

# Temperaturbeanspruchung von Bauholz

**T 2951**

T 2951

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2001, ISBN 3-8167-5974-2

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)

URL <http://www.IRBbuch.de>

**Forschungsvorhaben:**

**Vergleichende Betrachtung euro-  
päischer Bauprodukten-Normen  
mit nationalen Bestimmungen**

**Teilprojekt E – 92/70c :**

**Temperaturbeanspruchung von Bauholz  
- Abschlussbericht (Studie) zum Vorhaben -**

**Die Arbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, sowie durch die Holzwirtschaft.**

**Autoren:**

**R. Ehrlenspiel, M. Seemann, G. Wegener**

**München, Oktober 2000**

## Gliederung

### **0. Einleitung**

### **1. Kenntnisstand zum Abbrandverhalten**

#### **1.1. Holzeigenschaften unter Brandbeanspruchung**

- 1.1.1. Abnahme der Festigkeit bei Temperaturerhöhung
- 1.1.2. Abnahme des Querschnitts durch Abbrand

#### **1.2. Abbrandgeschwindigkeit $\beta$**

- 1.2.1. Definition
- 1.2.2. Ermittlung von  $\beta$

#### **1.3. Ermittelte Abbrandgeschwindigkeiten in der Literatur**

- 1.3.1. Fichte
- 1.3.2. Kiefer
- 1.3.3. Anderes Nadelholz
- 1.3.4. Laubholz
- 1.3.5. Holzwerkstoffe

#### **1.4. Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte**

### **2. Abbrandverhalten von Bauholz in der nationalen und europäischen Normung**

#### **2.1. DIN 4102 Teil 4 (März 1994)**

- 2.1.1. Inhalt
- 2.1.2. Bemessung im Brandfall

#### **2.2. EC 5 Teil 1-2 (DIN V ENV 1995-1-2)**

- 2.2.1. Allgemeines
- 2.2.2. Inhalt
- 2.2.3. Bemessung im Brandfall
  - 2.2.3.1. Bemessung mit ideellem Restquerschnitt (Methode 1)
  - 2.2.3.2. Bemessung mit reduzierter Festigkeit und Steifigkeit bei Normbeanspruchung (Methode 2)
  - 2.2.3.3. Generelle Bemessungsmethode (Methode 3)

### **3. Bewertung der Normensituation**

#### **3.1. DIN 4102 Teil 4**

#### **3.2. EC 5-1-2**

- 3.2.1. Werte für Abbrandgeschwindigkeiten
- 3.2.2. Der Einfluss des Abbrandes auf die Bauteilbemessung nach EC 5 Teil 1-2

### **4. Literaturverzeichnis**

**Forschungsvorhaben:**

## **Vergleichende Betrachtung europäischer Bauprodukten-Normen mit nationalen Bestimmungen**

**Teilprojekt E – 92/70c :**

### **Temperaturbeanspruchung von Bauholz - Abschlussbericht (Studie) zum Vorhaben -**

#### **Kurzfassung**

Der Eurocode 5 Teil 1-2, welcher in Zukunft den Holzbereich der nationalen Norm DIN 4102 Teil 4 komplett ersetzen wird, bietet Möglichkeiten zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen und –konstruktionen an. Für verschiedene Berechnungsmethoden werden im EC 5 verschiedene Tabellen mit Abbrandgeschwindigkeiten angegeben.

Vor allem die in Tabelle A.1 angegebenen Abbrandwerte für die genauere Berechnungsmethode werden zum einen wegen der geringen bzw. fehlenden Differenzierung in verschiedene Holzarten in Frage gestellt. Für Laubholz (außer Eiche) existiert darüber hinaus eine Inkonsistenz zwischen den beiden Bemessungsverfahren mit reduzierter Festigkeit und Steifigkeit im Anhangs A.

Eine mögliche Abänderung dieser Normwerte gilt es zu diskutieren.

Die großen Unterschiede für Abbrandgeschwindigkeiten bei Laubhölzern, die aus verschiedenen Abbrandversuchen deutlich hervorgehen, führen zu dem Schluss, dass das Abbrandverhalten von Laubhölzern noch intensiver untersucht werden sollte.

Die baulich wichtigsten Hölzer sind bereits hinreichend untersucht worden. Die Abbrandgeschwindigkeiten weiterer Hölzer, die auf geringen Probenanzahlen beruhen, sollten, soweit ihre Aufnahme in den EC 5 sinnvoll ist, durch weitere gezielte Versuche abgesichert werden.

## Abstract

In future, Eurocode 5 part 1-2 will replace, as far as wood is concerned, the national standard DIN 4102 part 4. EC 5 1-2 offers options to calculate the fire resistance of wooden construction components and constructions. In EC 5 1-2, different tables with charring rates are available for different calculation methods.

Above all, the charring rates for the more precise calculation method, given in table A1, are put into question. The reason is, on the one hand, the wanting discrimination between the different wood species. Moreover, for hardwood (except oak) there is an inconsistency between the two calculation procedures with reduced strength and stiffness of annex A.

An alteration of these values should be discussed.

The remarkable differences in the charring rates of hardwoods, shown by various charring tests, require the charring behaviour of hardwood to be examined more intensively.

The wood species important for building construction have been sufficiently investigated. The charring rates of other wood species depending on only a small number of samples should, as far as their implementation into EC 5 1-2 makes sense, be verified by further testing.

## Resumée

Dans l'avenir, l'eurocode 5 1-2 remplacera complètement le secteur de bois de la norme nationale DIN 4102 partie 4. L'eurocode 5 offre des possibilités de calcul de résistance au feu pour des éléments de construction et des constructions. Pour différentes méthodes de calcul, dans l'EC 5 1-2 différents tableaux avec des vitesses de carbonisation sont indiquées.

Surtout les valeurs de carbonisation indiquées dans le tableau A.1 pour la méthode de calcul plus précise sont placées en question d'une part à cause de la faible différenciation entre les bois différents. En outre, pour bois dur (excepté le chêne) il y a une contradiction entre les deux procédures de mesure avec la fermeté et la rigidité réduites de l'annexe A.

Une modification de ces valeurs de norme vaut être examinée.

Les différences rélevantes entre les vitesses de carbonisation pour bois dur, résultant de plusieurs de tests, conduisent à la conclusion que le comportement des bois durs devrait être examiné encore plus intensivement.

Les bois architecturalement les plus importants ont été examinés déjà suffisamment. Les valeurs d'autres bois qui sont basées sur peu d'échantillons, devraient, pour autant que leur admission dans l'EC 5 est logique, être vérifiées dans un plus grand nombre d'essais.

## 0. Einleitung

Zur Bemessung von Holzbauwerken wird auf nationaler Ebene die DIN 1052 „Holzbauwerke“ oder der Eurocode 5 „Bemessung und Konstruktion von Holzbauten“ herangezogen. Langfristig wird der Eurocode 5 die DIN 1052 ersetzen.

Bei Berücksichtigung des Brandfalles müssen bei Bemessung nach DIN 1052 die Anforderungen der DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ eingehalten werden. Die „heiße Bemessung“ nach Eurocode 5 wird in DIN V ENV 1995-1-2 „Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“ und dem zugehörigen Nationalen Anwendungsdokument (NAD) berücksichtigt. Eine gemischte Anwendung der nationalen und europäischen Normen ist nicht zulässig.

Die DIN V ENV 1995-1-2 (EC 5-1-2) ist nur zum Teil freigegeben. Das generelle exakte Nachweisverfahren nach Ziffer 4.3. wurde im NAD herausgenommen. Dies wurde mit nicht ausreichenden bzw. fehlenden Daten begründet. Die angegebenen Rechenwerte und Gleichungen stehen in Diskussion. Insgesamt bleiben viele Fragen offen. So unterscheiden sich z.B. die Abbrandgeschwindigkeiten nach Abschnitt 3.1 (Tabelle 3.1) von denen des Anhang A (Tabelle A.1).

Für die anzustrebenden erweiterten Nachweisverfahren ist eine genaue Kenntnis der Abbrandraten notwendig. Eine normative heiße Bemessung nach EC 5-1-2 ist derzeit mit dem „einfachen“ Verfahren nach Kapitel 4.1 und einem genaueren Verfahren nach Kapitel 4.2 möglich. Ein erweitertes Verfahren ist auch in der DIN 4102 Teil 4 nicht berücksichtigt. Dort existieren nur Tabellen für eine begrenzte Anzahl von Bauteilformen. Die zur Herleitung dieser Tabellenwerte verwendeten Formeln sind äußerst komplex und für die Anwendung zu kompliziert und zeitaufwendig.

Um eine bauaufsichtlich nachprüfbar heiße Bemessung zu ermöglichen, ist eine schnelle Einführung der erweiterten Nachweisverfahren nach Anhang A der DIN V ENV 1995-1-2 des EC 5 erforderlich. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zur Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für erweiterte Nachweisverfahren zur Brandbemessung beizutragen. Die nationale und internationale Literatur und Forschungsarbeiten zum Abbrandverhalten und Temperaturbeanspruchung von Bauholz (Holz- und Holzwerkstoffen) werden analysiert. Der bisherige Kenntnisstand (Literaturbeschaffung Anfang 2000) wird zusammengefasst und bewertet. Es wird weiterer Forschungsbedarf zum Abbrandverhalten und zur Temperaturbeanspruchung von Holz und Holzwerkstoffen festgestellt.

# 1. Kenntnisstand zum Abbrandverhalten von Holz

## 1.1. Holzeigenschaften unter Brandbeanspruchung

### 1.1.1. Abnahme der Festigkeit bei Temperaturerhöhung

Im Falle einer Brandeinwirkung spielen sich zwei Vorgänge im Holzkörper ab, die zur Abnahme seiner Stabilität führen. Zum einen nimmt mit dem Ansteigen der Temperatur (auch ohne bereits erfolgte Entzündung) die Festigkeit des Holzkörpers im erhitzten äußeren Querschnittsbereich ab. KALLIONIEMI (1980) stellte eine Beziehung zwischen Holzfeuchte und Temperatur her. Zur Ermittlung eines daraus resultierenden Festigkeitswertes des Restquerschnittes ermittelte KALLIONIEMI aufgrund von Versuchen Regressionsgleichungen für verschiedene Festigkeiten von Fichte und Kiefer. Sowohl Feuchte als auch erhöhte Temperaturen wirkten sich negativ auf die Festigkeit des Holzkörpers aus.

Bei der Messung der verschiedenen Festigkeiten eines BSH-Trägers nach 30-minütiger Brandbeanspruchung ergaben sich in Abhängigkeit vom Abstand zur Abbrandgrenze folgende Festigkeitswerte in Prozent zu den Ausgangswerten (bei 20°C und 12% Holzfeuchte):

Abstand von Abbrandgrenze [mm]	Temperatur [°C]	Feuchtigkeit [%]	Zugfestigkeit*	Druckfestigkeit*	Biegefestigkeit*
5	230	4,8	65	75	64
10	145	7,2	81	75	68
15	105	9,6	84	73	70
20	75	12,0	86	72	71
25	55	12,0	91	78	78
30	40	12,0	95	85	85
35	30	12,0	97	91	91
40	25	12,0	99	95	95
45	20	12,0	100	100	100

