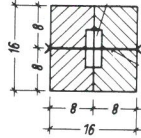
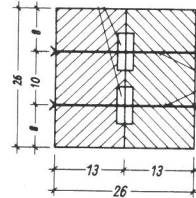
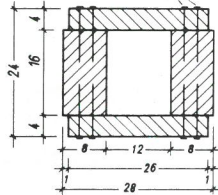
Bezeichnung <sup>1)</sup>	Abmessungen b x h	Seitenverhältnis h : b	Querschnittsfläche F	Feuchtigkeit u <sup>2)</sup>	Rohdichte c <sup>2)</sup>	Druckfestigkeit $\sigma_D$	Elastizitätsmodul E
	cm x cm		cm <sup>2</sup>	Gew. - %	kg·m <sup>-3</sup>	kp·cm <sup>-2</sup>	kp·cm <sup>-2</sup> x 10 <sup>3</sup>
R 20 D	20 x 20	1,00	400	8,8	428		
H 20 A	20 x 20	1,00	400	8,1	377	374...463 i.M. 415	E <sub>d</sub> = 80...178 i.M. 118 E <sub>dyn.</sub> = 143
H 20 B	20 x 20	1,00	400	8,0	386	365...515 i.M. 424	E <sub>d</sub> = 87...214 i.M. 125 E <sub>dyn.</sub> = 150
H 20 C	20 x 20	1,00	400	9,4	453	545...645 i.M. 610	E <sub>d</sub> = 111...197 i.M. 145 E <sub>b</sub> = 139...141 i.M. 140
H 20 D	20 x 20	1,00	400	8,8	447		
H 20/40 A	20 x 40	2,00	800	8,4	443		
H 20/40 B	20 x 40	2,00	800	7,0	450		
H 24 A	24 x 24	1,00	576	7,9	396		
H 24 B	24 x 24	1,00	576	8,1	383		
H 26 A	26 x 26	1,00	676	13,3	423		
H 26 B	26 x 26	1,00	676	11,8	416		
R 27 A	27 x 27	1,00	729	12,1	384	298...434 i.M. 367 285...434 <sup>3)</sup> i.M. 335 <sup>3)</sup>	E <sub>d</sub> = 65...118 i.M. 88 E <sub>d</sub> = 74...137 <sup>3)</sup> i.M. 100 <sup>3)</sup>
R 27 B	27 x 27	1,00	729	12,6	400	321...505 i.M. 387 365...427 <sup>3)</sup> i.M. 402 <sup>3)</sup>	E <sub>d</sub> = 64...152 i.M. 110 E <sub>d</sub> = 86...156 <sup>3)</sup> i.M. 116 <sup>3)</sup>
R 27 C	27 x 27	1,00	729	9,3	413		
H 27 A	27 x 27	1,00	729	12,6	415	352...500 i.M. 437 200...487 <sup>3)</sup> i.M. 382 <sup>3)</sup>	E <sub>d</sub> = 90...202 i.M. 151 E <sub>d</sub> = 83...149 <sup>3)</sup> i.M. 113 <sup>3)</sup>
H 27 B	27 x 27	1,00	729	10,5	398	342...431 i.M. 383 365...496 <sup>3)</sup> i.M. 402 <sup>3)</sup>	E <sub>d</sub> = 75...138 i.M. 100 E <sub>d</sub> = 112...150 <sup>3)</sup> i.M. 131 <sup>3)</sup>
H 27 C	27 x 27	1,00	729	9,1	411		
H 28 A	28 x 28	1,00	784	10,4	397		
H 28 B	28 x 28	1,00	784	10,6	416		
H 40	40 x 40	1,00	1600	9,4	407		

1) R = Resorzinharz verleimt, H = Harnstoffharz verleimt

2) Bezogen auf das Trockengewicht

3) Nach dem Brandversuch am Restquerschnitt im erkalteten Zustand ermittelt.

Tabelle 3: Versuchsprogramm und Materialkennwerte - Mehrteilige Stützen aus Vollholz der Holz-Güteklasse II

Bezeichnung	Querschnitt	Feuchtigkeit $u^{1)}$	Rohdichte $\rho^{1)}$
		Gew. - %	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
2x8/16 A	 <p>Verbindungsmittel: Dübel und Bolzen</p>	10,4	401
2x8/16 B		11,1	429
2x13/26	 <p>Verbindungsmittel: Dübel und Bolzen</p>	14,2	408
2 x [8/16+4/26]	 <p>Verbindungsmittel: Nägel</p>	9,2	405

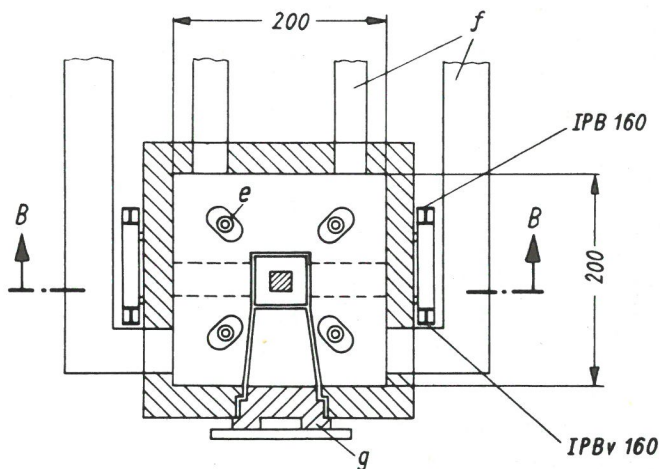
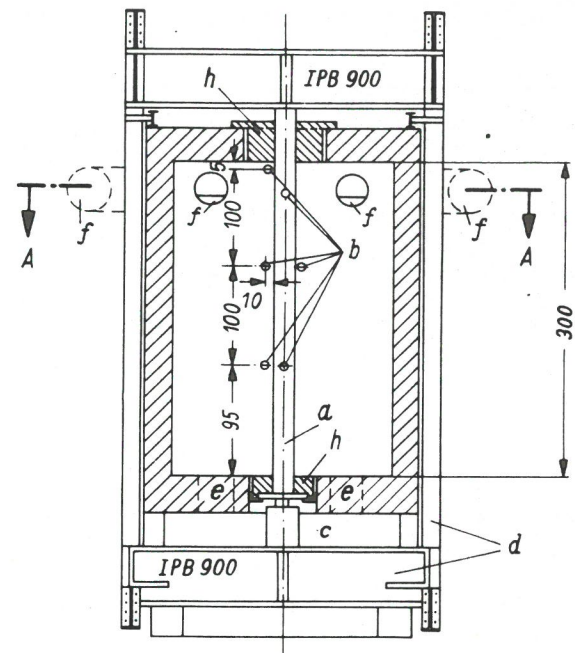
1) Bezogen auf das Trockengewicht

Die Materialkennwerte lassen einen bereits bekannten [16] Zusammenhang zwischen der Rohdichte  $\rho$  und der Druckfestigkeit  $\sigma_D$  bzw. dem Elastizitätsmodul  $E_d$  erkennen. Dagegen ist ein Einfluß der Holzfeuchtigkeit  $u$  auf die beiden o.a. Kennwerte nicht erkennbar, da die Holzfeuchtigkeiten der untersuchten Stützen in der gleichen Größenordnung lagen. Der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  ist in allen Fällen größer als der vergleichbare statische Elastizitätsmodul  $E_d$  und gestattet eine qualitative Aussage über das elastische Verhalten des Holzes.

### 3. Versuchsausführung

#### 3.1. Feuerwiderstandsdauer

Die Brandversuche an den Holzstützen wurden gemäß



- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| a) Probekörper      | e) Ölgebläsebrenner |
| b) Thermoelemente   | f) Rauchabzüge      |
| c) Druckzylinder    | g) Ausfahrbare Tür  |
| d) Belastungsrahmen | h) Abdichtung       |

**Abb. 1: Stützenprüfstand**

DIN 4102, Blatt 2 [5] in einem Prüfstand nach Abb. 1 ausgeführt.

Die Belastung der Probekörper während der Versuche erfolgte mittig mit einer konstanten Gebrauchslast, die nach DIN 1052 (Ausgabe 1965) [6] (Einteilige Stützen) bzw. (Ausgabe 1969) [7] (Mehrteilige Stützen) unter Zugrundelegung einer Knicklänge von  $s_K = s = 3,65$  m ermittelt wurde. Dabei war die Längenänderung der Stützen nicht behindert.

In den Tabellen 4 bis 6 sind die Belastungen der Probekörper angegeben.



Tabelle 4: Belastung - Einteilige Stützen aus Vollholz

$$s_K \text{ (Knicklänge)} = s = 3,65 \text{ m} \quad \text{zul } \sigma_D = 85 \text{ kp}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Bezeichnung	Schlankheitsgrad max $\lambda$	Rechnerisch zulässige Last nach DIN 1052		Vorhandene Last vorh P $M_p$	Belastungsgrad	
		zul $P_{1965}^{1)}$ $M_p$	zul $P_{1969}^{2)}$ $M_p$		$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul } P_{1965}}$	$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul } P_{1969}}$
V 14 A	90	6,63	6,43	6,67	1,01	1,04
V 14 B	90	6,63	6,43	6,67	1,01	1,04
V 14 C	90	6,63	6,43	3,34	0,50	0,52
V 14 D	90	6,63	6,43	3,34	0,50	0,52
V 16 A	79	10,31	10,07	10,30	1,00	1,02
V 16 B	79	10,31	10,07	10,30	1,00	1,02
V 20 A	63	19,72	20,04	19,75	1,00	0,98
V 20 B	63	19,72	20,04	19,75	1,00	0,98
V 20 C	63	19,72	20,04	19,75	1,00	0,98
V 20 D	63	19,72	20,04	19,75	1,00	0,98
V 24 A	53	31,72	33,22	31,60	1,00	0,95
V 24 B	53	31,72	33,22	31,60	1,00	0,95

1) Nach DIN 1052, Ausgabe 1965 [6]

2) Nach DIN 1052, Ausgabe 1969 [7]

Tabelle 5: Belastung - Einteilige Stützen aus Brettschichtholz

$$s_K \text{ (Knicklänge)} = s = 3,65 \text{ m} \quad \text{zul } \sigma_D = 110 \text{ kp}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Bezeichnung	Schlankheitsgrad max $\lambda$	Rechnerisch zulässige Last nach DIN 1052		Vorhandene Last vorh P $M_p$	Belastungsgrad	
		zul $P_{1965}^{1)}$ $M_p$	zul $P_{1969}^{2)}$ $M_p$		$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul } P_{1965}}$	$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul } P_{1969}}$
R 12/16 A	105	6,25	6,34	6,27	1,00	0,99
R 12/16 B	105	6,25	6,34	6,27	1,00	0,99
H 12/16 A	105	6,25	6,34	6,27	1,00	0,99
H 12/16 B	105	6,25	6,34	6,27	1,00	0,99
H 12/30	105	11,72	11,88	11,82	1,01	0,99
H 12/46 A	105	17,97	18,22	18,15	1,01	1,00
H 12/46 B	105	17,97	18,22	18,15	1,01	1,00
R 14 A	90	8,58	8,32	8,63	1,01	1,04
R 14 B	90	8,58	8,32	8,63	1,01	1,04
R 14 C	90	8,58	8,32	4,32	0,50	0,52
R 14 D	90	8,58	8,32	6,47	0,75	0,78
H 14 A	90	8,58	8,32	8,63	1,01	1,04
H 14 B	90	8,58	8,32	8,63	1,01	1,04
H 14 C	90	8,58	8,32	4,32	0,50	0,52
H 14 D	90	8,58	8,32	6,47	0,75	0,78
H 14/24 A	90	14,71	14,26	14,80	1,01	1,04