\*in % vom Ausgangswert bei 20°C und 12% Holzfeuchte

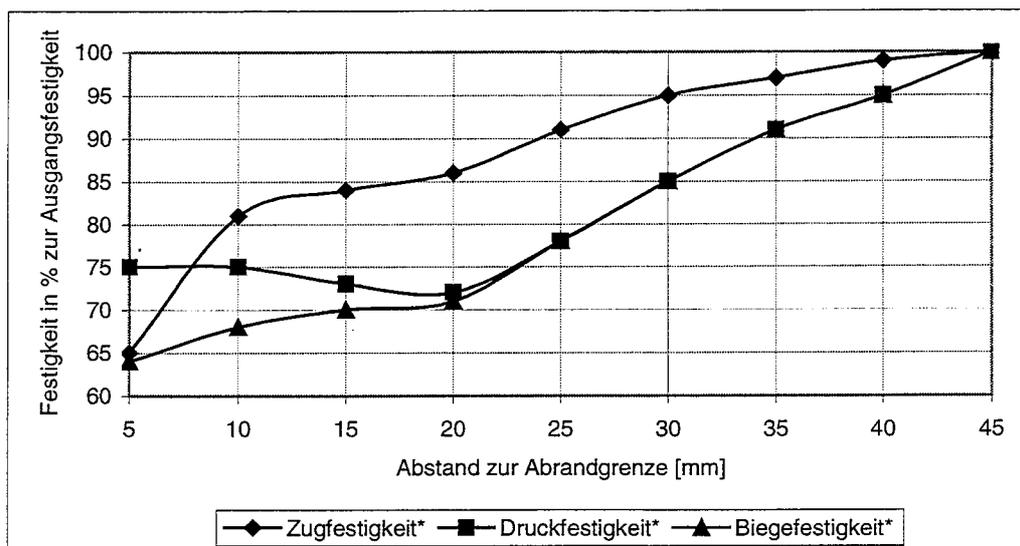
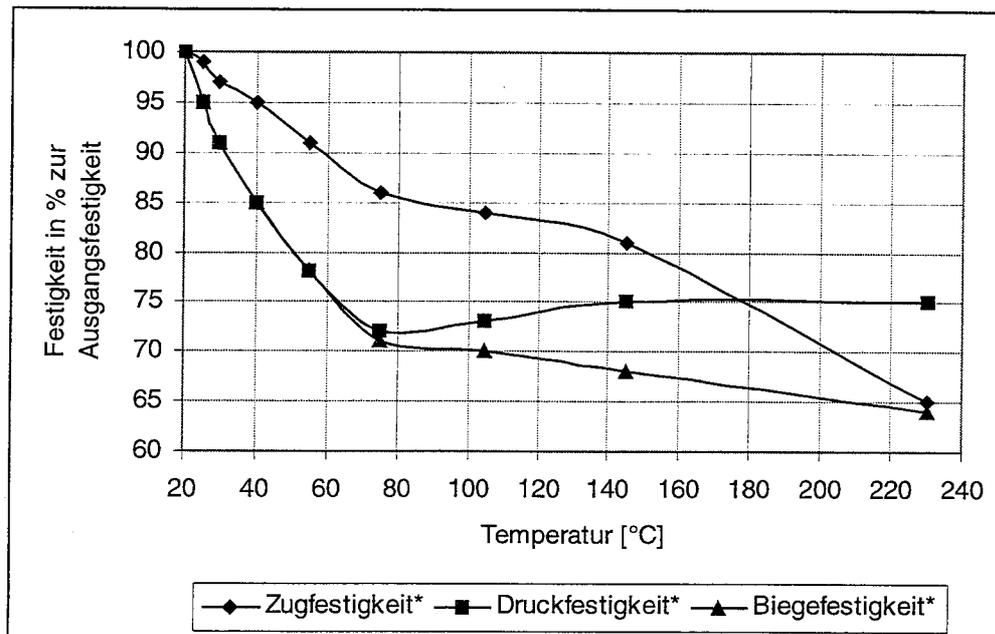


Abbildung 1: Festigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand zur Abbrandgrenze nach KALLIONIEMI (1980)

Ab etwa 40 bis 45 mm hinter der Abbrandgrenze herrscht wieder Normaltemperatur und die Festigkeiten erreichen wieder ihren Ausgangswert von 100%. In den Außenbereichen des unverbrannten Restquerschnitts erfolgt also eine sehr deutliche Abnahme der Festigkeitswerte (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 2: Festigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur nach KALLIONIEMI (1980)**

In Abbildung 2 sind dieselben Festigkeiten nochmals in Abhängigkeit von der Temperatur angetragen. Hier ist wiederum eine deutliche Abnahme der verschiedenen Festigkeiten bei ansteigenden Temperaturen zu sehen.

GLOS und HENRICI (1990) ermittelten ebenfalls eine deutliche Abnahme der Druck- und Biegefestigkeiten bei erhöhter Querschnittstemperatur. Die Auswertung von 525 Proben ergab eine Abnahme der Biege-, Zug- und Druckfestigkeit bei 100°C auf 72, 92 und 56 % der jeweiligen Festigkeiten bei 20°C. Es wurde ähnlich wie von KALLIONIEMI (1980) ein feuchteabhängiger Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit ermittelt. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass in den Versuchen von GLOS und HENRICI (1990) der gesamte Querschnitt die gleiche erhöhte Temperatur (100°C und 150°C) hatte, während im Brandfall von einem relativ steilen Temperaturgefälle von der Abbrandgrenze unter der Holzkohleschicht zum Querschnittsinneren auszugehen ist. Im Inneren des unverbrannten Restquerschnittes herrscht je nach Querschnittsabmessungen und Branddauer nur eine geringe bis gar keine Temperaturerhöhung. Dennoch zeigen auch diese Versuche den deutlichen Einfluss des Temperaturanstiegs auf die Festigkeiten der äußeren Querschnittsbereiche.

Ein Problem bereitet in jedem Fall die Quantifizierung des tatsächlichen Festigkeitsverlustes im Gesamtquerschnitt. Hierzu muss der Temperaturgradient zwischen Abbrandgrenze und Querschnittsinnerem bekannt sein. Temperaturgradienten wurden ermittelt von KLINGSCH et al. (1993). Es wurde ein Rechenmodell zur thermischen Querschnittsanalyse entwickelt mit dessen Hilfe sich die mittlere Temperatur des Restquerschnitts ( $\theta_w$ ) in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis, der Beanspruchungsart, der Abbrandgeschwindigkeit und der Branddauer berechnen lässt. Mit Hilfe einer so ermittelten Durchschnittstemperatur für den Restquerschnitt ließe sich eine durchschnittliche Festigkeit für den Restquerschnitt ermitteln, indem man die Temperatur in eine Kurve ähnlich, wie in Abbildung 2 einsetzt. Diese Kurve sollte durch eine ausreichende Anzahl von Messungen abgesichert sein. Die von KALLIONIEMI und GLOS, HENRICI durchgeführten Messungen dienen als Basis für eine derartige Kurvendarstellung.

Unter Kapitel 2.2.3. werden Berechnungsmöglichkeiten angegeben, die eine Festigkeitsabnahme unter Brandbeanspruchung berücksichtigen.

### 1.1.2. Abnahme des Querschnitts durch Abbrand

Der Abbrand stellt die wichtigste Kenngröße zur Vorhersage der Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen unter Brandbelastung dar (KNUBLAUCH und RUDOLPHI, 1971). Im Brandfall (unter Belastung) wird der Feuerwiderstand in erster Linie durch die Verringerung des Querschnitts durch Abbrand bestimmt. Bei gleichbleibender Belastung steigt die Spannung  $\sigma$  im unter Brandeinwirkung stehenden Holzkörper an, bis die maximale Festigkeit  $\sigma_{\max}$  überschritten wird und zum Verlust der Tragfähigkeit des Holzbauteiles führt (KLINGSCH et al., 1993). Die entscheidende Rolle spielt hierbei das Fortschreiten des Abbrandes pro Zeiteinheit, die sogenannte Abbrandgeschwindigkeit  $v$  bzw.  $\beta$ .

## 1.2. Abbrandgeschwindigkeit $\beta$

### 1.2.1. Definition

Das Fortschreiten der thermischen Zersetzung, d. h. die Verschiebung der Abbrandgrenze pro Zeiteinheit wird als Abbrandgeschwindigkeit bezeichnet. Als Kürzel für die Abbrandgeschwindigkeit wird entweder der Buchstabe  $v$  oder das griechische Zeichen  $\beta$  verwendet. In DIN 4102 Teil 4 wird  $v$  verwendet. Im weiteren Verlauf der Studie wird jedoch in Übereinstimmung mit dem Eurocode 5 Teil 1-2 mit dem Kürzel  $\beta$  gearbeitet. Diese Bezeichnung kann allerdings zu Verwechslungen mit den verschiedenen Festigkeiten (Zug-, Biege-, Druck-) führen, welche ebenfalls das  $\beta$  als Kürzel haben.

Die Abbrandgeschwindigkeit wird in [mm/min] angegeben, d.h. die Tiefe des Abbrandes pro Zeit. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Abbrenngeschwindigkeit, welche den thermisch bedingten Masseverlust von Holz bei der energetischen Nutzung darstellt und in [g/min] angegeben wird (LACHE, 1992). In experimentellen Arbeiten ist der Abbrand  $A$  als Differenz der Probenabmessungen vor und nach der Brandbeanspruchung definiert;  $t$  ist dabei die gesamte Dauer der Brandbeanspruchung. Als Bezugsebene für die Messung gilt in allen Fällen die durch Temperatureinwirkung braun verfärbte, aber noch nicht vollständig zu Holzkohle zersetzte Schicht.

Generell ist der Abbrand  $A$  eine Funktion der Zeit:  $A = f(t)$  [mm] (1.1)

Demnach gilt für die Abbrandgeschwindigkeit:  $\beta(t) = dA/dt$  [mm/min] (1.2)

Nach nahezu allen zitierten Versuchen, bei welchen die Temperaturerhöhung der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) entsprach und die übereinstimmend einen linearen Zusammenhang zwischen  $A$  und  $t$  feststellten gilt:

$$dA/dt = \text{konstant} \quad (1.3)$$

$$\text{Daraus folgt: } A = f(t) = \beta \cdot t - c \quad [\text{mm}] \quad (1.4)$$

A: Abbrand [mm]  
 t : Zeit [min]  
 c : Konstante [mm]

Setzt man  $A = 0$ , so kann aus Gleichung (1.4) mit  $c/\beta$  die Zeit bis zum Beginn der Kohlebildung errechnet werden. Diese Zeit beträgt nach Messungen von z.B. KNUBLAUCH und RUDOLPHI (1971) an Fichte 2 bis 3 min. HUNTIEROVÁ (1995) misst Werte an unbehandeltem Voll-

oder Schnittholz von 4 bis 5 min bis zum Beginn der Kohlebildung, bei mit Feuerschutzmitteln (FSM) behandelten Proben treten Verzögerungen von bis zu 10 min auf.

Üblicherweise wird dieser Zusammenhang bei unbehandeltem Holz vereinfacht, indem die Zeit vom Beginn der Brandbelastung bis zum Beginn der Kohlebildung vernachlässigt wird. Damit reduziert sich die Berechnung auf:

$$\beta = A/t \quad [\text{mm/min}] \quad (1.5)$$

### 1.2.2. Messmethoden zur Ermittlung von $\beta$

- 1) Die erste und weltweit am häufigsten angewandte Methode besteht darin, den Abbrand nach Versuchsende zu messen und durch die Versuchsdauer zu teilen.
- 2) Zur Schaffung von Grundlagen für ein exakteres Rechenverfahren zur Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Holzbauteilen ist ein Messverfahren zur kontinuierlichen Messung des Abbrandes  $A$  notwendig. Im Bereich der Grenzfläche verkohltes/unverkohltes Holz ist ein Sprung der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. Diese Verhältnisse können für eine mechanisch wirkende, bohrende Sonde ausgenutzt werden. Die (Bohr-)Krone bleibt aufgrund des sehr großen Sprunges der Stoffeigenschaften immer in der Grenzschicht zwischen verkohltem und nicht verkohltem Holz. Mit dieser Methode lassen sich Unterschiede in der Abbrandgeschwindigkeit über die gesamte Dauer der Brandbeanspruchung ermitteln.
- 3) Die dritte Methode besteht in der Messung des zeitlichen Verlaufs der Abbrandgrenze anhand der an der Abbrandgrenze herrschenden Temperatur, d.h. die Höhe der Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich durch das zeitliche Fortschreiten der Temperatur an der Abbrandgrenze in Richtung des unverbrannten Restquerschnitts. Die Temperaturermittlung erfolgt durch Thermodrähte im Probenkörper (SCHAFFER, 1967; HALL, 1968). Temperaturwerte zwischen den Thermodrähten werden durch Interpolation ermittelt.
- 4) MIKKOLA (1990) führt noch eine vierte Möglichkeit zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit ein. Er misst mit einem sogenannten Kegelkalorimeter (cone calorimeter) den Wärmefluss bzw. Sauerstoffverbrauch einer Kleinprobe und schließt damit auf die Abbrandgeschwindigkeit des Probekörpers. Die Probe wird hierbei von einem konstanten Wärmestrom beheizt. Dieser Wärmestrom wird von einem kegelförmigen Heizer erzeugt. Die Probenoberfläche kann zwischen 0 bis 100 kW/m<sup>2</sup> befeuert werden. MIKKOLA arbeitete im Wärmeflussbereich zwischen 20 bis 75 kW/m<sup>2</sup>. Die maximale Probendicke beträgt 75 mm, wobei fast nur mit Probendicken unter 50 mm gearbeitet wurde. Die Messung der „rate-of-heat-release“ mit dem „cone calorimeter“ basiert auf der Methode des Sauerstoffverbrauchs. Die Verbrennungshitze pro Einheit verbrauchten Sauerstoffs ist annähernd gleich für die meisten brennbaren Materialien, die im Feuer verbrennen.