Tabelle 5: Fortsetzung

Bezeichnung	Schlankheitsgrad max $\lambda$	Rechnerisch zulässige Last nach DIN 1052		Vorhandene Last vorh P	Belastungsgrad	
		zul P <sub>1965</sub> <sup>1)</sup>	zul P <sub>1969</sub> <sup>2)</sup>		$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul P}_{1965}}$	$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul P}_{1969}}$
		M <sub>p</sub>	M <sub>p</sub>	M <sub>p</sub>		
H 14/24 B	90	14,71	14,26	14,80	1,01	1,04
H 14/30 A	90	18,39	17,82	18,50	1,01	1,04
H 14/30 B	90	18,39	17,82	9,25	0,50	0,52
H 14/30 C	90	18,39	17,82	9,25	0,50	0,52
H 14/40	90	24,52	23,76	24,64	1,00	1,04
R 15 A	84	10,85	10,49	10,90	1,00	1,04
R 15 B	84	10,85	10,49	10,90	1,00	1,04
H 15 A	84	10,85	10,49	10,90	1,00	1,04
H 15 B	84	10,85	10,49	10,90	1,00	1,04
R 16	79	13,34	13,03	13,35	1,00	1,02
H 16 A	79	13,34	13,03	13,35	1,00	1,02
H 16 B	79	13,34	13,03	13,35	1,00	1,02
R 16/30	79	25,01	24,43	12,50	0,50	0,51
H 16/30 A	79	25,01	24,43	25,00	1,00	1,02
H 16/30 B	79	25,01	24,43	25,00	1,00	1,02
H 16/30 C	79	25,01	24,43	25,00	1,00	1,02
H 16/30 D	79	25,01	24,43	12,50	0,50	0,51
R 20 A	63	25,52	25,93	25,60	1,00	0,99
R 20 B	63	25,52	25,93	25,60	1,00	0,99
R 20 C	63	25,52	25,93	12,80	0,50	0,49
R 20 D	63	25,52	25,93	12,80	0,50	0,49
H 20 A	63	25,52	25,93	25,60	1,00	0,99
H 20 B	63	25,52	25,93	25,60	1,00	0,99
H 20 C	63	25,52	25,93	12,80	0,50	0,49
H 20 D	63	25,52	25,93	12,80	0,50	0,49
H 20/40 A	63	51,03	51,87	51,20	1,00	0,99
H 20/40 B	63	51,03	51,87	51,20	1,00	0,99
H 24 A	53	41,05	42,99	40,80	0,99	0,95
H 24 B	53	41,05	42,99	40,80	0,99	0,95
H 26 A	49	50,15	53,40	50,20	1,00	0,94
H 26 B	49	50,15	53,40	50,20	1,00	0,94
R 27 A	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
R 27 B	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
R 27 C	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
H 27 A	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
H 27 B	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
H 27 C	47	55,05	59,04	54,90	1,00	0,93
H 28 A	45	60,24	64,69	60,30	1,00	0,93
H 28 B	45	60,24	64,69	60,30	1,00	0,93
H 40	32	139,01	150,93	140,00	1,01	0,93

1) Nach DIN 1052, Ausgabe 1965 [6]

2) Nach DIN 1052, Ausgabe 1969 [7]



Tabelle 6: Belastung - Mehrteilige Stützen aus Vollholz

$$s_K \text{ (Knicklänge)} = s = 3,65 \text{ m} \quad \text{zul } \sigma_D = 85 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Bezeichnung	Schlankheitsgrad max $\lambda$	Rechnerisch zulässige Last nach DIN 1052		Vorhandene Last vorh P	Belastungsgrad	
		zul P <sub>1965</sub> <sup>1)</sup>	zul P <sub>1969</sub> <sup>2)</sup>		$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul P}_{1965}}$	$\frac{\text{vorh P}}{\text{zul P}_{1969}}$
		M <sub>p</sub>	M <sub>p</sub>	M <sub>p</sub>		
2 x 8/16 A	72 123 <sup>3)</sup>	11,35	4,87	4,87	0,43	1,00
2 x 8/16 B	72 122 <sup>3)</sup>	11,35	4,87	4,87	0,43	1,00
2 x 13/26	50 78 <sup>3)</sup>	38,30	27,00	27,00	0,70	1,00
2x[8/16+4/26]	94 85 <sup>3)</sup>	22,80	16,60	16,60	0,73	1,00

1) Nach DIN 1052, Ausgabe 1965 [6]

2) Nach DIN 1052, Ausgabe 1969 [7]

3) Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel

Die Temperatur im Brandraum wurde an sechs Stellen (vgl. Abb. 1) etwa 10 cm vor den Probekörperoberflächen mit Thermoelementen gemessen und so gesteuert, daß das arithmetische Mittel der sechs Meßstellen der Temperatur-Zeit-Kurve der DIN 4102, Blatt 2 [5] (Abb. 2) entsprach. Stichprobenartig vorgenommene Rauchgasanalysen während der Brandversuche ergaben im Prüfstand einen Sauerstoffüberschuß von etwa 5 %, so daß eine vollständige Verbrennung gewährleistet war. Die Beflammung erfolgte bis zum Tragfähigkeitsverlust der Stützen.

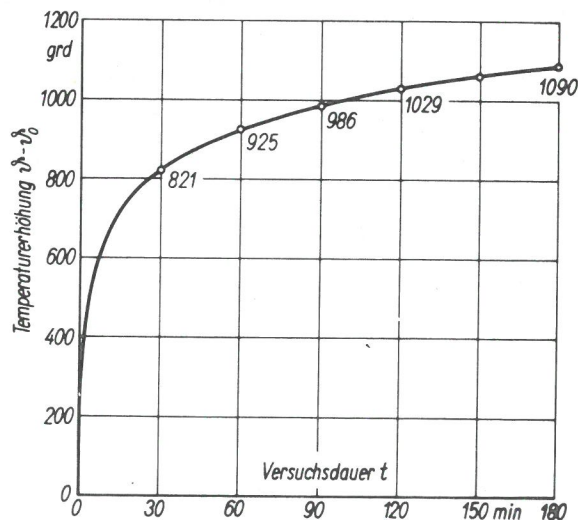


Abb. 2: Temperatur-Zeit-Kurve nach DIN 4102

### 3.2. Abbrand

Zur Ermittlung des Abbrandes als Funktion der Branddauer  $t$  wurden Brandversuche unterschiedlicher Zeitdauer an unbelasteten, etwa 50 cm langen Probekörpern verschiedener Querschnitte unter den in Abschn. 3.1 beschriebenen thermischen Bedingungen ausgeführt. Die Probekörper entstammten den Stützen der Reihen R 12/16, H 12/46, H 16, H 16/30, R 20 und H 28 (vgl. Tabelle 2). Während der Brandversuche waren die Holzkörper in der Mittelachse des Prüfstandes in halber Brandraumhöhe befestigt (vgl. Abb. 1). Etwa 10 sec nach Versuchsende wurden die Probekörper abgelöscht; anschließend wurde aus ihrer Mitte jeweils eine Scheibe entnommen, die verkohlten Teile entfernt und der Restquerschnitt auf Papier übertragen.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1. Feuerwiderstandsdauer

In den Tabellen 7 bis 9 sind die ermittelten Feuerwiderstandsdauern  $t_F$  der Probestützen angegeben (Belastung nach Tabellen 4 bis 6). Die Abb. 3 zeigt die fehlerhafte Verleimung bei der Probestütze H 28 B (vgl. Fußnote zu Tabelle 8). Aus Platzgründen werden nur die Abb. (4 bis 24) der mehrteiligen Probekörper vor und nach den Versuchen wiedergegeben, da hier auch das Verhalten der Verbindungsmittel die Feuerwiderstandsdauer mitbestimmt.

Tabelle 7: Versuchsergebnisse - Einteilige Stützen aus Vollholz

Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$
	min
V 14 A	23
V 14 B	20
V 14 C	34 <sup>1)</sup>
V 14 D	26 <sup>1)</sup>

Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$
	min
V 16 A	35
V 16 B	31
V 20 A	23
V 20 B	38

Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$
	min
V 20 C	38
V 20 D	25
V 24 A	34
V 24 B	31

1) Belastungsgrad  $\frac{\text{vorh } P}{\text{zul } P_{1965}} = 0,5$



Tabelle 8: Versuchsergebnisse - Einteilige Stützen aus Brettschichtholz

Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$ min	Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$ min	Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$ min
R 12/16 A	31	H 14/30 C	53 <sup>1)</sup>	H 20 B	43
R 12/16 B	30	H 14/40	43	H 20 C	60 <sup>1)</sup>
H 12/16 A	35	R 15 A	26	H 20 D	52 <sup>1)</sup>
H 12/16 B	34	R 15 B	27	H 20/40 A	65
H 12/30	43	H 15 A	31	H 20/40 B	74
H 12/46 A	38	H 15 B	30	H 24 A	60
H 12/46 B	41	R 16	30	H 24 B	56
R 14 A	29	H 16 A	31	H 26 A	62
R 14 B	21	H 16 B	37	H 26 B	62
R 14 C	36 <sup>1)</sup>	R 16/30	58 <sup>1)</sup>	R 27 A	57 <sup>3)</sup>
R 14 D	29 <sup>2)</sup>	H 16/30 A	40	R 27 B	54 <sup>3)</sup>
H 14 A	26	H 16/30 B	52	R 27 C	76
H 14 B	27	H 16/30 C	45	H 27 A	59 <sup>3)</sup>
H 14 C	43 <sup>1)</sup>	H 16/30 D	57 <sup>1)</sup>	H 27 B	56 <sup>3)</sup>
H 14 D	34 <sup>2)</sup>	R 20 A	34	H 27 C	71
H 14/24 A	35	R 20 B	48	H 28 A	59 <sup>3)</sup>
H 14/24 B	32	R 20 C	64 <sup>1)</sup>	H 28 B	67 <sup>3)</sup>
H 14/30 A	39	R 20 D	61 <sup>1)</sup>	H 40	114
H 14/30 B	59 <sup>1)</sup>	H 20 A	42		

1) Belastungsgrad  $\frac{\text{vorh } P}{\text{zul } P_{1965}} = 0,5$

2) Belastungsgrad  $\frac{\text{vorh } P}{\text{zul } P_{1965}} = 0,75$

3) Fehlerhafte Verleimung an den Stirnflächen der gestoßenen Lamellen (vgl. Abb. 3)



Tabelle 9: Versuchsergebnisse - Mehrteilige Stützen aus Vollholz

Bezeichnung	Feuerwiderstandsdauer $t_F$ min
2x 8/16 A	28
2x 8/16 B	32
2x 13/26	47
2x[8/16+4/26]	30

Abb. 3:

Probestütze H 28 B - Beispiel für die fehlerhafte Verleimung an den Stirnflächen der gestoßenen Lamellen (vgl. Fußnote zu Tabelle 8)

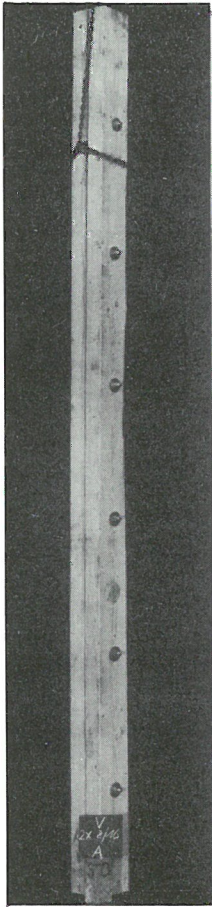


Abb. 4

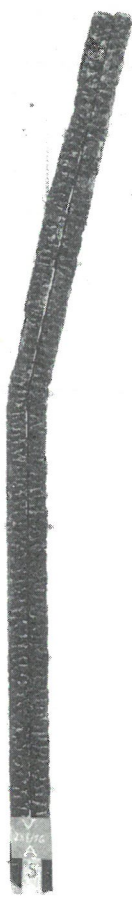


Abb. 5



Abb. 6



Abb. 7



Abb. 8

Abb. 4 bis 8: Probestütze 2 x 8/16 A vor und nach dem Brandversuch



Abb. 9



Abb. 10



Abb. 11



Abb. 12

Abb. 9 bis 12: Probestütze 2 x 8/16 B nach dem Brandversuch



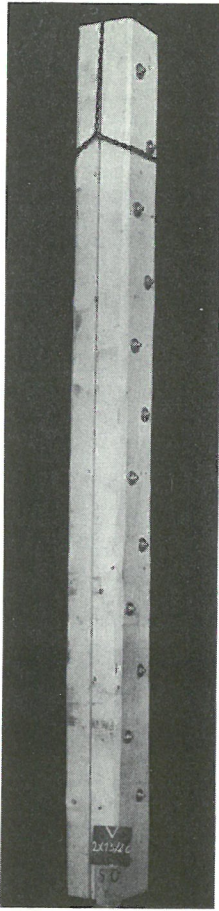


Abb. 13

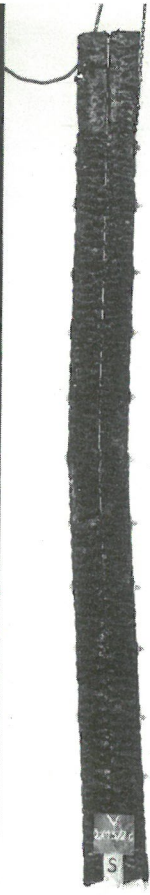


Abb. 14

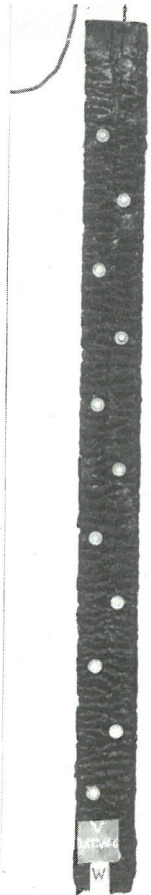


Abb. 15



Abb. 16

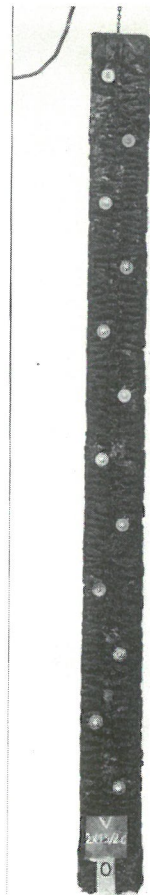


Abb. 17

Abb. 13 bis 17: Probestütze 2 x 13/26 vor und nach dem Brandversuch

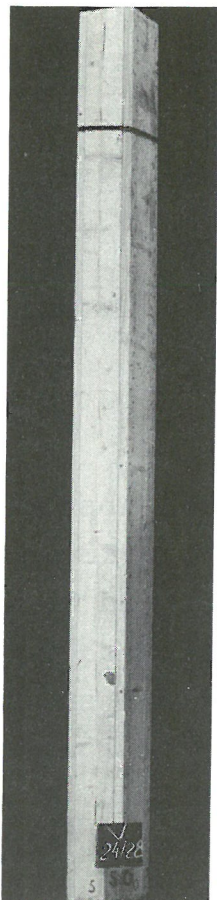


Abb. 18

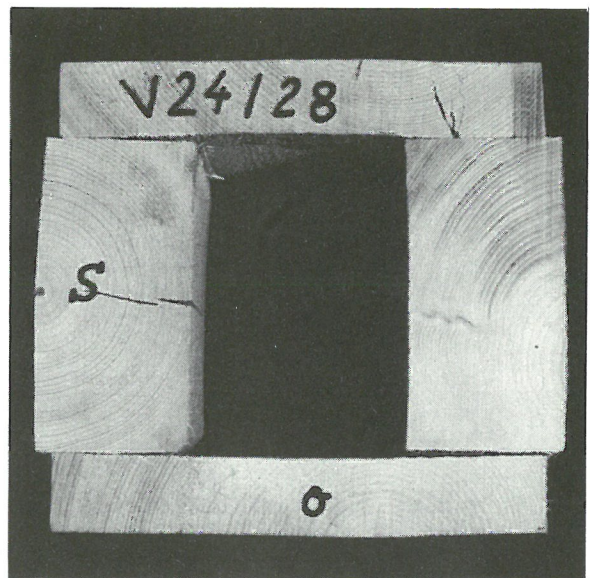


Abb. 19

Abb. 18 und 19: Probestütze 2 x [8/16 + 4/26] vor dem Brandversuch

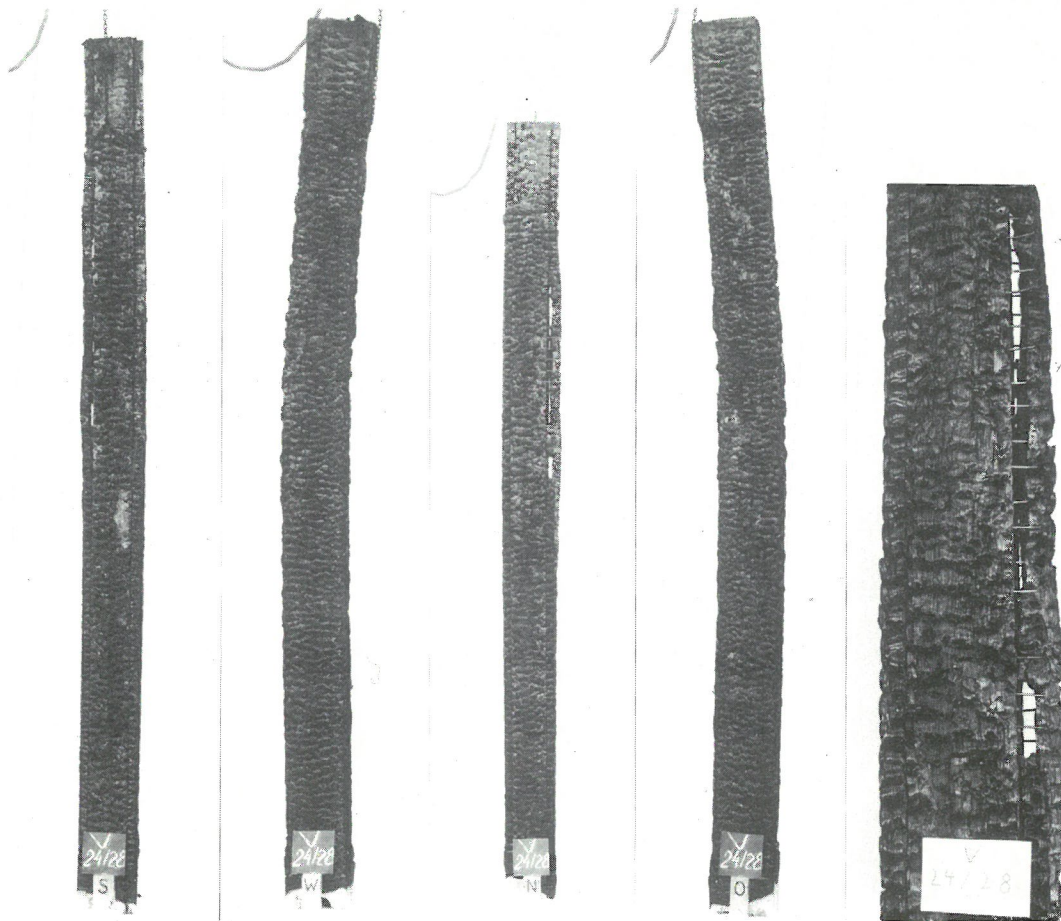


Abb. 20

Abb. 21

Abb. 22

Abb. 23

Abb. 24

Abb. 20 bis 24: Probestütze 2 x [8/16 + 4/26] nach dem Brandversuch

#### 4.2. Abbrand

Die Konturkurve des Querschnitts der nach Abschn. 3.2 ermittelten Restquerschnitte wurde in Polarkoordinaten dargestellt und hieraus der mittlere Abbrand  $a_{\perp}$  in Richtung der ursprünglichen Hauptträgheitsachsen sowie die Restquerschnittsfläche  $F_R$  mit einem speziellen Rechenverfahren für geschlossene Kurven in Polarkoordinaten mit einem Elektronenrechner bestimmt. Beide Werte sind in Abhängigkeit von der Zeitdauer  $t$  der Feuerbeanspruchung in Tabelle 10 angegeben.