### 1.3. Ermittelte Abbrandgeschwindigkeiten in der Literatur

Die Abbrandgeschwindigkeit  $\beta$  ist holzartenspezifisch. Bevor diese Aussage diskutiert wird, werden anhand von Tabellen die in der Vergangenheit gemessenen Abbrandgeschwindigkeiten, nach Holzarten bzw. Holzartengruppen und Holzwerkstoffen gegliedert, aufgeführt.

## 1.3.1. Fichte

Tabelle 1: Abbrandgeschwindigkeiten von Fichte

Holzart	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Fichte</b>		
Picea abies	0,60 – 0,70	DORN, EGNER 1961
	0,66	DORN, EGNER 1966
	0,73	HALL 1968
	0,6 – 0,8	STANKE 1969
	0,66	KNUBLAUCH, RUDOLPHI 1971
	0,57 – 0,69	KALLIONIEMI 1980
	0,51	RÖLL 1984
	0,63 – 0,71	LACHE 1992
	0,58	KETTLER 1994
	0,66	HUNTIEROVÁ 1995
	0,51	BAUER 1995
	0,51 – 0,59	TOPF, HOCH 1995
	0,51 – 0,59	HOCH 1998
	0,56 – 1,02	MIKKOLA 1990 (25-75 kW/m <sup>2</sup> bei 10% u)
	0,60 – 1,06	MIKKOLA 1990 (20 – 0% u bei 50 kW/m <sup>2</sup> )

Von der Holzart Fichte als am häufigsten verwendete und demnach auch am häufigsten untersuchte Bauholzart wurden die meisten Abbrandwerte ermittelt.

Die hier aufgeführten Werte für die Abbrandgeschwindigkeit von Fichte [Tabelle 1] weichen teilweise erheblich voneinander ab. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Messmethoden. MIKKOLA (1990) wendet zur Bestimmung seiner Abbrandwerte ein „cone calorimeter“ an. Er schließt mit Hilfe einer Formel von der Hitzefreisetzung durch Verbrennung der Probe, in Abhängigkeit von der Rohdichte des Probenkörpers, auf die Abbrandgeschwindigkeit. Hierbei muss die Holzprobe auf dem Kegelkalorimeter mit einem bestimmten Wärmefluss bestrahlt werden. Dieser Wärmefluss wird von MIKKOLA zuerst zwischen 25 kW/m<sup>2</sup> und 75 kW/m<sup>2</sup> variiert, was auch der Grund für die große Streuung der Abbrandwerte von 0,56 bis 1,02 mm/min zu sein scheint. Die Holzfeuchte der verwendeten Proben liegt bei  $u = 10\%$ . In einer zweiten Versuchsreihe hält MIKKOLA zwar den Wärmefluss konstant auf 50 kW/m<sup>2</sup>, variiert hier aber die Holzfeuchte zwischen 0% und 20%. Aufgrund dieser starken Holzfeuchtevariation ergibt sich auch hier ein großer Streubereich bei den Werten der Abbrandgeschwindigkeit zwischen 0,60 und 1,06 mm/min.

Der von STANKE (1969) angegebene Bereich von 0,6 bis 0,8 mm/min wurde ermittelt aus den Verkohlungstiefen von belasteten Vollholz- und Brettschichtholzstützen (Fichte) bei Tragfähigkeitsverlust und der bis dahin verstrichenen Zeit. Hierbei bildete der Wert 0,8 mm/min die Steigung der oberen Begrenzungsgerade und 0,6 mm/min die Steigung der unteren Begrenzungsgerade innerhalb der sich die Punktwolke der ermittelten Abbrandtiefe/Zeit-Wertepaare der getesteten Stützen bei Versuchsende befindet, d.h. die Abbrandgeschwindigkeit des Fichtenholzes liegt zwischen diesen beiden Werten. Die Messung des Abbrandes erfolgte hier nach Ende des Versuchs (Methode 1) nach 1.2.2.), allerdings wurde, da es sich in diesem Fall um eine vierseitige Brandbelastung handelte, die unverbrannte Restquerschnittsfläche polarplanimetrisch ermittelt, auf ein flächengleiches Quadrat umgerechnet und im Vergleich zur ursprünglichen quadratischen Querschnittsfläche der Abbrand bestimmt. Dies führt zu geringfügig höheren Ab-

brandgeschwindigkeiten, da hier der Abbrand an den Ecken auf die Seiten des Querschnitts „umgelegt“ wurden. Die Versuchsdauer variierte aufgrund der unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauer der einzelnen Stützen zwischen 20 und 67 min. Aus diesem Grund sollten jene beiden „Grenzwerte“, vor allem der obere bei 0,8 mm/min, nicht als tatsächliche Werte aufgefasst werden, sondern eher als Eingrenzung der für verschiedene Stützen bei unterschiedlicher Branddauer gewonnenen Abbrandgeschwindigkeiten.

Zu erstaunlich geringen Abbrandraten gelangten RÖLL (1984) und BAUER (1995) mit jeweils 0,51 mm/min, sowie TOPF und HOCH (1995) als auch HOCH (1998) mit 0,51 – 0,59 mm/min. Die Werte von BAUER, HOCH, TOPF und HOCH stammen aus Abbrandversuchen an Anleimern für Türblätter und wurden bei 30-minütiger Versuchsdauer unter ETK-Bedingungen durchgeführt. Die hier angegebenen Werte wurden in der Mitte der Anleimer gemessen und waren etwas günstiger, als die Werte am Rande der Anleimer bzw. in den Leimfugen des Türblattes. RÖLL dagegen führte Versuche an übereinandergelegten Holzbohlen mit bis zu 90-minütiger Versuchsdauer durch und kam ebenfalls auf die gleiche Abbrandgeschwindigkeit.

Die Werte liegen somit bei der Fichte in einem relativ engen Bereich zwischen 0.51 und 0.70 mm/min. Nur HALL (1968) liegt mit seiner ermittelten Abbrandgeschwindigkeit von 0,73 mm/min etwas darüber. Evtl. könnte man dies darauf zurückführen, dass die Erhebung von  $\beta$  hier durch die Methode 3) (siehe 1.2.2.), d.h. anhand des zeitlichen Fortschreitens der Temperatur an der Abbrandgrenze, erfolgte.

Die übrigen Abbrandwerte bei Fichte wurden durch die Messverfahren nach Methode 1) und 2) (siehe 1.2.2.) ermittelt. Bei allen Versuchen an Fichte, außer denen von MIKKOLA, wurde als Temperaturzeitkurve die ETK angewendet.

Dennoch stellt sich teilweise die Frage, ob die verschiedenen Abbrandwerte der Autoren dieses Kapitels überhaupt untereinander vergleichbar sind. Häufig liegen keine oder nur ungenaue Versuchsbeschreibungen zu den einzelnen Abbrandversuchen vor, um damit bestimmte Beeinflussungen der Abbrandergebnisse durch andere Faktoren einzugrenzen.

Natürlich ist man auf diese bereits ermittelten Werte erst einmal angewiesen, jedoch sollte man sich stets im Klaren darüber sein, dass das Zustandekommen einiger Werte nicht klar nachvollziehbar oder nur unter schwer akzeptablen Bedingungen erfolgte.

Die bei den Versuchen ermittelten Rohdichten für *Picea abies* (Fichte) bewegen sich, soweit angegeben, in einem Rahmen von 0,34 – 0,59 g/cm<sup>3</sup>. Es konnte keine Abhängigkeit der Rohdichte im Hinblick auf die Abbrandgeschwindigkeit festgestellt werden.

## 1.3.2. Kiefer

Tabelle 2: Abbrandgeschwindigkeiten von Kiefer

Holzart	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Kiefer</b>		
Pinus sylvestris (BSH)	0,59 – 0,86	ROGOWSKI 1967
Kiefer (BSH)	0,7	ZAPOL 1980
Kiefer/Tanne (BSH)	0,6 (b>120mm)	KIRPICHENKOV et al. 1980
Kiefer/Tanne (BSH)	0,7 (b<120mm)	KIRPICHENKOV et al. 1980
Pinus sylvestris (Splint)	0,81	LACHE 1992
Pinus sylvestris (Kern)	0,69	LACHE 1992
Pinus sylvestris	0,63	KETTLER 1994
Pinus sylvestris	0,63	TOPF, HOCH 1995
Pinus sylvestris	0,58 – 0,63	HOCH 1998
Kiefer	0,80 – 1,11	MIKKOLA 1990 (10-0% bei 50 kW/m <sup>2</sup> )

Die Abbrandgeschwindigkeit der Kiefer bewegt sich anhand der hier zusammengestellten Literaturangaben [Tabelle 2] im Rahmen von 0,59 – 1,11 mm/min. Der größte Wert von 1,11 mm/min ergibt sich auch hier aus den Angaben von MIKKOLA (1990) bei einer Holzfeuchte von 0% u und soll deshalb vernachlässigt werden. Ohne die Werte von MIKKOLA ergeben sich als Unter- und Obergrenze 0,58 bzw. 0,86 mm/min v. a. durch die Messungen von ROGOWSKI (1967). Es wurden Versuche an brettschichtholzverleimten Stützen durchgeführt (MALHOLTRA und ROGOWSKI, 1967), die unter Belastung standen. Hierbei wurden jedoch die Abbrandgeschwindigkeiten verschiedener Querschnittsformen bei unterschiedlicher Verleimung und unterschiedlicher Branddauer ermittelt. Dies mag wohl der Grund für die relativ große Streuung bei dem angegebenen Abbrandbereich sein.

Würde man zusätzlich den Wert von 0,81 mm/min für reines Kiefern Splintholz (LACHE, 1992) ausklammern, so käme man bei Kiefer auf einen erfreulich engen Wertebereich von etwa 0,58 – 0,70 mm/min.

Die Angaben von KIRPICHENKOV et al. (1980) beziehen sich, ähnlich bei STANKE (1969), auf den Querschnitt des brandbelasteten Holzes. Kiefern- oder Tannenbrettschichthölzer mit einer Dicke < 120 mm haben eine Abbrandgeschwindigkeit nahe 0,7 mm/min, größere Dicken brennen nach seinen Angaben mit 0,6 mm/min ab. Diese unterschiedlichen Werte scheinen sich jedoch eher auf die Berechnung der Feuerwiderstandsdauer zu beziehen. Aufgrund der geringeren Dicke des Kiefern- (bzw. Tannen-) Brettschichtholzes (< 120 mm) verwendet KIRPICHENKOV den ungünstigeren Wert von 0,7 mm/min für  $\beta$ .

Die bei den Versuchen ermittelten Rohdichten für Kiefer bewegen sich, soweit angegeben, in einem Rahmen von 0,49 – 0,62 g/cm<sup>3</sup>. Es konnte keine Abhängigkeit der Rohdichte im Hinblick auf die Abbrandgeschwindigkeit festgestellt werden.

Anhand der ermittelten Wertebereiche für  $\beta$  bei Fichte und Kiefer zeichnet sich ab, dass die Fichte etwas günstiger, d.h. geringfügig langsamer abbrennt, als die Kiefer. So liegt der maximale Wert der Abbrandgeschwindigkeit bei Fichte laut der oben diskutierten Autoren bei 0,7 mm/min, der von Kiefer ohne Splintholz bei ebenfalls etwa 0,7 mm/min. Dies entspricht auch weitgehend den in der Norm DIN 4102 Teil 4 (3/94) und dem Eurocode 5 Teil 1-2 (DIN V ENV 1995-1-2) verzeichneten Werten [Tabelle 3]. Die hier zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer angegebene Abbrandgeschwindigkeit wird bei Nadelbrettschichtholz allgemein mit

0,7 mm/min und bei Nadelvollholz mit 0,8 mm/min angegeben, wobei der EC 5 Teil1-2 hier noch weiter in Mindestrohichte und Mindestabmessung bzw. -dicke differenziert. Bei den angegebenen Versuchen lagen sowohl Fichte als auch Kiefer über dem im Eurocode 5-1-2 angegebenen Mindestrohichtewert von 290 kg/m<sup>3</sup> bzw. 0,29 g/cm<sup>3</sup>.