Tabelle 10: Abbrand  $a_{\perp}$  und Restquerschnittsfläche  $F_R$

Reihe	Zeitdauer t der Feuerbeanspruchung	Mittlerer, Abbrand $a_{\perp}$ 1)	Restquerschnittsfläche $F_R$
	min	cm	cm <sup>2</sup>
R 12/16	10	0,51	159,9
	20	1,08	129,4
	30	1,84	96,0
	40	2,28	74,2
H 12/46	10	0,54	471,0
	30	1,96	330,3
H 16	10	0,62	218,3
	30	2,02	136,1
H 16/30	30	1,80	317,4
	50	3,60	205,5
	70	4,70	132,1
R 20	40	2,42	214,4
H 28	80	5,17	276,9

1) Gemessen in Richtung der ursprünglichen Hauptträgheitsachsen

## 5. Diskussion und Auswertung der Versuchsergebnisse

### 5.1. Feuerwiderstandsdauer

#### 5.1.1. Streuung der Versuchsergebnisse

Vergleicht man die Ergebnisse vergleichbarer Probekörper, d.h. von Stützen gleicher Querschnittsabmessungen und Belastung, so zeigen sich zum Teil erhebliche Differenzen. Diese Differenzen sind sowohl auf die unterschiedlichen Eigenschaften des inhomogenen Werkstoffes Holz als auch auf die Versuchsausführung zurückzuführen. Für die Versuchsausführung in dem Prüfstand nach Abb. 1 ist mit der statistischen Sicherheit 99,73 % zu erwarten, daß die Differenz zweier unabhängig voneinander ermittelten Ergebnisse kleiner als 13 Minuten ist. Da die Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen für brett-schichtverleimte Stützen (Holz-Güteklasse I) unterhalb des o.a. Erwartungswertes liegen, können die unterschiedlichen

Versuchsergebnisse vorwiegend durch Unterschiede in der Versuchsausführung erklärt werden. Somit scheint der biologische Aufbau des Holzes mit seinen naturgemäßen Schwankungen der Kennwerte bei brettschichtverleimten Stützen keinen wesentlichen Einfluß auf die Feuerwiderstandsdauer zu haben. Die erheblich größeren Differenzen bei den Vollholz-Stützen (Gütekategorie II) dagegen deuten darauf hin, daß die Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen bei diesen Probekörpern auch von den unterschiedlichen Materialeigenschaften beeinflußt werden.

#### 5.1.2. Statische Bedingungen

Die mittige Belastung der Probekörper während der Versuche wurde nach DIN 1052 (Ausgabe 1965) [6] (Einteilige Stützen) bzw. (Ausgabe 1969) [7] (Mehrteilige Stützen) unter Zugrundelegung einer Knicklänge von  $s_K = s = 3,65$  m ermittelt. Wegen der nicht definierten Lagerungsbedingungen im Stützenprüfstand nach Abb. 1 stellt die o.a. Knicklänge  $s_K$  (2. Eulerfall) lediglich eine Annahme dar. Diese Annahme entspricht der bei der Prüfung von Stahlbetonstützen geübten Praxis sowie der Forderung der DIN 1052 hinsichtlich der zu wählenden Knicklänge  $s_K$  bei Druckstäben, die an den Enden gegen seitliches Ausweichen gesichert sind. In Wirklichkeit ist folgende Situation vorhanden (vgl. Abb. 1):

Während der Prüfung wird die auf dem Kolben einer Druckpresse stehende Stütze mit ihrer oberen Stirnfläche gegen den Querträger der Belastungskonstruktion gedrückt, wodurch eine teilweise - vom Querschnitt abhängige - Einspannung erreicht wird. Unten lagert die Stütze unbefestigt auf einer Stahlplatte, die auf dem Kolben des Druckzylinders liegt. Durch das unvermeidbare Spiel zwischen Kolben und Zylinder und den geringen Kolbendurchmesser von 17 cm kann die Stütze am Fußpunkt nahezu als gelenkig gelagert angesehen werden.



Aufgrund der oben geschilderten Einbausituation muß angenommen werden, daß die wirkliche Knicklänge  $s_K$  der untersuchten Holzstützen kleiner als 3,65 m war, d.h. die Bemessung aufgrund der wirklichen Knicklänge hätte eine höhere Last als nach den Tabellen 4 bis 6 ergeben. Andererseits sind auch die wirklichen Knicklängen  $s_K$  in der Praxis kleiner als die angenommenen, da sich reine Gelenke praktisch nicht verwirklichen lassen. Aus diesem Grund sind die bei der Prüfung angewendeten Bemessungsgrundlagen als hinreichend gerechtfertigt für die brandschutztechnische Klassifizierung von Holzstützen anzusehen.

### 5.1.3. Einteilige Stützen aus Vollholz

Die Ergebnisse der Vollholzstützen lassen keinen Zusammenhang zwischen den Querschnittsabmessungen und der Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  erkennen und entziehen sich daher einer weiteren systematischen Auswertung. Besonders deutlich geht das aus den Ergebnissen innerhalb der Reihe V 20 sowie aus einem Vergleich der Feuerwiderstandsdauern  $t_F$  der Reihe V 16 mit denen der Reihe V 20 hervor (vgl. Tabelle 7). Hierfür sind insbesondere zwei Gründe maßgebend:

1. Die zufallsbedingte Entstehung von Schwindrissen während der Lagerzeit, die teilweise bis zur Querschnittsmitte reichten und demzufolge das Tragverhalten der Probestützen stark beeinflussten (vgl. Abb. 25).



Abb. 25: Probestütze V 20 D  
- Beispiel für die  
Schwindrißbildung  
bei Vollholz-Stützen

2. Ein Teil der geprüften Vollhölzer lag an der unteren Grenze der Güteklasse II nach DIN 4074. Das Ergebnis der Stütze V 20 D, die im Hinblick auf Güteeigenschaften, die eine Einordnung in die Güteklasse II gerade noch gestatten, ausgewählt worden war, scheint diese Vermutung zu bestätigen (vgl. auch [8]).

#### 5.1.4. Einteilige, brettschichtverleimte Stützen

Die Ergebnisse der Brandversuche an einteiligen Stützen aus Brettschichtholz zeigen einen systematischen Zusammenhang zwischen den Querschnittsabmessungen und der Feuerwiderstandsdauer  $t_F$ . Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß brettschichtverleimte Bauteile wesentlich gleichmäßigere Materialeigenschaften aufweisen als naturgewachsene Vollhölzer (vgl. Abschnitt 5.1.1). Aus den Ergebnissen können insbesondere folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

1. Eine eindeutige Abhängigkeit der erzielten Feuerwiderstandsdauern  $t_F$  von den verwendeten Leimsorten konnte nicht festgestellt werden. Diese Aussage deckt sich auch mit den Angaben in [8], während die Untersuchungen nach [9] ein etwas besseres Brandverhalten der mit Resorzinharz verleimten Probestützen zeigten.
2. Bei quadratischen Querschnitten führt eine Vergrößerung der Querschnittsfläche  $F$  zu einer längeren Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  (vgl. auch [9]).
3. Die Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Stützen mit konstanter Mindest-Kantenlänge  $b$  wird mit steigendem Seitenverhältnis  $\frac{h}{b}$ , d.h. mit steigender Querschnittsfläche  $F$  länger (vgl. Reihen 12/16, 12/30 und 12/46 sowie 14/24, 14/30 und 14/40). Andererseits deuten die Ergebnisse der Reihen 12/30 und 12/46 darauf hin, daß eine Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  über das Seitenverhältnis  $\frac{h}{b} = 4$  hinaus kaum mehr zu erreichen ist.



4. Eine Verminderung der Belastung führt zu einer längeren Feuerwiderstandsdauer  $t_F$ . In [9] ist dafür die Gleichung

$$\bar{t}_F^k = \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot (\bar{t}_F)_{k=1,0} \quad k \hat{=} \text{Belastungsgrad } \frac{\text{vorh } P}{\text{zul } P} \quad (1)$$

angegeben, die im folgenden mit den Ergebnissen der Tabelle 8 überprüft wird (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Feuerwiderstandsdauer Brett-schichtverleimter Stützen in Abhängigkeit vom Belastungsgrad nach [9] und nach Versuch

Reihe	Belastungsgrad k	Mittlere Feuerwiderstandsdauer in min		
		$\bar{t}_F^k = 1,00$	$\bar{t}_F^k$ nach Gleichung (1)	$\bar{t}_F^k$ nach Tabelle 8
14	0,50	26	37	40
	0,75	26	30	32
14/30	0,50	39	55	56
16/30	0,50	46	65	58
20	0,50	42	60	59

Im Hinblick auf eine Aufnahme in Blatt 4 der DIN 4102 [4] führt eine Auswertung gemäß DIN 4102, Blatt 2 [5] unter Berücksichtigung aller Versuchsergebnisse und des Abschnittes 6.4 zu der in Tabelle 12 vorgeschlagenen Einreihung.

Tabelle 12: Vorschlag für eine Einreihung in Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102  
Einteilige Stützen aus Brett-schichtholz  
Nadelholz, Güteklasse I DIN 4074  
Brett-schichtdicke: 2 bis 3 cm  
Verbindungs-mittel: Resorzinharz- und Harnstoffharz-Leim

Feuerwiderstands- klasse	Belastungsgrad $\frac{\text{vorh } P}{\text{zul } P}$	Kleinste Kantenlänge b in cm	Schlankeitsgrad $\lambda$
F 30	1	≅ 16	≅ 80
	0,5	≅ 14	≅ 90
F 60	1	≅ 26	≅ 50
	0,5	≅ 24	≅ 50

### 5.1.5. Mehrteilige Stützen

Im Gegensatz zu den einteiligen Stützen, deren Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  hauptsächlich von der Verringerung des tragenden Querschnitts infolge des Abbrandes bestimmt wird, ist die Tragfähigkeit mehrteiliger Stützen unter Feuerbeanspruchung auch von dem Brandverhalten der Verbindungsteile und Verbindungsmittel abhängig. Im Brandfall wird die Verdübelung der Einzelteile durch den Abbrand der Verbindungsteile (vgl. Abb. 20 bis 24) und die Erwärmung der Verbindungsmittel (vgl. Abb. 5, 7, 9 und 11) teilweise aufgehoben und somit die Tragfähigkeit des Restquerschnitts weiter herabgesetzt.

Wegen der geringen Anzahl der Versuche ist eine systematische Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf Blatt 4 der DIN 4102 [4] nicht möglich.

### 5.2. Ermittlung der Abbrandfunktion

Infolge der zweiseitigen Feuerbeanspruchung im Bereich der Ecken ist die Verkohlungstiefe dort größer als in Richtung der Hauptträgheitsachsen. Um diese Tatsache zu berücksichtigen, wurde für die Bestimmung der Abbrandfunktion  $a = f(t)$  folgendes Verfahren gewählt:

Unter der Voraussetzung eines gleichmäßigen, vom Querschnitt unabhängigen Abbrandes  $a$ , d.h.  $h_0 - h_i = b_0 - b_i$ , wurde die nach Abschn. 4.2 ermittelte Restquerschnittsfläche  $F_R$  in ein flächengleiches Quadrat bzw. Rechteck mit den ideellen Abmessungen  $b_i \cdot h_i$  umgerechnet. Hierbei sind  $h_0$  und  $b_0$  die ursprünglichen Kantenlängen. Mit den bekannten Größen  $h_0$ ,  $b_0$ ,  $h_i$  und  $b_i$  berechnet sich der Abbrand  $a$  zu

$$a = \frac{h_0 - h_i}{2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{b_0 - b_i}{2} \quad (2)$$

Bei diesem Verfahren wird der Eckenabbrand nur hinsichtlich der Querschnittsfläche berücksichtigt, im Hinblick auf die Geometrie des Querschnitts bleibt er unberücksichtigt. Hieraus ergibt sich für das aus den ideellen

Abmessungen  $b_i$  und  $h_i$  berechnete, ideale Trägheitsmoment  $\min J_i$  eine Abweichung von maximal 5 % gegenüber dem vorhandenen Trägheitsmoment  $\min J_R$  des Restquerschnitts, d.h. der bei der Annahme einer ideellen Querschnittsform (Quadrat bzw. Rechteck) auftretende Fehler ist gering.