Tabelle 3: Abbrandgeschwindigkeiten von Nadelholz in den Normen

Norm	Holzart (Nadelholz)	Randbedingungen	β (mm/min)
DIN 4102 Teil 4 (Abschnitt 5)	Brettschichtholz	keine	0,7
	Vollholz einschl. Buche		0,8
ENV 1995-1-2 (nach Tab.3.1)	Brettschichtholz	ρ ≥ 290 kg/m <sup>3</sup>	0,7
	Vollholz	ρ ≥ 290 kg/m <sup>3</sup> , d ≥ 35 mm	0,8
	Massivholzplatten	ρ = 450 kg/m <sup>3</sup> , d = 20 mm	0,9

Der etwas höhere Wert für das Vollholz hängt nicht etwa damit zusammen, dass Brettschichtholz langsamer als Vollholz abbrennt, sondern ist als zusätzliche Sicherheit zu sehen, bedingt durch die ungünstige Eigenschaft von Vollholz im Gegensatz zu Brettschichtholz, bei Erwärmung Risse zu bilden.

Die beiden Holzarten Fichte und Kiefer sind somit in den jeweiligen Normen mit durchaus realistischen und nachvollziehbaren Werten eingebunden. Zu dem mit 0,9 mm/min im Eurocode 5 etwas höher angegebenen Wert für Massivholzplatten mit ρ = 450 kg/m<sup>3</sup> und d = 20 mm lagen keine Vergleichswerte vor.

### 1.3.3. Andere Nadelhölzer

Tabelle 4: Abbrandgeschwindigkeiten anderer Nadelhölzer

Holzart	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	β (mm/min)	Autoren
<b>Douglasie</b>			
Pseudotsuga menziesii	-	0,65	TRUAX 1959**
Pseudotsuga menziesii	0,36 – 0,60	0,50 – 0,76	SCHAFFER 1967
Pseudotsuga menziesii	0,59	0,55 – 0,91	ROGOWSKI 1967
Pseudotsuga menziesii	0,48	0,48	WHITE und SCHAFFER 1981
<b>Tanne</b>			
Abies spp. (BSH)	-	0,6	ÖDEEN 1967
<b>Yedo-Fichte</b>			
Picea jezoensis	0,41	0,6 – 0,8	IMAZUMI 1962**
<b>Lärche</b>			
Larix spp.	0,56 – 0,58	0,50 – 0,60	HOCH 1998
<b>Amerikanische Kiefern</b>			
Southern pine***	-	1,1	U.S. FPL* 1936**
Southern pine***	0,40 – 0,65	0,72 – 0,80	SCHAFFER 1967
Southern pine***	0,49 – 0,55	0,42 – 0,87	WHITE und SCHAFFER 1981
<b>Westliche Hemlocktanne</b>			
Tsuga heterophylla	0,47	0,59	BAUER 1995
Tsuga heterophylla	0,57	0,58	KETTLER 1994
Tsuga heterophylla	0,45 – 0,53	0,58 – 0,62	TOPF und HOCH 1995
Tsuga heterophylla	0,55	0,49 – 0,72	ROGOWSKI 1967

Tsuga heterophylla	0,45 – 0,53	0,58 – 0,62	HOCH 1998
<b>Riesenlebensbaum</b>			
Thuja plicata	0,38	0,69 – 0,88	ROGOWSKI 1967
<b>Zypresse</b>			
Cupressus spp.	-	0,74	U.S. FPL* 1936**
<b>Sugar pine</b>			
Pinus lambertiana	-	0,9	U.S. FPL* 1936**
<b>Strobe/Gebirgsstrobe</b>			
White pine****	-	0,69	U.S. FPL* 1936**
<b>Nadelholz</b>			
Nadelholz (GK I+II)	0,3 – 0,48	0,7	STANKE et al.1973
Nadelholz (GK II)	-	0,6 – 1,1	MEYER-OTTENS 1976

\* Forest Products Laboratory

\*\* zitiert von SCHAFFER 1966

\*\*\* Unter „Southern pine“ versteht man die Zusammenfassung mehrerer im südlichen Teil der USA wachsenden Kiefernarten (Pinus elliottii, Pinus palustris, Pinus virginiana, Pinus echinata, Pinus clausa u.a.).

\*\*\*\* Unter „White pine“ versteht man die beiden Kiefernarten Pinus strobus (Eastern white pine) und Pinus monticola (Western white pine).

Die Abbrandwerte aller übrigen ermittelten Nadelbaumarten [Tabelle 4] wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in einer Tabelle zusammengefasst. Die Werte für Cupressus (Cypress), Southern pine, Pinus lambertiana (Sugar Pine) und White pine, ermittelt im U.S. Forest Products Laboratory und zitiert von SCHAFFER 1966, sind aufgrund ihrer Ermittlung mit Vorsicht zu betrachten. Die Versuche wurden an 1-Zoll-dicken (25,4 mm) Brettern durchgeführt, allerdings unter ASTM E 119 Brandbedingungen, d.h. einer Temperaturkurve, die der ETK entspricht. Der Versuch wurde bei Durchbrand (!) der Bretter abgebrochen.

Die ermittelten Werte für Yedo-Fichte (Picea jezoensis) nach IMAIZUMI (1962) als auch der von ÖDEEN (1967) angegebene Wert für Tanne (Abies spp.) passen sich den Werten von Picea abies [Tabelle 1] an.

Auch die Werte für Nadelholz der Güteklassen I + II nach STANKE et al. (1973) fallen mit einem  $\beta = 0,7$  mm/min in den Bereich der aus Tabelle 6 hervorgehenden Abbrandwerte für Picea abies (Fichte) und stimmen damit auch mit den in den Normen [Tabelle 3] aufgeführten Richtwerten überein.

Der von MEYER-OTTENS (1976) angegebene Wertebereich mit bis zu 1,1 mm/min für Nadelholz der Güteklasse II wird mit der auf der Balkenunterseite auftretenden Biegebeanspruchung erklärt, welche einen negativen Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit an der Balkenunterseite haben soll.

Der von HOCH (1998) angegebene Wertebereich von 0,50 – 0,60 mm/min für Lärche (Larix spp.) liegt schon relativ deutlich unterhalb der Normwerte für Nadelholz. Hier könnte evtl. eine differenziertere Abstimmung der Abbrandwerte in den Normen [Tabelle 3] angebracht sein, falls sich diese Literaturwerte in weiteren Versuchen bestätigen sollten.

Die drei Abbrandwerte bzw. -wertebereiche für Southern pine unterscheiden sich deutlich. Der höchste Wert von  $\beta = 1,1$  mm/min hängt wohl mit der anfangs angesprochenen Versuchsdurchführung zusammen. Auch die Werte für Southern pine von SCHAFFER (1967) und WHITE und SCHAFFER (1981) weisen deutliche Abweichungen auf. Die Werte von  $\beta$  liegen bei SCHAFFER (1967) in einem sehr engen Bereich (0,72 – 0,80 mm/min), während die Werte von WHITE und SCHAFFER (1981) mit 0,42 – 0,87 mm/min einen erheblichen Streubereich aufweisen. Dies könnte evtl. daran liegen, dass unter dem Namen „Southern pine“ mehrere Kie-

fernarten zusammengefasst sind (siehe Fußnote \*\*\*, Tabelle 4). Nur aus der Rohdichte lassen sich diese unterschiedlichen Abbrandergebnisse nicht erklären. Der Rohdichtebereich bei WHITE und SCHAFFER (1981) liegt mit 0,49 – 0,55 g/cm<sup>3</sup> in einem deutlich engeren Rahmen als bei SCHAFFER (1967) mit 0,40 – 0,65 g/cm<sup>3</sup>. Dies bedeutet, dass aus einem deutlich engeren Rohdichtebereich eine weitaus größere Streuung von Abbrandgeschwindigkeiten ermittelt wurde als aus einem weiter gefassten Rohdichtebereich.

Die Westliche Hemlocktanne (*Tsuga heterophylla*) fällt auch gut mit dem Abbrandbereich der Fichte (*Picea abies*) zusammen. Die Abbrandgeschwindigkeit liegt nach ROGOWSKI (1967) in einem relativ breiten Rahmen von 0,49 – 0,72 mm/min. Der aus den Versuchen von BAUER (1995), KETTLER (1994), HOCH (1998), TOPF und HOCH (1995) gebildete Abbrandrahmen von 0,58 – 0,62 mm/min ist dagegen deutlich enger. Dies liegt wohl auch daran, dass letztere ihre Versuche am selben Kleinbrandofen (Institut für Holzforschung München) unter gleichen Bedingungen (z.B. 30-minütige Branddauer, ETK) durchgeführt hatten.

*Pseudotsuga menziesii* (Douglasie) streut in der Abbrandgeschwindigkeit zwischen 0,48 und 0,91 mm/min. Auch hier wurde der weiteste Streubereich der Abbrandgeschwindigkeit von ROGOWSKI (1967) angegeben. Orientiert man sich nach diesen Ergebnissen, dürfte die Douglasie nicht unter das in den Normen [Tabelle 3] angegebene Nadelholz fallen. Möglicherweise spielen auch hier, wie bereits bei den Werten für Kiefer, die verschiedenen Querschnittsformen, die unterschiedliche Verleimung und die unterschiedliche Branddauer als Ursache für den großen Streubereich eine Rolle. Nach BAUER, KETTLER, TOPF und HOCH dagegen liegt die Abbrandrate von Douglasie in einem engeren und auch niedrigeren Bereich von 0,58 – 0,62 mm/min und würde demnach unter die in den Normen angegebenen Berechnungswerte für Nadelholz fallen.

*Thuja plicata* (Riesenlebensbaum) liegt mit 0,69 – 0,88 mm/min etwas höher als die Normwerte für Nadelholz von 0,7 bzw. 0,8 mm/min.

#### 1.3.4. Laubhölzer

Tabelle 5: Abbrandgeschwindigkeiten von Laubhölzern

<i>a) Tropische Laubhölzer (1)</i>			
Holzart	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Teak</b>			
<i>Tectona grandis</i>	-	0,35	ÖDEEN 1967
<i>Tectona grandis</i>	0,63	0,43	RASHID 1988
<b>Makoré</b>			
<i>Thiaghemella heckelii</i>	0,65	0,45	HOCH 1998
<b>Sipo-Mahagoni</b>			
<i>Entandrophragma utile</i>	0,64	0,46	HOCH 1998
<b>Sapelli-Mahagoni</b>			
<i>Entandrophragma cyl.</i>	0,67	0,50	HOCH 1998
<b>Koto</b>			
<i>Pterygota</i> spp.	0,75 – 0,76	0,53	HOCH 1998
<b>Keruing</b>			
<i>Dipterocarpus</i> spp.	0,79 – 0,95	0,53 – 0,55	RASHID 1988
<b>Framiré</b>			
<i>Terminalia ivorensis</i>	0,49	0,57	BAUER 1995
<i>Terminalia ivorensis</i>	0,53	0,56	TOPF und HOCH 1995
<i>Terminalia ivorensis</i>	0,53	0,56	HOCH 1998