In Abb. 26 ist der nach dem o.a. Verfahren ermittelte Abbrand  $a$  als Funktion der Branddauer  $t$  dargestellt. Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet mit  $t$  in min

$$a = 0,0695 t - 0,108 \text{ [cm]}, \quad (3)$$

d.h. die Abbrandgeschwindigkeit beträgt rund  $0,07 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  (vgl. Abschn. 6.1.2). Zu einem geringfügig abweichenden Ergebnis gelangt man, wenn man die Gleichung (3) unter Zugrundelegung der Werte  $a_i$  der Tabelle 10 ermittelt.

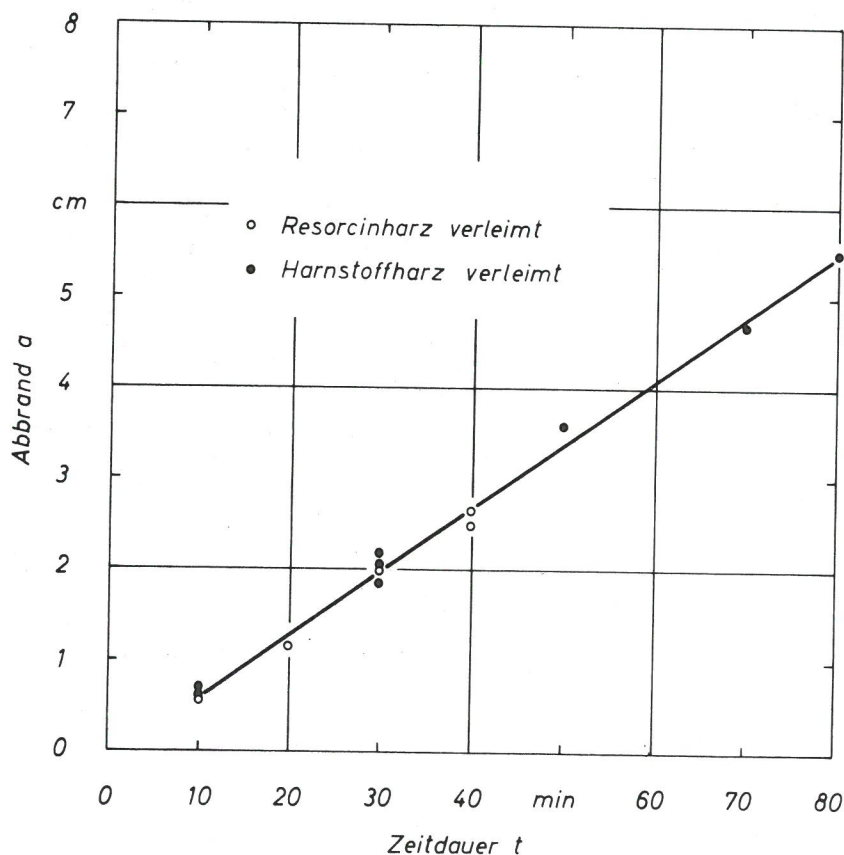


Abb. 26: Abbrand  $a$  in Abhängigkeit von der Zeitdauer  $t$  der Feuerbeanspruchung nach Abb. 2



## 6. Rechnerische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen, brettschichtverleimten Stützen unter Druckbeanspruchung

### 6.1. Verhalten von Holzbauteilen unter Wärmebeanspruchung

#### 6.1.1. Entzündung

Unter Feuerbeanspruchung entzünden sich die aus dem Holz freigesetzten Gase an der Bauteiloberfläche innerhalb einiger Minuten. Die Zeitdauer bis zur Entzündung ist in erster Linie von der Temperatur, der Holzfeuchtigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Bei den Brandversuchen an Holzstützen wurde eine Entflammung der Oberflächen nach etwa 2,5 Minuten festgestellt; in diesem Zeitpunkt lag die gemessene Brandraumtemperatur zwischen  $450^{\circ}\text{C}$  und  $500^{\circ}\text{C}$ .

#### 6.1.2. Verkohlung

Mit fortschreitender Pyrolyse bildet sich an der Oberfläche eine Holzkohleschicht, die später verascht. Diese Holzkohleschicht besitzt eine geringe Temperaturleitfähigkeit und verhindert den Sauerstoffzutritt zum unzerstörten Holz, so daß die Temperaturen in der Grenzzone zwischen verkohltem und unverbranntem Holz relativ niedrig sind. Über die Geschwindigkeit, mit der sich diese Holzkohleschicht unter einer der Temperatur-Zeitkurve der Abb. 2 ähnlichen Feuerbeanspruchung bildet, liegen Angaben verschiedener Verfasser [10] bis [13] vor. Danach liegt die unter der Annahme eines linearen Abbrandes für eine Branddauer von 30 Minuten ermittelte, mittlere Abbrandgeschwindigkeit für Nadelholz zwischen  $0,056$  und  $0,077\text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Hierbei ist die Zeitdauer bis zur Entzündung nicht berücksichtigt, d.h. die wirkliche Abbrandgeschwindigkeit ist etwas größer. Der in Abschn. 5.2 ermittelte Wert ist also nahezu ein Mittelwert des in der Literatur angegebenen Bereiches. Nur bei zwei Autoren [10] und [12] ist der Abbrand als Funktion der Branddauer dargestellt, wobei die Aussagen sich widersprechen. [10] weist den nahezu linearen Abbrand bis zu einer Branddauer von 45 Minuten nach und erklärt die konstante Abbrandgeschwindigkeit mit den beiden, in ihren Wirkungen gegenläu-

figen, Einflüssen, nämlich die nach Abb. 2 steigende Brandraumtemperatur einerseits und die steigende Wärmedämmung der Holzoberflächen durch die sich bildende Holzkohleschicht andererseits. Nach [12] ist die Abbrandgeschwindigkeit dagegen nicht zeitunabhängig. Hier wird der Wert bis zu einer Branddauer von 60 Minuten ständig kleiner und steigt danach wieder an. Das Ansteigen der Abbrandgeschwindigkeit nach längerer Branddauer kann mit der Austrocknung des restlichen Holzquerschnittes und einem möglichen Wärmestau im Innern erklärt werden. Von [10] wird ferner die Temperaturabhängigkeit des Holzabbrandes nachgewiesen.

### 6.1.3. Temperaturen und Feuchtigkeiten im brandbeanspruchten Holzquerschnitt - - - - -

Aus den bereits oben erwähnten Gründen sind die Temperaturen in der Grenzschicht zwischen verkohltem und unzerstörtem Holz niedrig. Nach [14] beträgt diese Temperatur bei einer Branddauer bis zu 30 Minuten maximal  $220^{\circ}$  C und nach [11] bei einer Branddauer bis zu 70 Minuten sogar nur  $120^{\circ}$  C. Allerdings gelten diese Aussagen nicht mehr für kleine Querschnitte mit langer Feuerbeanspruchung, da nach der Verdampfung der Feuchtigkeit im Innern des Holzquerschnittes die Temperaturen dort und somit auch in der Übergangsschicht ansteigen.

Während der Brandbeanspruchung eines Holzquerschnittes erfolgt eine Wanderung der Feuchtigkeit in das Innere, d.h. die Austrocknung in den Randzonen des unzerstörten Holzes ist mit einem Feuchtigkeitsanstieg im Kern verbunden [16]. Die vorhandene - während der Feuerbeanspruchung noch ansteigende - Feuchtigkeit im unverbrannten Holzquerschnitt, die geringe Temperaturleitfähigkeit des Holzes sowie die niedrige Temperatur in der Grenzschicht zwischen verkohltem und unzerstörtem Holz führen zu einer geringen Wärmebeanspruchung des Restquerschnittes. Beispielsweise beträgt die Temperatur im Zentrum eines dreiseitig beflammt Holz balkens mit den ursprünglichen Abmessungen 14 cm x 42 cm bzw.



16 cm x 34 cm etwa 70° C (vgl. [12] bzw. [15]) nach einer sechzigminütigen Feuerbeanspruchung entsprechend Abb. 2.

#### 6.1.4. Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit - - - - -

Der Elastizitätsmodul  $E$  fällt mit steigender Temperatur und steigt mit sinkender Holzfeuchtigkeit. Für die Randzonen von wärmebeanspruchten Holzbauteilen bedeutet das, daß hier aufgrund der vorhandenen Temperaturen gegenläufige Wirkungen auftreten können. Bei einer Temperaturbeanspruchung der Randzonen von etwa 100° C (vgl. Abschn. 6.1.3) führt diese Temperatur nach [16] bei Nadelholz zu einem Abfall um 20 bis 30 % des ursprünglichen Elastizitätsmoduls  $E$ . Bei Temperaturen über 100° C findet eine gleichzeitige Austrocknung der Randbereiche statt, so daß nach [16] der Elastizitätsmodul  $E$  wieder ansteigt, d.h. beide Wirkungen heben sich teilweise auf. Für den Restquerschnitt bretttschichtverleimter Balken aus Nadelholz hat [11] nach einer Branddauer von 30 Minuten einen aus beiden Einflüssen resultierenden Abfall des Elastizitätsmoduls  $E$  von etwa 10 % ermittelt.

Ähnlich sind die Zusammenhänge zwischen der Holzdruckfestigkeit  $\sigma_D$  und der Temperatur bzw. der Feuchtigkeit. Allerdings beträgt hier der temperaturbedingte Abfall der Druckfestigkeit  $\sigma_D$  von Nadelholz im Bereich von 20 bis 100° C etwa 50 % (vgl. [13] und [16]) und wird durch eine gleichzeitige Austrocknung des Holzes nicht in dem gleichen Maße wie beim Elastizitätsmodul  $E$  kompensiert.

#### 6.2. Grundlagen von Rechenverfahren

Die genaue Bestimmung der für das Tragverhalten maßgebenden Materialkennwerte im unzerstörten Teil eines brandbeanspruchten Holzquerschnittes ist insbesondere wegen der unbekanntenen, zeit- und querschnittsabhängigen Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung nicht mög-



lich (vgl. Abschn. 6.1.4). Die - vorwiegend in den Randbereichen eines Querschnitts stattfindende - temperatur- und feuchtigkeitsbedingte Änderung des Elastizitätsmoduls  $E$  und der Druckfestigkeit  $\sigma_D$  im Brandfall kann nun beispielsweise dadurch berücksichtigt werden, indem für die Materialkennwerte des unverbrannten Holzquerschnittes einer bestimmten Holz-Güteklasse jene der nächst niedrigeren Holz-Güteklasse zugrundegelegt werden. Unter dieser Voraussetzung hängt die Feuerwiderstandsdauer von einteiligen Stützen unter Druckbeanspruchung allein von der Verkohlungstiefe ab. Mit bekannter Abbrandfunktion, das ist der zeit- und querschnittsabhängige Abbrand eines Holzbauteiles unter bestimmten thermischen Bedingungen, läßt sich daher ein Verfahren zur rechnerischen Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Holzstützen angeben. Wegen der gleichmäßigen Materialeigenschaften (vgl. Abschn. 5.1.4) eignen sich hierzu vornehmlich Stützen aus Brettschichtholz.