<i>a) Tropische Laubhölzer (2)</i>			
Holzart	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Meranti</b>			
Shorea spp.	0,53	0,57	BAUER 1995
Shorea spp.	0,58 – 0,60	0,54 – 0,59	HOCH 1998
Shorea spp.	0,64	0,54	KETTLER 1994
Shorea spp.	0,54 – 0,56	0,56 – 0,59	LACHE 1992
Shorea spp.	0,61	0,65	RASHID 1988
Shorea spp.	0,58 – 0,60	0,54 – 0,59	TOPF und HOCH 1995
<b>Wengé</b>			
Millettia laurenti	0,79 – 0,81	0,56 – 0,57	HOCH 1998
<b>Limba</b>			
Terminalia superba	0,51 – 0,54	0,61	HOCH 1998
<b>Abachi</b>			
Triplochiton scleroxylon	0,45	0,69	KETTLER 1994
Triplochiton scleroxylon	0,39	0,69	TOPF und HOCH 1995
Triplochiton scleroxylon	0,39	0,69	HOCH 1998
<b>Abura</b>			
Mitragyna ciliata	0,57	0,71	BAUER 1995
Mitragyna ciliata	0,57	0,73	TOPF und HOCH 1995
Mitragyna ciliata	0,57	0,73	HOCH 1998
<b>Ramin</b>			
Gonystylus macrophyllum	0,65	0,76	HOCH 1998
<b>Tepa</b>			
Laurelia serrata	0,57	0,90	KETTLER 1994
Laurelia serrata	0,52 – 0,57	0,86 – 0,88	TOPF und HOCH 1995
Laurelia serrata	0,52 – 0,57	0,86 – 0,88	HOCH 1998
<b>Kokospalme</b>			
Cocos nucifera	0,32 – 1,01	0,65 – 1,06	LACHE 1991
<i>b) Laubhölzer der gemäßigten Breiten (1)</i>			
Holzart	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Eiche</b>			
Quercus spp.	-	0,35	ÖDEEN 1967
<b>Stieleiche</b>			
Quercus robur	0,56 – 0,86	0,50	RÖLL 1984
Quercus robur	0,66	0,55 – 0,60	LACHE 1992
Quercus robur	0,78	0,52	KETTLER 1994
Quercus robur	0,80	0,50	BAUER 1995
Quercus robur	0,77	0,49 – 0,52	TOPF und HOCH 1995
Quercus robur	0,77	0,49 – 0,52	HOCH 1998
<b>Weißliche</b>			
Quercus alba	-	0,59	U.S. FPL* 1936**
Quercus alba	0,58 – 0,90	0,43 – 0,58	SCHAFFER 1967
Quercus alba	0,79	0,58	WHITE und SCHAFFER 1981
<b>Roteiche</b>			
Quercus rubra	-	0,79	U.S. FPL* 1936**

<i>b) Laubhölzer der gemäßigten Breiten (2)</i>			
Holzart	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ (mm/min)	Autoren
<b>Buche</b>			
Fagus sylvatica	0,69 – 0,70	0,72 – 0,80	LACHE 1992
Fagus sylvatica	0,73	0,75	KETTLER 1994
Fagus sylvatica	0,70	0,75	TOPF und HOCH 1995
Fagus sylvatica	0,75	0,67	BAUER 1995
Fagus sylvatica	0,70	0,75	HOCH 1998
<b>Nussbaum</b>			
Juglans spp.	0,58 – 0,65	0,50 – 0,55	HOCH 1998
<b>Esche</b>			
Fraxinus excelsior	0,61	0,66	KETTLER 1994
Fraxinus excelsior	0,73	0,56	BAUER 1995
Fraxinus excelsior	0,69	0,57	TOPF und HOCH 1995
Fraxinus excelsior	0,69 – 0,71	0,57 – 0,68	HOCH 1998
<b>Ahorn</b>			
Acer spp.	0,63	0,61	BAUER 1995
Acer spp.	0,63	0,60	TOPF und HOCH 1995
Acer spp.	0,63	0,60	HOCH 1998
<b>Weißbuche</b>			
Carpinus betulus	0,78	0,66	KETTLER 1994
Carpinus betulus	0,74	0,66	TOPF und HOCH 1995
Carpinus betulus	0,74	0,66	HOCH 1998
<b>Birnbaum</b>			
Pyrus communis	0,67	0,78	HOCH 1998
<b>Birke</b>			
Betula spp.	-	0,86	U.S. FPL* 1936**
<b>Edelkastanie</b>			
Castanea spp.	-	0,75	U.S. FPL* 1936**
<b>Amerikanische Linde</b>			
Tilia americana	-	1,06	U.S. FPL* 1936**
<b>Zuckerahorn</b>			
Acer saccharum	-	0,9	U.S. FPL* 1936**

\* Forest Products Laboratory

\*\* zitiert von SCHAFFER 1966

\*\*\* cyl. = cylindricum

Die Abbrandgeschwindigkeiten der aus der Literatur ermittelten Laubhölzer erstrecken sich von sehr geringen Werten bei *Quercus* spp. (Eiche) und *Tectona grandis* (Teak) von 0,35 mm/min (ÖDEEN 1967) bis zu sehr hohen Werten bei *Tilia americana* (Amerikanische Linde) von 1,06 mm/min (U.S. Forest Products Laboratory 1936 zitiert von SCHAFFER 1966). Auch hier sei darauf hingewiesen, dass die vom U.S. FPL 1936 ermittelten Werte wegen der Art und Weise ihrer Ermittlung eine Sonderstellung einnehmen und deshalb auch mit Ausnahme der Abbrandwerte für Eiche (*Quercus alba*, *Quercus rubra*) an das Ende der Tabelle gestellt wurden.

Der ebenfalls bis über 1,0 mm/min steigende sehr breit gefächerte Bereich der Kokospalme (*Cocos nucifera*) soll in Kapitel 1.2.4 näher erläutert werden. Die Kokospalme wird, wie auch der in asiatischen Monsunwäldern heimische Teakholzbaum, hier unter dem Oberbegriff „tropische Laubhölzer“ geführt.

Betrachtet man die Literaturwerte der Laubhölzer gemäßiger Breiten, so fällt auf, dass die von LACHE (1992) ermittelte Abbrandgeschwindigkeit für *Fagus sylvatica* (Buche) mit 0,72 – 0,80 mm/min höher als die der meisten übrigen Laubhölzer liegt. Dies wiegt umso mehr, da *Fagus sylvatica* einen sehr hohen Rohdichtewert von etwa 0,70 g/cm<sup>3</sup> aufweist. Auch die von BAUER, KETTLER, HOCH, TOPF und HOCH ermittelten Rohdichten der Buche bewegen sich in einem ähnlichen Rahmen von 0,70 – 0,75 g/cm<sup>3</sup> bei Abbrandraten von 0,67 – 0,75 mm/min. *Shorea ssp.* (Meranti) als ein Vertreter der tropischen Laubhölzer weist eine geringere Rohdichte von 0,53 – 0,64 g/cm<sup>3</sup>, aber auch geringere Abbrandgeschwindigkeiten von 0,54 – 0,65 mm/min auf. An diesem Beispiel sieht man ganz deutlich, dass eine größere Rohdichte nicht auch eine kleinere Abbrandgeschwindigkeit nach sich zieht (siehe Kapitel 1.2.4.).

Vor allem das Abbrandverhalten der Buche als Laubholz gegenüber den übrigen Nadelhölzern, im Besonderen gegenüber *Picea abies* (Fichte), diente LACHE (1992) als Nachweis, dass die bisherige strenge Unterteilung der Abbrandgeschwindigkeiten in einerseits Laub- und andererseits Nadelhölzer in der DIN 4102 Teil 4 (3/81) nicht weiter haltbar war. Seine Erkenntnisse gingen teilweise in die Neuauflage des Holzbrandschutzhandbuches (KORDINA und MEYER-OTTENS, 1994) sowie in die DIN 4102 Teil 4 (3/94) und die Europäische Vornorm DIN V ENV 1995-1-2 [Tabelle 6] ein.

Das Monsunwald-/Tropenholz *Tectona grandis* (Teak) weist nach den Angaben von ÖDEEN (1967) und RASHID (1988) die ausgezeichneten Werte von 0,35 bzw. 0,43 mm/min auf. RASHID gibt hier für die Rohdichte den Wert 0,63 g/cm<sup>3</sup> an. *Tectona grandis* weist somit auch eine geringere Rohdichte als *Fagus sylvatica* (Buche) auf. Trotzdem liegt die Buche mit ihrer Abbrandrate fast doppelt so hoch wie *Tectona grandis*.

Auch die Eiche (*Quercus spp.*, vermutlich *Quercus robur*) schneidet nach ÖDEEN (1967) mit einer Abbrandgeschwindigkeit von ebenfalls 0,35 mm/min hervorragend ab. Dieser Wert steht im Widerspruch zu den ermittelten Werten von LACHE (1992) und RÖLL (1984). LACHE und RÖLL kamen bei *Quercus robur* (Stieleiche) auf einen Wertebereich von 0,55 bis 0,60 mm/min. Die Rohdichte von *Quercus robur* bei LACHE lag im Durchschnitt bei 0,66 g/cm<sup>3</sup>, RÖLL gibt einen großen Dichtebereich von etwa 0,56 – 0,86 g/cm<sup>3</sup> an. Dichtewerte zum Vergleich wurden von ÖDEEN auch hier nicht angegeben. Dies wäre gerade bei der Eiche interessant, da dieses Holz in seiner Rohdichte stark streuen kann. LACHE stellte hierbei eine Abhängigkeit der Abbrandrate von der Höhe der Rohdichte bei der Eiche fest, RÖLL dagegen nur in einem Dichtebereich zwischen 0,80 – 0,86 g/cm<sup>3</sup>. BAUER, KETTLER, HOCH, sowie TOPF und HOCH, liegen mit ihren Abbrandraten von 0,49 – 0,52 mm/min für *Quercus robur* noch etwas unter den Werten von LACHE und RÖLL. Der Rohdichtebereich bewegte sich im Rahmen von 0,77 – 0,80 g/cm<sup>3</sup>.

Bezüglich der Abbrandgeschwindigkeiten von *Quercus alba* (Weißeiche) stimmen die drei erwähnten Autoren (SCHAFFER 1967, WHITE und SCHAFFER 1981 und U.S. FPL 1936 zitiert von SCHAFFER 1966) weitgehend überein. Auch hier wurde eine Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Höhe der Rohdichte festgestellt. Die Werte bewegen sich im Rahmen von 0,43 – 0,59 mm/min. Dies entspricht etwa den Werten von *Quercus robur* (Stieleiche).

Somit könnte man den in Tabelle 10 aufgeführten Eichen einen Abbrandgeschwindigkeitsrahmen von 0,4 – 0,6 mm/min setzen, abgesehen von dem Wert für *Quercus rubra* (Roteiche), der vom U.S. FPL 1936 mit 0,79 mm/min ermittelt wurde. Auch hier stellt sich wiederum die Frage der Vertrauenswürdigkeit des Versuchsablaufs, da in der Versuchsreihe, wie schon des öfteren erwähnt, der Abbrandversuch bis zum Durchbrand der Probe durchgeführt wurde.

Eine mögliche Erklärung für den großen Unterschied im Abbrandverhalten der beiden einheimischen Laubhölzer Eiche und Buche liegt evtl. in deren unterschiedlichen Porenstrukturen (KLINGSCH et al., 1993). So wird das Entweichen von Zersetzungsgasen durch zahlreiche,

röhrenförmige Gefäße bei der zerstreutporigen Buche gefördert, während die thermische Zersetzung durch die ringporige Struktur der Eiche eher erschwert wird.

Die drei einheimischen Laubhölzer Esche (*Fraxinus excelsior*), Ahorn (*Acer spp.*) und Weißbuche (*Carpinus betulus*), die von BAUER, KETTLER, HOCH, sowie TOPF und HOCH, untersucht wurden, lassen sich in einen relativ eng begrenzten Abbrandrahmen von 0,56 – 0,68 mm/min zusammenfassen.

Das von HOCH (1998) geprüfte Nussbaumholz (*Juglans spp.*) kann sich mit seinen ausgezeichneten Abbrandwerten von 0,50 – 0,55 mm/min durchaus mit der Eiche messen, während Birnbaum (*Pyrus communis*) mit 0,78 mm/min wohl eher mit der Buche zu vergleichen wäre.

Die besten bzw. niedrigsten Abbrandgeschwindigkeiten weisen die Tropenhölzer Sipomahagoni (*Entandrophragma utile*), Makoré (*Thieghemella heckelii*) und das weiter oben schon erwähnte Teak (*Tectona grandis*) auf. Sie brennen alle mit < 0,50 mm/min ab.

Die Tropenhölzer Sapelli-Mahagoni (*Entandrophragma cylindricum*), Koto (*Pterygota spp.*), Keruing (*Dipterocarpus spp.*), Framiré (*Terminalia ivorensis*), Meranti (*Shorea spp.*) und Wengé zusammengefasst liegen bezüglich ihrer Abbrandwerte bei < 0,60 mm/min.