Eine Stütze mit der ursprünglichen Querschnittsfläche  $F_0$ , dem minimalen Trägheitsmoment  $\min J_0$ , der Knicklänge  $s_K$  und der Last  $P$  habe nach einer Branddauer  $t$  die Querschnittsfläche  $F$  und das minimale Trägheitsmoment  $\min J$ . In diesem Zeitpunkt beträgt dann die Druckspannung

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

und der maximale Schlankheitsgrad

$$\max \lambda = s_K \sqrt{\frac{F}{\min J}} .$$

Unter der Voraussetzung eines gleichmäßigen, nicht von der Verleimung beeinflussten Abbrandes wird der Querschnitt während des Brandes stetig kleiner und damit  $\sigma$  und  $\max \lambda$  ständig größer. Eine Spannungssteigerung und eine Vergrößerung des Schlankheitsgrades im Brandfall kann ohne Knickgefahr jedoch nur bis zum Erreichen einer vorgegebenen theoretischen Knickspannung erfolgen. Mit den in diesem Zeitpunkt vorhandenen kritischen

Querschnittswerten  $F_{kr}$  und  $\min J_{kr}$  ist bei bekannter Abbrandfunktion eine Berechnung der Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Holzstützen möglich.

### 6.3. Erläuterung eines Rechenverfahrens an Stützen mit Rechteckquerschnitt

Das in Abschn. 6.2 beschriebene Verfahren wird im folgenden an Holzstützen mit Rechteckquerschnitt näher erläutert.

Nach einer Branddauer  $t$  habe die Stütze - ohne Berücksichtigung der wirklichen Querschnittsform infolge des Eckenabbrandes - die ideellen Abmessungen  $b_i \cdot h_i$ , eine Knicklänge  $s_K$  und trage die Last  $P$ . Aus den Beziehungen

$$\sigma_i = \frac{P}{b_i \cdot h_i} \quad \text{und} \quad \max \lambda_i = \frac{s_K}{b_i} \sqrt{12}$$

erhält man dann

$$\sigma_i = \frac{P \cdot \max \lambda_i}{s_K \cdot \sqrt{12} \cdot h_i}$$

und unter der Voraussetzung eines gleichmäßigen, querschnittsunabhängigen Abbrandes (vgl. Abschn. 5.2 und Abb. 26) mit

$$2a = b_0 - b_i = h_0 - h_i,$$

wobei  $a$  die Verkohlungstiefe und  $b_0, h_0$  die ursprünglichen Kantenlängen der Stütze sind, die Gleichung

$$\sigma_i = \frac{P \cdot \max \lambda_i^2}{12 s_K^2 + \max \lambda_i \cdot s_K \cdot \sqrt{12} \cdot b_0 \left( \frac{h_0}{b_0} - 1 \right)} \quad (4)$$

In dieser Gleichung sind  $P, s_K, b_0$  und  $\frac{h_0}{b_0}$  konstante Größen für eine gegebene Stütze. Im Falle eines quadratischen Querschnittes ( $\frac{h_0}{b_0} = 1$ ) nimmt (4) die Form

$$\sigma_i = \frac{P \cdot \max \lambda_i^2}{12 s_K^2} \quad (5)$$

an. Im Brandfall wird  $\max \lambda_i$  stetig größer, so daß auch  $\sigma$  nach den o.a. Gleichungen ständig größer wird. In den Abb. 27 bis 30 sind Kurvenscharen mit jeweils einer der Größen  $P$ ,  $s_K$ ,  $\frac{h_0}{b_0}$ ,  $b_0$  als Parameter im  $\sigma$ ,  $\lambda_i$ -Diagramm dargestellt. Die theoretische Grenzlinie des Knickbereiches werde nun im gesamten  $\lambda$ -Bereich durch die Gleichung

$$\sigma_K = \frac{1}{2} \left[ \sigma_D + \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} (1 + \epsilon) \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sigma_D + \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} (1 + \epsilon) \right]^2 - \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \cdot \sigma_D} \quad (6)$$

festgelegt (vgl. [17]). Entsprechend den Ausführungen in Abschn. 6.2 werden für Stützen der Holz-Güteklasse I die Materialkennwerte der Holz-Güteklasse II in (6) eingesetzt, d.h.  $\sigma_D$  (Druckfestigkeit) =  $298 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $E$  (Elastizitätsmodul) =  $99\,000 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$  und  $\epsilon$  (Außer-mittigkeitsgrad) =  $0,1 + \frac{\lambda}{125}$ . Diese Gleichung bildet die Grundlage der z.Z. gültigen DIN 1052 [7] für die Bemessung von mittig gedrückten Holzstäben im Bereich  $\lambda < 100$  und ist ebenfalls in den Abb. 27 bis 30 dar-

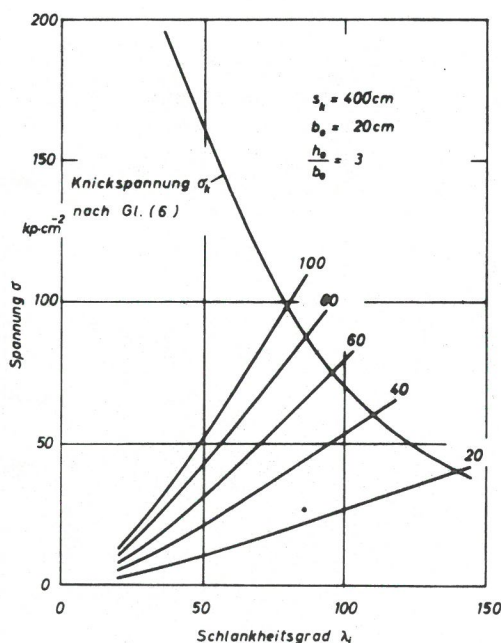


Abb. 27: Zunahme der Druckspannung  $\sigma_i$  im Stützenquerschnitt während des Brandes in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad  $\lambda_i$  bei verschiedenen Werten von  $P$  (Last in  $10^3 \cdot \text{kp}$ )



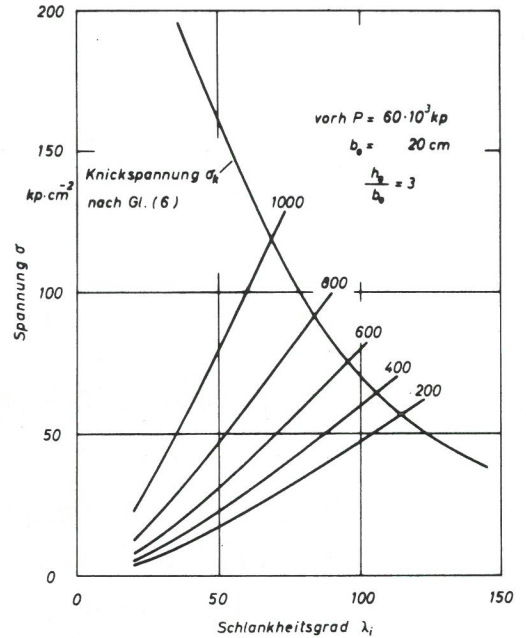
gestellt. Sie befindet sich ferner in guter Übereinstimmung mit dem Vorschlag von [13], nach dem für die Knickspannung  $\sigma_K$  der Wert

$$\sigma_K = 2 \cdot \text{zul } \sigma_K = 2 \cdot \frac{\text{zul } \sigma_D}{\omega} = \frac{220}{\omega} \quad (7)$$

empfohlen wird.

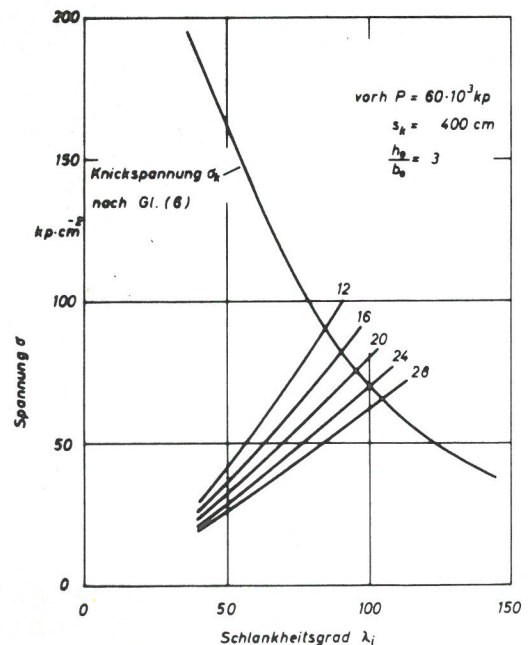
**Abb. 28:**

Zunahme der Druckspannung  $\sigma_i$  im Stützenquerschnitt während des Brandes in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad  $\lambda_i$  bei verschiedenen Werten von  $s_K$  (Knicklänge in cm)



**Abb. 29:**

Zunahme der Druckspannung  $\sigma_i$  im Stützenquerschnitt während des Brandes in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad  $\lambda_i$  bei verschiedenen Werten von  $b_0$  (kleinste Kantenlänge in cm)



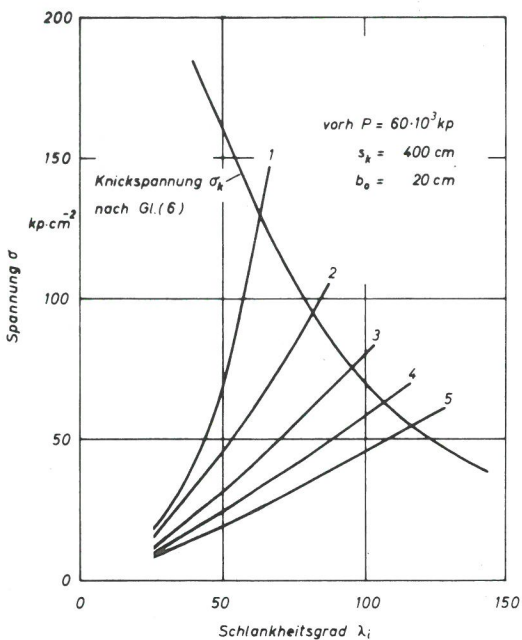


Abb. 30:

Zunahme der Druckspannung  $\sigma_i$  im Stützenquerschnitt während des Brandes in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad  $\lambda_i$  bei verschiedenen Werten von  $\frac{h_0}{b_0}$  (Seitenverhältnis)

Zu einem Schnittpunkt der Kurven (4) bzw. (5) und (6) gehört die kritische Kantenlänge  $b_{kr}$ , die sich aus der Beziehung

$$b_{kr} = \frac{s_K}{\lambda_{kr}} \sqrt{12}$$

errechnet. Mit dieser Größe kann jetzt mit bekannter Abbrand-Zeit-Funktion eine Berechnung des Tragverhaltens von Holzstützen unter Brandbeanspruchung ausgeführt werden.