Derartige Abbrandwerte unter 0,60 mm/min werden bei unseren heimischen Laubhölzern nur von Eiche und Nussbaum erreicht, soweit aus den hier aufgeführten Literaturwerten hervorgeht.

Abbrandgeschwindigkeiten < 0,70 mm/min weisen Limba (*Terminalia superba*) und Abachi (*Triplochiton scleroxylon*) auf. Man beachte die große Differenz in den Rohdichten der beiden Hölzer.

Es folgen mit einer Abbrandrate < 0,80 mm/min die beiden Hölzer Abura (*Mitragyna ciliata*) und Ramin (*Gonystylus macrophyllum*).

Tepa (*Laurelia serrata*) weist bei einer Rohdichte von 0,52 – 0,57 g/cm<sup>3</sup> mit 0,86 – 0,90 mm/min die höchste Abbrandgeschwindigkeit der hier angeführten tropischen Laubhölzern auf.

Betrachtet man die ermittelten Abbrandwerte für Laubholz anhand der in den Normen angegebenen Werte zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer für Laubholz [Tabelle 6], so stellt sich die Frage, nach welcher Norm man sich orientieren sollte.

Tabelle 6: Abbrandgeschwindigkeiten von Laubholz (Vollholz) in gültigen Normen

Norm	Randbedingungen	$\beta$ (mm/min)
DIN 4102 Teil 4 (Abschnitt 5)	$\rho \geq 600 \text{ kg/m}^3$ außer Buche	0,56
ENV 1995-1-2 (nach Tab.3.1)	$\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$ (VH oder verleimt) und Eiche	0,5
	$\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$ (VH oder verleimt)	0,7

Nach DIN 4102 Teil 4 wird bei Laubholz von einer Rohdichte  $\geq 600 \text{ kg/m}^3$  ausgegangen, ausgenommen Buche. Dies entspräche laut Norm einer Abbrandgeschwindigkeit von 0,56 mm/min, also 70% der Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz aus Nadelholz.

Das bedeutet:  $\beta_{\text{Vollholz}} (\text{Laubholz}) = 0,7 \cdot 0,8 \text{ mm/min} = 0,56 \text{ mm/min} \quad (1.6)$

Nach Eurocode 5 wird schon ab einer Rohdichte  $\geq 450 \text{ kg/m}^3$  ein noch geringerer Abbrandwert von 0,5 mm/min angegeben, im Rohdichtebereich zwischen  $290 \text{ kg/m}^3$  und  $450 \text{ kg/m}^3$  soll mit 0,7 mm/min gerechnet werden.

Die Unterteilung des Laubholzes in den Dichtebereich von 290 – 450 kg/m<sup>3</sup> im Eurocode 5 (Teil 1-2) scheint fragwürdig, da laut Tabelle 5 nur ein einziges Holz, nämlich Abachi, mit einer ermittelten Rohdichte von 390 – 450 kg/m<sup>3</sup> in diesen Rahmen fiele. Alle anderen hier aufgeführten Laubhölzer liegen höher als 450 kg/m<sup>3</sup> bzw. 0,45 g/cm<sup>3</sup>.

Bei Betrachtung der drei heimischen Laubhölzer Esche (*Fraxinus excelsior*), Weißbuche (*Carpinus betulus*) und Ahorn (*Acer spp.*), die in ihren Rohdichten alle über 600 kg/m<sup>3</sup> bzw. 0,60 g/cm<sup>3</sup> liegen, wäre Esche gerade noch laut DIN 4102 mit 0,56 mm/min zu berechnen. Ahorn läge nach den ermittelten Abbrandwerten von BAUER, HOCH, sowie TOPF und HOCH schon etwas über dem Normwert und bei Weißbuche ergäbe sich eine Differenz von 1 mm/min, d.h. die in der Norm angeführte Abbrandrate für *Carpinus betulus* wäre 1 mm/min geringer als der tatsächlich ermittelte Wert für v. Im Eurocode 5 (Teil 1-2) erhöht sich diese Differenz natürlich noch aufgrund des noch geringer angegebenen Abbrandwertes von 0,5 mm/min und einer Mindestrohichte von 450 kg/m<sup>3</sup> bzw. 0,45 g/cm<sup>3</sup>.

Framire (*Terminalia ivorensis*) dagegen wäre nach DIN 4102 mit seiner Rohdichte < 600 kg/m<sup>3</sup> nicht „normgerecht“, obwohl es durchaus der in der Norm ausgewiesenen Abbrandgeschwindigkeit von 0,56 mm/min entsprechen würde.

Andererseits besitzt Ramin (*Gonystylus macrophyllum*) eine relativ hohe Abbrandrate von 0,76 mm/min. Aufgrund seiner hohen Rohdichte von etwa 650 kg/m<sup>3</sup> bzw. 0,65 g/cm<sup>3</sup> würde hier laut DIN 4102 mit 0,56 mm/min und laut Eurocode 5 (Teil 1-2) mit 0,50 mm/min Abbrandrate gerechnet. Dies entspräche bei einer F60-Stütze einem Unterschied von etwa 3,2 cm, bezogen auf den Querschnitt der Stütze.

Diese Beispiele lassen sich beliebig fortsetzen und führen prinzipiell zu dem Schluss, dass bezüglich der Abbrandgeschwindigkeit sowohl eine Einteilung in Laub- und Nadelholz als auch eine Abhängigkeit von Rohdichten als nicht befriedigend erscheint.

1.3.5. Holzwerkstoffe

Tabelle 7: Abbrandgeschwindigkeiten von Holzwerkstoffen (HWS)

HWS	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	β (mm/min)	Autoren
Spanplatte (Fichte)	0,480	0,73	HUNTIEROVÁ 1995
Spanplatte (Fichte)	0,486	0,67	LACHE 1992
Spanplatte (Fichte)	0,580	0,64	HUNTIEROVÁ 1995
Spanplatte (Fichte)	0,601	0,65	LACHE 1992
Spanplatte (Fichte)	0,720	0,57	HUNTIEROVÁ 1995
Spanplatte (Fichte)	0,753	0,59	LACHE 1992
Schichtholz (Fichte)*	-	0,68	HUNTIEROVÁ 1995
Schichtholz (Fichte)*	0,512	0,65	LACHE 1992
Schichtholz (Fichte)*	0,520	0,82	MIKKOLA 1990 (10%u)
Sperrholz (Pappel)	0,505	0,96	LACHE 1992
Sperrholz (Buche)	-	0,77	HUNTIEROVÁ 1995
Sperrholz (Buche)	0,764	0,66	LACHE 1992
Sperrholz (Birke)	0,640	1,14	MIKKOLA 1990 (8%u)
Spanplatte	0,670	0,97	MIKKOLA 1990 (8%u)
Faserplatte	0,300	1,80	MIKKOLA 1990 (8%u)

\* KERTO-Q (Furnierschichtholz)

Betrachtet man die Abbrandwerte der Spanplatten aus Fichte in Tabelle 7, so ist zu erkennen, dass mit zunehmender Rohdichte (0,480 – 0,720 g/cm<sup>3</sup>) auch die Abbrandgeschwindigkeit sinkt (0,73 – 0,57 mm/min), abgesehen von dem letzten Wert Spanplatte (Fichte) von LACHE (1992). Die Abbrandgeschwindigkeit bei Spanplatten aus Fichte scheint also bis zu einem gewissen Grad dichteabhängig.

Die Literaturwerte für das Furnierschichtholz KERTO-Q stimmen bei LACHE (1992) und HUNTIEROVÁ (1995) mit 0,65 mm/min bzw. 0,68 mm/min sehr gut überein. MIKKOLA (1990) liegt auch hier aufgrund seiner Messmethode (Kegelkalorimeter) mit 0,82 mm/min deutlich über den Ergebnissen der beiden erstgenannten Autoren. Die Rohdichte von KERTO-Q dürfte auch bei HUNTIEROVÁ in einem ähnlichen Bereich wie bei LACHE und MIKKOLA liegen, da es sich bei KERTO-Q um einen von der gleichen Firma in Serie produzierten Holzwerkstoff handelt.

Zu den aufgeführten Sperrhölzern lassen sich untereinander nur schwer Vergleiche ziehen.

Die von MIKKOLA (1990) aufgeführte Faserplatte fällt mit ihrer sehr hohen Abbrandgeschwindigkeit von 1,96 mm/min deutlich aus dem Rahmen, was jedoch in diesem Fall weniger mit der Messmethode MIKKOLAs als vielmehr mit der sehr geringen Rohdichte von 0,300 g/cm<sup>3</sup> dieses Holzwerkstoffes zusammenhängt. Im Übrigen würde diese Platte wohl eher als Dämmstoff denn als ein Stabilitätselement eingesetzt werden.

Tabelle 8: Abbrandgeschwindigkeiten von Holzwerkstoffen in den Normen

Norm	Holzwerkstoff	Randbedingungen*	β (mm/min)
DIN 4102 Teil 4 (Abschnitt 5)	-	-	-
ENV 1995-1-2	Sperrholz	ρ = 450 kg/m <sup>3</sup> , d = 20 mm	1,0
(nach Kap.3.1(3))	andere HWS-Platten	ρ = 450 kg/m <sup>3</sup> , d = 20 mm	0,9

\* bei abweichenden Randbedingungen wird β modifiziert durch:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_{0,450,20} k_p k_t \quad [\text{mm/min}] \quad (1.6)$$

mit  $k_p = (450/\rho_k)^{1/2}$  und  $k_t = \min \{ (20/t_p)^{1/2} ; 1,0 \}$

β<sub>0</sub>: Abbrandgeschwindigkeit [mm/min]  
 β<sub>0,450,20</sub>: β<sub>0</sub> bei ρ = 450 kg/m<sup>3</sup> und d = 20 mm [mm/min]  
 ρ<sub>k</sub>: Rohdichte des vorliegenden Holzwerkstoffs [kg/m<sup>3</sup>]  
 t<sub>p</sub>: Dicke des vorliegenden Holzwerkstoffs [mm]

Im Vergleich zu den im Eurocode 5 (ENV 1995-1-2) angegebenen Abbrandgeschwindigkeiten [Tabelle 7] zeigt sich der für Pappelsperrholz angegebene Wert von 0,97 mm/min bei einer Rohdichte von 0,505 g/cm<sup>3</sup> bzw. 505 kg/m<sup>3</sup> als in etwa dem Normwert entsprechend. Die beiden Werte für Buchensperrholz von 0,66 mm/min (LACHE 1992) und 0,77 mm/min (HUNTIEROVÁ 1995) liegen dagegen deutlich unter der in der Norm angegebenen Abbrandgeschwindigkeit. Allerdings weist das von LACHE untersuchte Buchensperrholz mit 764 kg/m<sup>3</sup> - bei HUNTIEROVÁ ist kein ρ angegeben - auch eine deutlich höhere Rohdichte auf, als mit 450 kg/m<sup>3</sup> in der Norm angegeben ist. Aus diesem Grund werden in der ENV 1995-1-2 die Koeffizienten k<sub>p</sub> und k<sub>t</sub> [Tabelle 8] angegeben, mit deren Hilfe sich bei abweichender Rohdichte ρ oder Plattendicke d entsprechende Werte für β berechnen lassen. So errechnet sich bei Buchensperrholz (LACHE 1992) mit einer Dichte von 764 kg/m<sup>3</sup> und einer Dicke von 32,5 mm der Abbrandwert von 0,60 mm/min. Dieser nach Norm ermittelte Wert ist also noch günstiger, als die von LACHE im Versuch bestimmte Abbrandrate von 0,66 mm/min. Ein von HUNTIEROVÁ (1995) angegebener Wert für Spanplatte (Fichte) von 0,57 mm/min bei einer Rohdichte von

720 kg/m<sup>3</sup> und einer Plattendicke von 38 mm ergibt nach EC 5 für „andere HWS-Platten“ eine Abbrandgeschwindigkeit von 0,52 mm/min. Auch hier fällt ähnlich wie bei dem Beispiel für Sperrholz und auch allen übrigen Abbrandwerten der Holzwerkstoffe von LACHE und HUNTIEROVÁ der aus der Norm berechnete Wert für  $\beta$  geringer aus, als der im Versuch ermittelte. Die im Eurocode 5 (ENV 1995-1-2) aufgeführten Werte bzw. Formeln zur Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit [Tabelle 8] führen zu geringfügig verminderten Werten bezüglich  $\beta$  und stellen die Abbrandeigenschaften der Holzwerkstoffe in ein günstigeres Licht, als sie die hier genannten tatsächlich gemessenen Werte darstellen.