Hat eine Stütze mit den ursprünglichen Abmessungen  $b_0 \cdot h_0$  im Brand die kritische Kantenlänge  $b_{kr}$  erreicht, dann gilt für den Abbrand  $a_{kr}$  in diesem Zeitpunkt

$$a_{kr} = \frac{1}{2} (b_0 - b_{kr}) \quad (8)$$

Mit der nach Abschn. 5.2 ermittelten Abbrand-Zeit-Funktion nach Gleichung (3) läßt sich die Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  in Abhängigkeit von der kritischen Kantenlänge  $b_{kr}$  angeben mit  $a_{kr}$ ,  $b_0$  und  $b_{kr}$  in cm:

$$t_F = \frac{a_{kr} + 0,108}{0,0695} = 7,20 (b_0 - b_{kr}) + 1,56 \quad [\text{min}] \quad (9)$$

#### 6.4. Anwendung des Rechenverfahrens bei Holzstützen mit Rechteckquerschnitt

Zur Demonstration der Aussagemöglichkeiten des in Abschnitt 6.3 erläuterten Verfahrens ist in den Abb. 31 bis 35 beispielsweise die berechnete Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Holzstützen in Abhängigkeit von der Last  $P$ , der Knicklänge  $s_K$ , der kleinsten Kantenlänge  $b_0$  und dem Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$  dargestellt. Aus den Abb. 31 bis 35 können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

1. Bei Stützen mit gleichen Querschnittsabmessungen  $b_0 \cdot h_0$  und gleicher Knicklänge  $s_K$  führt eine Verminderung der Last  $P$  zu einer längeren Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  (vgl. Abb. 31). Die Versuche führten zum gleichen Ergebnis (vgl. Abschn. 5.1.4, Pkt. 4).

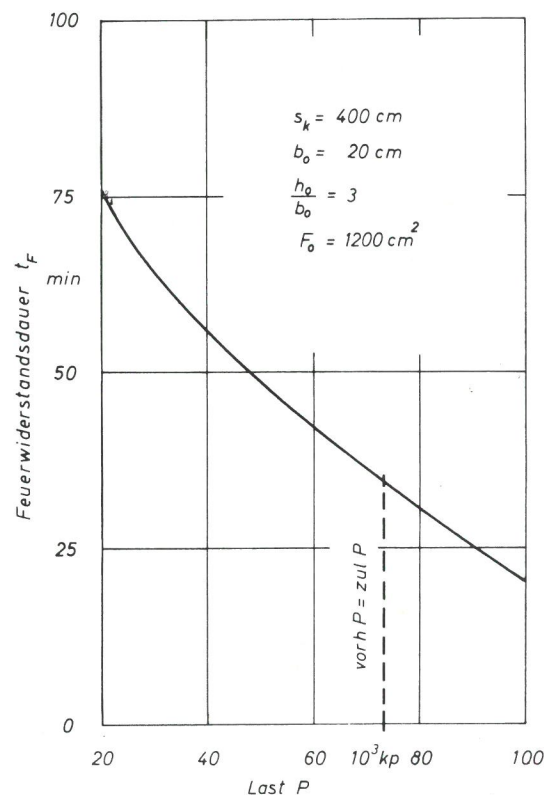


Abb. 31: Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  einer Holzstütze in Abhängigkeit von der Last  $P$

2. Bei gleichen Querschnittsabmessungen  $b_0 \cdot h_0$  und unter der rechnerisch zulässigen Last  $\text{zul } P$  nach DIN 1052 wird die Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  mit steigender Knicklänge  $s_K$  kürzer (vgl. Abb. 32).

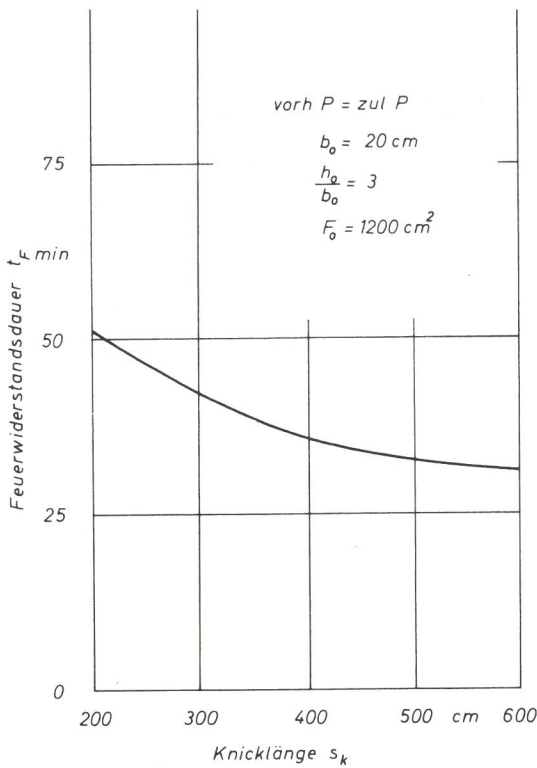


Abb. 32:

Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  einer Holzstütze in Abhängigkeit von der Knicklänge  $s_K$

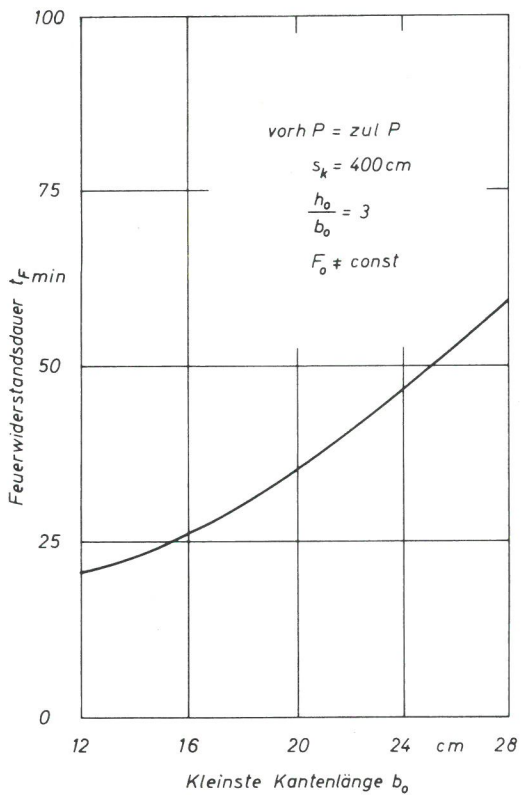


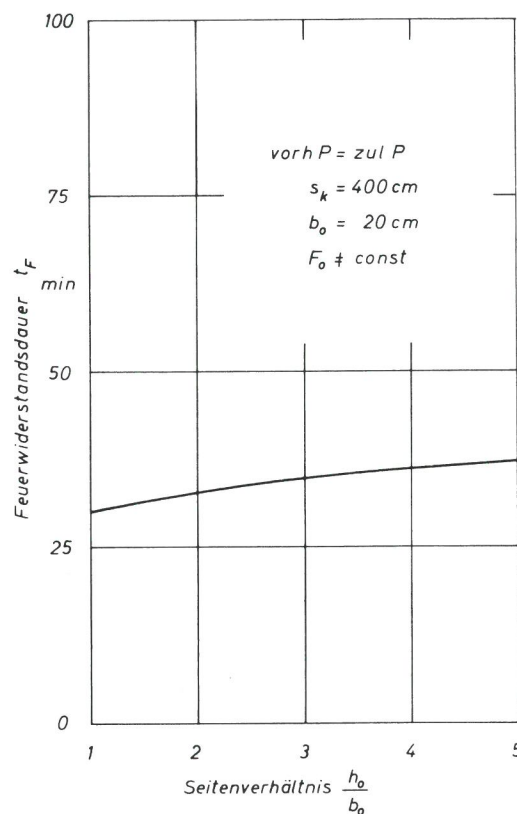
Abb. 33:

Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Holzstützen in Abhängigkeit von der kleinsten Kantenlänge  $b_0$  bei konstantem Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$

3. Bei Stützen mit gleichem Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$  und gleicher Knicklänge  $s_K$ , die mit der rechnerisch zulässigen Last  $\text{zul } P$  nach DIN 1052 belastet sind, führt eine Vergrößerung der kleinsten Kantenlänge  $b_0$ , d.h. eine Vergrößerung der Querschnittsfläche  $F_0$ , zu einer längeren Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  (vgl. Abb. 33). Dieses Ergebnis wird durch die Versuche an Stützen mit quadratischem Querschnitt bestätigt (vgl. 5.1.4, Pkt. 2).



4. Bei gleicher kleinster Kantenlänge  $b_0$ , gleicher Knicklänge  $s_K$  und unter der rechnerisch zulässigen Last  $zul P$  nach DIN 1052 wird die Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  mit steigendem Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$ , d.h. mit steigender Querschnittsfläche  $F_0$ , länger. Eine Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  über das Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0} = 5$  hinaus ist kaum noch zu erreichen, d.h. die Feuerwiderstandsdauer einer Holzstütze wird entscheidend von der kleinsten Kantenlänge  $b_0$  bestimmt (vgl. Abb. 34). Diese Tatsache wird ebenfalls durch die Versuchsergebnisse bestätigt (vgl. 5.1.4, Pkt. 3).



**Abb. 34:** Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Holzstützen in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$  bei konstanter Kantenlänge  $b$

5. Bei Stützen mit gleicher Querschnittsfläche  $F_0$  und gleichen Knicklängen  $s_K$ , die mit der rechnerisch zulässigen Last  $zul P$  nach DIN 1052 belastet sind, stellt ein quadratischer Querschnitt ( $\frac{h_0}{b_0} = 1$ ) hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer die optimale Ausnutzung dar (vgl. Abb. 35).



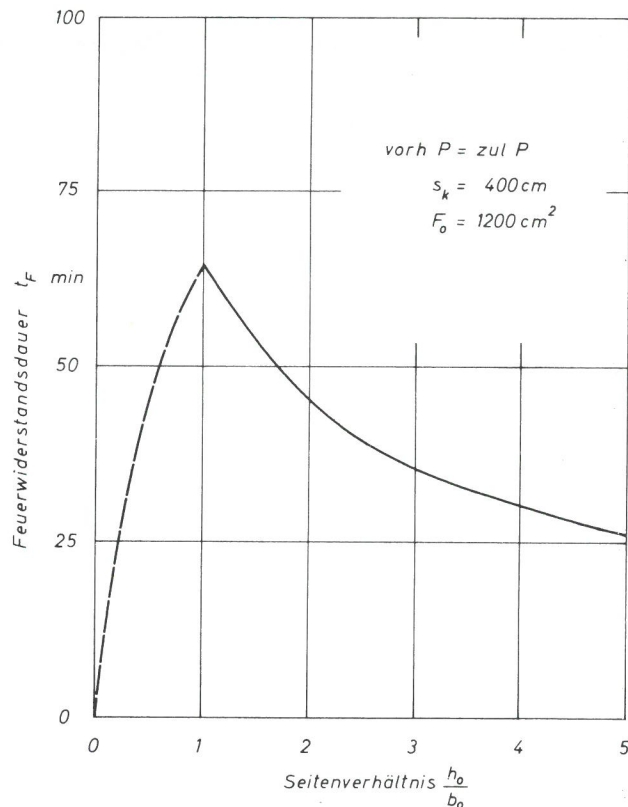


Abb. 35: Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  von Holzstützen in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis  $\frac{h_0}{b_0}$  bei konstanter Querschnittsfläche  $F_0$

### 6.5. Betrachtungen zur Wahl der Grenzkurve

Die Wahl der Gleichung (6) als kritische Grenzkurve soll anhand der Versuchsergebnisse der Tabelle 8 näher untersucht werden. Hierzu wurden mit Gleichung (9) und der im Brandversuch ermittelten Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  (vgl. Tabelle 8) der Abbrand  $a_{kr}$  jeder Probestütze und anschließend die ideellen Abmessungen  $b_i = b_0 - 2 a_{kr}$  im Zeitpunkt des Tragfähigkeitsverlustes berechnet. Die hieraus resultierende Spannung  $\sigma_i = \frac{P}{b_i \cdot h_i}$  und Schlankheitsgrad  $\lambda_i = \frac{s_K}{b_i} \sqrt{12}$  jeder Probestütze sind unter Zugrundelegung einer Knicklänge von  $s_K = s = 3,65 \text{ m}$  im  $\sigma, \lambda_i$ -Diagramm (Abb. 36) dargestellt, wobei jeder Punkt den Endzustand eines Probekörpers repräsentiert. Ferner ist die Kurve nach Gleichung (6) mit den Materialkennwerten der Holz-Gütekategorie II (vgl. Abschn. 6.3) in das Diagramm eingezeichnet.

Alle Punkte des Endzustandes der Stützen liegen oberhalb der Grenzkurve, d.h. der Tragfähigkeitsverlust

trat scheinbar erst nach dem Überschreiten dieser Kurve ein. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Lage der Grenzkurve zu den Punkten des Endzustandes durch die folgenden Annahmen vorgegeben ist:

1. Die Materialkennwerte des unverbrannten Holzquerschnittes der Probestützen entsprechen denen der Holz-Güteklasse II.
2. Der Schlankheitsgrad  $\lambda_i$  der Probestützen wurde unter Zugrundelegung einer Knicklänge von  $s_K = 1,0 \cdot s$  (2. Eulerfall) ermittelt.
3. Zugrundelegung der Auflager- und Abbrennverhältnisse des BAM-Stützenprüfstandes unter Annahme eines allseitigen, gleichmäßigen Abbrandes längs und quer zur Lamellierungsrichtung.

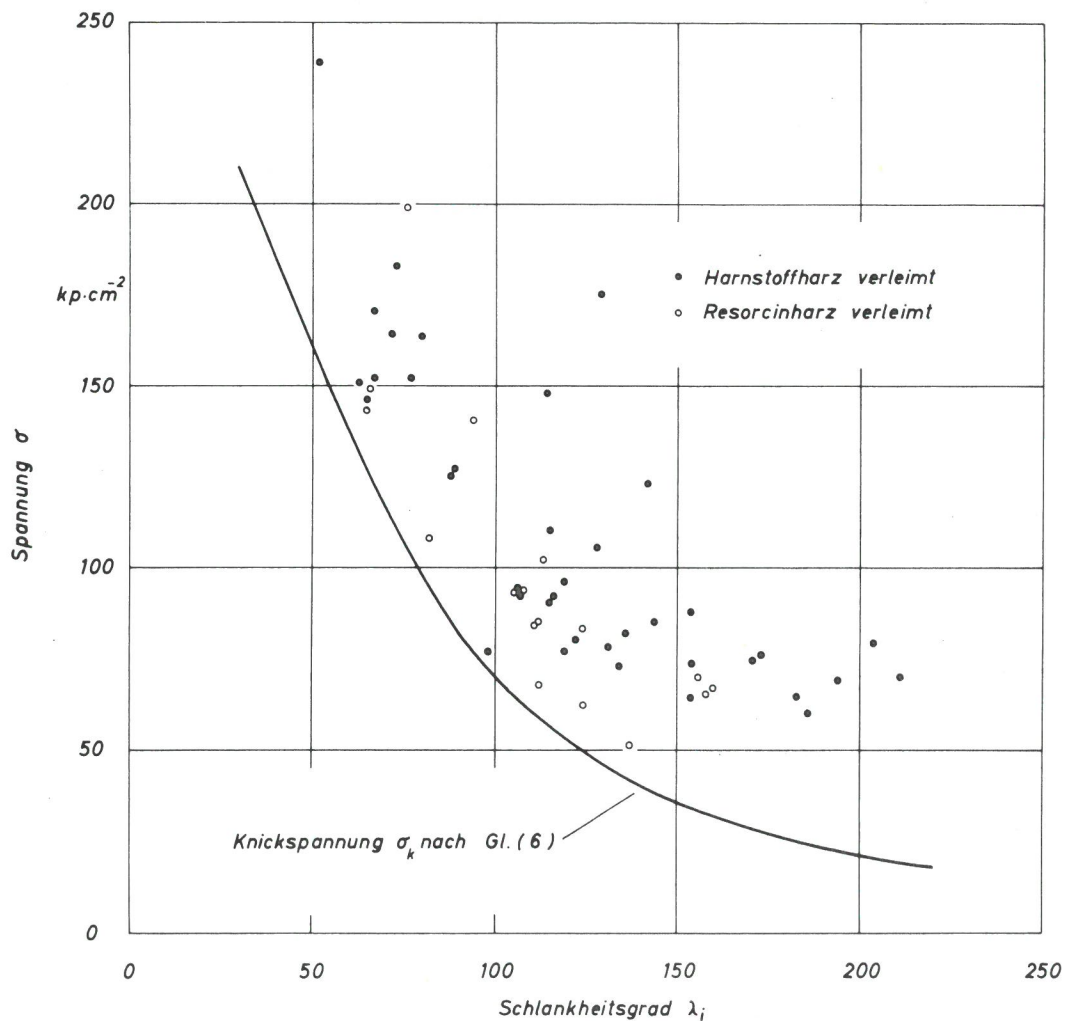


Abb. 36: Endzustand der Probestützen unter Annahme einer Knicklänge  $s_K = 1,0 \cdot s = 3,65$  m

Betrachtet man nun die Lage der Grenzkurve zu den Versuchsergebnissen in Abb. 36, so kann unter obigen Voraussetzungen die gewählte Grenzkurve als praktikable Näherungskurve für die Vorausberechnung der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen Stützen aus Brettschichtholz der Güteklasse I angesehen werden.

Die statistische Sicherheit der nach dem oben dargestellten Verfahren gewonnenen Aussagen bedarf hierbei noch einer weiteren Untersuchung. Hierzu wurden von der BAM bereits weitere Forschungsmittel beantragt.

## 7. Zusammenfassung

Im Brandfall ist die Wärmebeanspruchung des unzerstörten Restquerschnittes eines Holzbauteils aufgrund der geringen Temperaturleitfähigkeit des verkohlten und unverbrannten Holzes sowie der vorhandenen Holzfeuchtigkeit gering, so daß die für das Tragverhalten maßgebenden Materialeigenschaften, die Druckfestigkeit  $\sigma_D$  und der Elastizitätsmodul  $E$ , nur in den Randzonen wesentlich verändert werden. Unter Zugrundelegung theoretischer Knickspannungskurven und mit bekannter Abbrandfunktion, das ist der zeit- und querschnittsabhängige Abbrand eines Holzbauteiles unter bestimmten thermischen Bedingungen, kann daher die Feuerwiderstandsdauer von einteiligen Holzdruckstäben theoretisch bestimmt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Feuerwiderstandsdauer von Holzstützen verschiedener Querschnitte unter Druckbeanspruchung sowie die Abbrandfunktion empirisch ermittelt. Aufgrund der systematischen Zusammenhänge zwischen den Querschnittsabmessungen und der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen Stützen aus Brettschichtholz kann ein Rechenverfahren zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer angegeben und an Stützen mit Rechteckquerschnitt näher erläutert werden. Auf die vielfältigen Aussagemöglichkeiten des Rechenverfahrens sowie auf die Übereinstimmung der Schlußfolgerungen, die aus den empirisch und theoretisch ermittelten Ergebnissen gezogen werden, wird hingewiesen.





## Literatur

- [1] Seekamp, H. u. Stanke, J.: Das Brandverhalten von belasteten Holzstützen;  
Bauen mit Holz, Heft Nr. 5, 1969
- [2] Stanke, J.: Die Feuerwiderstandsfähigkeit von belasteten Holzstützen;  
Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung  
Heft Nr. 56, 1969
- [3] Stanke, J.: Ein Beitrag zur theoretischen Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen, brett-schichtverleimten Stützen unter Druckbeanspruchung;  
VFDB-Zeitschrift, 19. Jahrgang (1970), Heft Nr. 2
- [4] DIN 4102, Blatt 4, Ausgabe 1970,  
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen,  
Einreihung in die Begriffe
- [5] DIN 4102, Blatt 2, Ausgabe 1970,  
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen,  
Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen
- [6] DIN 1052, Ausgabe 1965,  
Holzbauwerke,  
Berechnung und Ausführung
- [7] DIN 1052, Blatt 1, Ausgabe 1969,  
Holzbauwerke,  
Berechnung und Ausführung
- [8] Dreyer, R.: Brandverhalten von Holzträgern unter Biege- und Feuerbeanspruchung;  
VFDB-Zeitschrift, 19. Jahrgang (1970), Heft Nr. 2
- [9] Malhotra, H.L. u. Rogowski, B.: Fire-resistance of laminated timber columns.  
Fire Research Symposium No. 3, Paper 3;  
Fire and structural use of timber in buildings;  
London, 1970; Her Majesty's Stationery Office
- [10] Knublauch, E.: Brandbelastung, Abbrenngeschwindigkeit, Energiefreisetzung und Brandgeschehen;  
Fortschritt-Berichte VDI-Z, Reihe 5, Nr. 10, 1970
- [11] Imaizumi, K.: Stability in fire of protected and unprotected glued laminated beams;  
The Norwegian Institute of wood working and wood technology, Meddelelse No. 18, 1962
- [12] Tenning, K.: Glued laminated timber beams: fire tests and experience in practice.  
Fire Research Symposium No. 3, Paper 1;  
Fire and structural use of timber in buildings;  
London, 1970; Her Majesty's Stationery Office

- [13] Ödeen, K.: Fire-resistance of glued, laminated timber structures;  
Fire Research Symposium No. 3, Paper 2;  
Fire an structural use of timber in buildings;  
London, 1970; Her Majesty's Stationery Office
- [14] Dorn, H. u. Egner, K.: Brandversuche an brettschichtverleimten Holzträgern unter Biegebeanspruchung;  
HOLZ als Roh- und Werkstoff, Heft 8, 1967
- [15] Pettersson, O.: Structural fire engineering research today and tomorrow;  
National Swedish Institute of Materials Testing,  
Stockholm 1965
- [16] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe;  
1. Band, 2. Auflage 1951;  
Berlin - Göttingen - Heidelberg: Springer-Verlag
- [17] Möhler, K.: Tragkraft und Querkraft von ein- und mehrteiligen Holzdruckstäben nach Rechnung und Versuch  
Bauplanung und Bautechnik, Nr. 2, 1948