#### 1.4. Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte

SCHAFFER (1967) stellte in seinen Abbranduntersuchungen eine deutliche Abhängigkeit der Abbrandrate von der Rohdichte der untersuchten Holzarten (Douglas fir, Southern pine, White oak) fest, d.h. mit zunehmender Rohdichte innerhalb einer untersuchten Holzart nehme die Abbrandgeschwindigkeit ab.

Auch im Holzbrandschutzhandbuch (KORDINA und MEYER-OTTENS, 1983) wurde die Abbrandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte des Holzes angegeben. Hier erfolgte eine pauschale Klassifizierung von Laubhölzern nach ihrer Rohdichte.

HAWLEY (1952, zitiert von SCHAFFER 1967) gibt an, dass eine geringe Rohdichte den Abbrand beschleunige, einerseits durch eine stärkere Hitzedurchdringung, andererseits auf Grund der größeren Oberfläche pro Gewichtseinheit.

KÖNIG (1992) schloss mit seinen Testergebnissen aus den Versuchen von NORÉN (1988) von dem Einfluss der Rohdichte auf den Abbrand von Schwedischer Fichte unter Belastung:

- 1) Die Rohdichte habe keinen Einfluss auf die Tiefe des Abbrands, der schließlich zum Tragfähigkeitsverlust führt. Proben mit geringeren Dichten verlieren in seinen Versuchen ihre Tragfähigkeit bei gleicher Abbrandtiefe wie Proben mit höherer Rohdichte, d.h. das Verhältnis Restquerschnitt zu Ausgangsquerschnitt bei Tragfähigkeitsverlust ist dichteunabhängig.
- 2) Die Dauer bis zum Verlust der Tragfähigkeit steige allerdings mit zunehmender Rohdichte. Dadurch ergebe sich eine Abnahme der Abbrandgeschwindigkeit bei steigender Rohdichte. Die Abbrandrate sei am oberen Dichtebereich etwa 10% geringer als am unteren Dichtebereich. Diese Ergebnisse stimmen mit denen von SCHAFFER (1969) weitgehend überein. Aufgrund des noch enger gefassten Dichtebereiches der hauptsächlich verwendeten Festigkeitsklassen sollte der Einfluss der Dichte laut KÖNIG in der Praxis ignoriert werden.

RÖLL (1984) untersuchte die Abbrandgeschwindigkeit von Fichte und Eiche in Abhängigkeit von der Rohdichte, der Anordnung der Jahrringe und der Zeit. Die Abbrandgeschwindigkeit erwies sich über die gesamte Versuchsdauer (abgesehen von den Anfangsminuten bis zur Bildung einer schützenden Kohleschicht) hin als konstant und betrug bei Fichte und Eiche jeweils etwa 0,5 mm/min. Es konnte im Gegensatz zu SCHAFFER (1967) keine Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von  $\rho$  festgestellt werden, ausgenommen in einem Dichtebereich von 0,80 – 0,86 g/cm<sup>3</sup> bei der Eiche. Hier war die Abbrandgeschwindigkeit geringer, als in den restlichen Dichtebereichen.

Auch LACHE (1992) stellte in seinen Versuchen am Kleinprüfstand bei Fichte, Kiefer, Buche und Meranti keine Korrelation zwischen steigender Rohdichte und abnehmender Abbrandgeschwindigkeit fest. Bei der Holzart Buche mit einer relativ hohen Rohdichte (0,7 g/cm<sup>3</sup>) stellte LACHE sogar eine höhere Abbrandgeschwindigkeit fest als bei Fichte mit relativ geringer Rohdichte (0,4 g/cm<sup>3</sup>). Nur innerhalb der Holzart Eiche konnte eine Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte ermittelt werden.

Die Versuchsergebnisse von RÖLL (1984) und LACHE (1992) lassen folgende Schlussfolgerungen zu: Eine Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte kann insofern nicht bestätigt werden, als mit einer Zunahme der Rohdichte eine Abnahme der Abbrandgeschwindigkeit erfolgt. Im Vergleich zu den von SCHAFFER (1967) durchgeführten Versuchen an *Pseudotsuga menziesii* (Douglasie), *Quercus alba* (Weißeiche) und Southern pine sowie den Testergebnissen von KÖNIG (1992) gibt es somit einen deutlichen Widerspruch.

Fazit: Um zu eindeutigen Ergebnissen zu kommen sind noch weitere Versuche in dieser Richtung und vor allem auch an mehreren verschiedenen Holzarten durchzuführen. Es ist wohl davon auszugehen, dass die Rohdichte bei vielen Holzarten als abbrandrelevante Eigenschaft nur eine untergeordnete oder gar keine Rolle spielt, während sie bei manchen Holzarten (z.B. Eiche) durchaus mit der Abbrandgeschwindigkeit korreliert. So stellte LACHE (1991) mit Abbrandversuchen am Holz der Kokospalme (*Cocos nucifera*) eine deutliche Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte fest. Dies war gut nachweisbar, da *Cocos nucifera* einen breiten Rohdichtebereich von 0,32 – 1,01 g/cm<sup>3</sup> (LACHE 1991, siehe Tabelle 5) hat. Mit abnehmender Rohdichte konnte in diesem Fall ein konsequentes Ansteigen der Abbrandgeschwindigkeit nachgewiesen werden.

Vergleiche und Schlussfolgerungen bezüglich  $\beta$  bei verschiedenen Rohdichten über unterschiedliche Holzarten hinweg sollten somit in Zukunft unterbleiben. Nur die Holzarten, bei denen eine Abhängigkeit der Abbrandrate von der Höhe der Rohdichte eindeutig nachgewiesen wurde, können bezüglich des Abbrandes nach der Rohdichte sortiert werden.

Oft spielen innerhalb der Holzart andere, noch nicht genau untersuchte Faktoren die tragende Rolle bezüglich der Abbrandrate. Dies könnten z.B. bestimmte Holzinhaltstoffe und die unterschiedliche Anatomie sein.

## **2. Abbrandverhalten von Bauholz in der nationalen und europäischen Normung**

### **2.1. DIN 4102 Teil 4 (März 1994)**

#### 2.1.1. Inhalt

Die DIN 4102 „Brandverhalten von Bauteilen und Baustoffen“ beschäftigt sich in ihrem Teil 4 mit klassifizierten Baustoffen, Bauteilen und Sonderbauteilen. Die Einteilung der Baustoffe nach deren Brandverhalten in verschiedene Baustoffklassen erfolgt in Abschnitt 2. Holz und Holzwerkstoffe fallen demnach in die Baustoffklasse B 2 (normalentflammbare Baustoffe). Die Definition verschiedener Baustoffklassen gilt als Voraussetzung für die Klassifizierung in Bauteile (Abschnitte 3 bis 8).

In Abschnitt 5 sind klassifizierte Holzbauteile mit Ausnahme von Wänden (Holzwände werden in Abschnitt 4 abgehandelt) aufgeführt. Diese werden in verschiedene Gruppen (Decken in Holztafelbauart, Holzbalkendecken, Dächer aus Holz und Holzwerkstoffen, Holzbalken, Holzstützen, Holz-Zugglieder, Verbindungen nach DIN 1052 Teil 1) aufgeteilt, in welchen die jeweiligen Feuerwiderstandsklassen der Bauteile ermittelt werden können.

#### 2.1.2. Bemessung für den Brandfall

Als Beispiel für die Bemessung von Holzbauteilen wird hier der Abschnitt 5.5 „Feuerwiderstandsklassen von Holzbalken“ und 5.6 „Feuerwiderstandsklassen von Holzstützen“ ausgewählt.

Es sind 11 Tabellen (Tab. 74 bis 84) zur Bemessung aufgeführt, aus denen sich die Feuerwiderstandsklassen für Stützen und Balken mit Rechteckquerschnitt ermitteln lassen, d.h. F 30-B

oder F 60-B. Hierbei wird zwischen Vollholz aus Nadelholz (VH-NH) und Brettschichtholz aus Nadelholz (BSH-NH) sowie zwischen 3- und 4-seitiger Brandbeanspruchung unterschieden. In den Tabellen sind die notwendigen Mindestbreiten  $b$  in [mm] angegeben, die für die zu erreichende Feuerwiderstandsklasse (F 30-B oder F 60-B) mindestens erfüllt sein müssen.

Die Mindestbreite  $b$  ist abhängig von:

- der Feuerwiderstandsdauer (F 30-B oder F 60-B)
- dem Seitenverhältnis  $h/b$
- der statischen Beanspruchung (Quotient aus ermittelter Spannung und zulässiger Spannung nach DIN 1052) bei Zug- bzw. Druckspannung
- der Brandbeanspruchung (3-seitig oder 4-seitig)
- dem Abstützungsabstand  $s$  (bei Balken) bzw. der Knicklänge  $s_k$  (bei Stützen)

In Abhängigkeit dieser Punkte lassen sich mit Hilfe der Tabellen entweder die Mindestbreiten von Holzträgern bzw. -stützen bestimmen, oder, was wohl mehr der Praxis entspricht, die Maße für ein nach DIN 1052 bemessenes Holzbauteil für den Brandfall überprüfen und, wenn notwendig, die Querschnitte durch höhere Mindestbreiten vergrößern.

Die Grundlagen zur Bemessung von Holzbauteilen nach DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 5 basieren generell auf der DIN 1052 „Holzbauwerke“ Teil 1 „Berechnung und Ausführung“ und Teil 2 „Mechanische Verbindungen“, sowie der DIN 4074 „Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit“ Teil 1 „Nadelschnittholz“.

Alle Angaben in den Tabellen 74 bis 83 gelten für Nadelhölzer nach DIN 1052 Teil 1 (April 1988), Tabelle 1, Zeile 1 (Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche, Douglasie, Southern Pine, Western Hemlock) sowie für Buche. Bei Laubhölzern (außer Buche) mit einer Rohdichte von  $\rho > 600 \text{ kg/m}^3$  nach Zeile 3 derselben Tabelle (Eiche, Teak, Keruing, Afzelia, Merbau, Angelique, Azobé, Greenheart) dürfen alle Werte der Tabellen 74 bis 83 mit 0,8 multipliziert werden.

Unter 5.5.2.4. werden bei der Berechnung der Breite  $b(t_f)$  und Höhe  $h(t_f)$  des Restquerschnitts die Abbrandgeschwindigkeiten  $v_{\text{Vollholz}} = 0,8 \text{ mm/min}$  und  $v_{\text{Brettschichtholz}} = 0,7 \text{ mm/min}$  angegeben. Diese beiden Abbrandraten beziehen sich auf Nadelholz.

Für die Abbrandgeschwindigkeit von Laubholz wurde 70% des Wertes für Nadelvollholz vereinbart, d.h.  $v_{\text{Laubholz}} = 0,56 \text{ mm/min}$  (SCHEER und KNAUF, 1993). Dieser Wert für Laubholz ist allerdings nicht in der DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 5 angegeben. Im Holz-Brandschutz-Handbuch (KORDINA und MEYER-OTTENS, 1994) wird in Kapitel 2.4.3 kurz darauf eingegangen.

Für die Ermittlung des Restquerschnittes gilt:

- bei 4-seitiger Brandbeanspruchung:  $b(t_f) = b - 2 \cdot v \cdot t_f$  [mm]  
 $h(t_f) = h - 2 \cdot v \cdot t_f$  [mm]
- bei 3-seitiger Brandbeanspruchung:  $b(t_f) = b - 2 \cdot v \cdot t_f$  [mm]  
 $h(t_f) = h - v \cdot t_f$  [mm]

$b$  : Breite

$h$  : Höhe

$t_f$  : Feuerwiderstandsdauer

Der Restquerschnitt wird hier zur Berechnung einer Bedingungsgleichung benötigt, und zwar bei Balken, bei denen die Schub- bzw. Scherspannung gegenüber dem Nachweis auf Biegung maßgebend ist. Im Gegensatz zum EC 5-1-2 werden in der DIN 4102 Teil 4 keine Abbrandgeschwindigkeiten zur tatsächlichen Bemessung von Holzbauteilen benötigt.

Kurz zusammengefasst verläuft die Brandbemessung für Holzbauteile in der nationalen Normung folgendermaßen:

In der DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 5 sind Tabellen aufgeführt, mit deren Hilfe sich bestimmte Querschnitte für bestimmte Feuerwiderstandsklassen ermitteln bzw. überprüfen lassen. Gleichungen zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer werden nicht angegeben. Die angegebenen Mindestquerschnitte gelten ausschließlich für nach DIN 1052 bemessene Bauteile.

## 2.2. EC 5 Teil 1-2 (DIN V ENV 1995-1-2)

### 2.2.1. Allgemeines

Der Eurocode 5 „Bemessung und Konstruktion von Holzbauten“ Teil 1-2 „Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“ (DIN V ENV 1995-1-2 bzw. EC 5-1-2) ist zur Zeit noch eine Europäische Vornorm (ENV), die alternativ zur DIN 4102-4 in Deutschland angewendet werden darf, allerdings nur in Verbindung mit dem Nationalen Anwendungsdokument (NAD).

In den Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau (EC 1 bis EC 9) werden ausschließlich die Methoden des passiven Brandschutzes behandelt, d.h. es werden Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Bauwerke zur Erhaltung deren Tragsicherheit und – wo notwendig – zur Beschränkung der Feuerausbreitung aufgestellt.

Da man sich auf europäischer Ebene nicht auf einheitliche Festlegungen einigen konnte, wurden Platzhalter („boxed values“, offene Werte) eingeführt. Die Mitgliedsländer von CEN sollen diese Platzhalter mit Werten ausfüllen, um ihrem jeweiligen Sicherheitsniveau zu entsprechen. Aus diesem Grunde wurden in den einzelnen Mitgliedsländern sogenannte Nationale Anwendungsdokumente (NAD) erstellt, um die Eurocodes in den jeweiligen Ländern anwendbar zu machen.

### 2.2.2. Inhalt des EC 5-1-2

Im Abschnitt *Allgemeines* wird darauf hingewiesen, dass der EC 5-1-2 nur in Verbindung mit EC 5-1-1 anzuwenden ist, d.h. nach DIN 1052 „kalt“ bemessene Holzbauteile dürfen nicht nach EC 5-1-2 „heiß“ bemessen werden. Eine Vermischung von nationaler und europäischer Normung ist demnach nicht zulässig.

Die heiße Bemessung erfolgt nach EC 5-1-2 bei Gebäuden, die aus Gründen der Brandsicherheit folgende Funktionen erfüllen müssen:

- Verhinderung des vorzeitigen Tragfähigkeitsverlustes
- Begrenzung der Feuerausbreitung zwischen bestimmten Bereichen (Raumabschluss)

Der EC 5-1-2 beschreibt detaillierte Regeln für Entwurf, Berechnung und Bemessung von (Holz-) Konstruktionen, die in Übereinstimmung mit EC 5-1-1 bemessen sind.

Es werden *Leistungsanforderungen* definiert; darunter versteht man bei Tragwerken die Tragfähigkeit „R“, bei notwendigem Raumabschluss die Eigenschaft der Unversehrtheit „E“ und die thermische Isolierung „I“ auf der dem Feuer abgewandten Seite. So müssen Bauteile die Eigenschaften R, E und I folgendermaßen erfüllen:

- nur Raumabschluss: E und I
- nur Tragfähigkeit: R
- Raumabschluss und Tragfähigkeit: R, E und I

Diese Leistungsanforderungen entsprechen laut dem Nationalen Anwendungsdokument zum EC 5-1-2 (eigentl.: "Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1995-1-2") den Feuerwiderstandsklassen und sind den Feuerwiderstandsklassen von (Holz-) Bauteilen in DIN 4102-4 gleichzusetzen.

Im EC 5-1-2 wird v.a. die Leistungsanforderung der Tragfähigkeit R ausführlicher beschrieben. Die einzelnen Kapitel *Bemessungswerte der Werkstoffeigenschaften (Kap.2.3)*, *Bemessungsmethoden (Kap.2.4)*, *Nachweisverfahren (Kap.2.5)* und *Baustoffe (Kap.3)*, sowie die Definition der *Abbrandtiefe (Kap.3.1)* liefern die Grundlagen für die *Brandschutzbemessung (Kap.4)*. Hier werden verschiedene Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer angegeben, die zu diskutieren sind. Der folgende Abschnitt wird sich ausführlicher mit diesen Bemessungsverfahren auseinandersetzen.

### 2.2.3. Bemessung im Brandfall

Im EC 5-1-2 werden unter dem Kapitel *Brandschutzbemessung (Kap.4)* drei Möglichkeiten angegeben, Bemessungen für den Brandfall durchzuführen.

#### 2.2.3.1. Bemessung mit ideellem Restquerschnitt (Methode 1)

Dies ist die einfachste, jedoch auch ungenaueste Methode zur Bemessung eines brandbeanspruchten Querschnitts (z.B. Balken oder Stütze). Zuerst wird der Abbrand vom Ausgangsquerschnitt zum verbleibenden Restquerschnitt berechnet. Als Abbrandrate wird mit den Werten  $\beta_0$  aus Tabelle 3.1 der Norm gerechnet. Anschließend wird noch, abhängig von der Branddauer, ein zusätzlicher Abbrand  $d_0$  von bis zu 7mm zum tatsächlichen Abbrand  $d_{char}$  addiert. Dies ergibt dann den sogenannten ideellen Abbrand  $d_{ef}$  (Gl.2.1). Der Faktor  $k_0$  kann nicht größer als 1 werden.

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 d_0 \quad (2.1)$$

mit  $d_0 = 7 \text{ mm}$

$$d_{char} = \beta_0 t \quad (2.2)$$

$$k_0 \leq 1,0$$

Somit ergibt sich ein ideeller Restquerschnitt, der um den Abbrand von bis zu 7 mm geringer ist als der tatsächliche Restquerschnitt. Als Ausgleich werden die Festigkeitseigenschaften des ideellen Restquerschnitts als nicht verringert betrachtet, d.h. die Bemessungswerte der Festigkeitseigenschaften entsprechen den Werten bei Normaltemperatur.

Diese Art der Bemessung wird von MAJAMAA (1991) näher ausgeführt. Es wird dabei von einer Übergangszone („transition zone“) zwischen noch nicht erwärmtem Holz bis zur Abbrandgrenze von etwa 50 mm Breite ausgegangen. Anhand einer Kurve, wie z.B. nach Abbildung 1 (Kap.1.1.1.), werden in 5mm-Schritten die jeweiligen Festigkeiten in % vom Ausgangswert ermittelt. Durch Addition dieser Werte und Multiplikation mit 5 mm erhält man eine Strecke < 50 mm, die einer Festigkeit von 100% entspricht, der Rest der Strecke entspricht einer Festigkeit von 0%. Für die restliche Strecke wurde dabei ein Wert von etwa 7mm errechnet, was den Wert für  $d_0 = 7\text{mm}$  erklärt. Die Addition von  $d_0$  zum Abbrand  $d_{char}$  führt schließlich

zum ideellen Restquerschnitt mit den angenommenen Festig- und Steifigkeitseigenschaften von 100%. Ein ähnliches Modell wurde 1986 von SCHAFFER (zitiert von MAJAMAA 1991) vorgestellt.

### 2.2.3.2. Bemessung mit reduzierter Festigkeit und Steifigkeit bei Normbeanspruchung (Methode 2)

Dieser Ansatz ist genauer als Methode 1 (Bemessung mit ideellem Restquerschnitt) und wird im EC 5-1-2 unter Anhang A näher erläutert.

Die Bemessung erfolgt demnach in 2 Schritten. Zuerst wird der Restquerschnitt ermittelt, anschließend erfolgt eine Modifizierung der einzelnen relevanten Festigkeiten und des E-Moduls. Der Restquerschnitt kann auf 2 Arten berechnet werden:

- 1) ohne Berücksichtigung des Eckabbrandes: Die Berechnung des Abbrandes erfolgt mit  $d_{\text{char}} = \beta_0 t$ , d.h. es wird mit denselben Abbrandraten  $\beta_0$  wie bei Methode 1 (ideeller Restquerschnitt) gerechnet. Anschließend wird, bei z.B. 4seitiger Brandbeanspruchung, der Restquerschnitt  $A_r$  wie folgt ermittelt:

$$A_r = (b - 2\beta_0 t)(h - 2\beta_0 t) \quad (2.2)$$

(mit  $\beta_0$  nach Tabelle 3.1 im EC 5-1-2)

- 2) unter Berücksichtigung des Eckabbrandes: Die Berechnung des Abbrandes erfolgt mit  $d_{\text{char}} = \beta t$ , d.h. es wird mit den z.T. deutlich geringeren Abbrandraten  $\beta$  aus Anhang A (Tabelle A.1) gerechnet. Allerdings wird vom vorläufigen Restquerschnitt anschließend noch der Eckabbrand abgezogen. Die Abbrandgrenze an den Ecken des Querschnitts wird als kreisförmig beschrieben, wobei sich der Radius  $r_t$  der Eckabbrandkreise zeitabhängig verändert. Bei derselben 4seitigen Brandbeanspruchung hieße das:

$$A_r = (b - 2\beta t)(h - 2\beta t) - r_t^2 (4 - \pi) \quad (2.3)$$

(mit  $\beta$  nach Tabelle A.1, Anhang A im EC 5-1-2)

$A_r$  : Restquerschnittsfläche

$b$  : Ausgangsbreite

$h$  : Ausgangshöhe

$t$  : Branddauer bzw. Feuerwiderstandsdauer

Bei einem Vergleich der beiden Berechnungswege für den Restquerschnitt ergeben sich bei der Berechnung unter Einbeziehung des Eckabbrandes (Gl.2.3) größere und somit für die Bemessung günstigere Restquerschnitte als ohne Berücksichtigung des Eckabbrandes (Gl.2.2). Hier liegt auch der Grund für die unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten aus Tabelle 3.1 und Tabelle A.1 des EC 5-1-2. Beim ungenaueren Verfahren soll mit den - zumindestens bei Nadelholz - ungünstigeren Werten aus Tabelle 3.1 gerechnet werden. Für Brandbemessungen bieten sich demnach die eckabbrandeinbeziehenden Berechnungen nach Gl.2.3 als vorteilhafter an. Dies gilt jedoch nur für Nadelholz.

Für Laubholz, dessen Restquerschnitt nach 1) ermittelt wird, ist ab  $450 \text{ kg/m}^3$  ein  $\beta_0 = 0,5 \text{ mm/min}$  angegeben. Bei der Ermittlung nach 2) soll ab  $350 \text{ kg/m}^3$  mit einem  $\beta = 0,54 \text{ mm/min}$  gerechnet werden. Dies bedeutet, dass bei Berechnung nach 2) schon vor dem Abzug des Eckabbrandes bereits eine geringere Querschnittsfläche vorliegt als bei der Berechnung nach 1).

Dieser Missstand sollte behoben werden. Die Abbrandraten bei der genaueren Ermittlung des Restquerschnitts unter Einbeziehung des Eckabbrandes müssen definitiv kleiner ausfallen als die Abbrandgeschwindigkeiten ohne Berücksichtigung des Eckabbrandes.

Somit bestehen also 2 Möglichkeiten zur Ermittlung der Querschnittsabnahme nach der hier beschriebenen Methode 2.

Da jedoch zusätzlich zur Querschnittsabnahme auch noch die Festigkeiten, bedingt durch die erhöhten Temperaturen im äußeren Bereich des Restquerschnitts, herabgesetzt werden, muss noch eine Modifizierung erfolgen. Dazu wird der Modifikationsfaktor  $k_{\text{mod,fi}}$  näher definiert. Der Faktorenwert ist abhängig von einer Konstante und dem Verhältnis des Umfangs zur Fläche des Restquerschnitts in  $[\text{m}^{-2}]$ . Der Faktor lautet:

- für die Biegefestigkeit:  $k_{\text{mod,fi}} = 1,0 - 1/200 \cdot p/A_r$
- für die Druckfestigkeit:  $k_{\text{mod,fi}} = 1,0 - 1/125 \cdot p/A_r$
- für die Zugfestigkeit und den E-Modul:  $k_{\text{mod,fi}} = 1,0 - 1/330 \cdot p/A_r$

$p$  : Umfang des Restquerschnittes

$A_r$ : Fläche des Restquerschnittes

Der Wert von  $k_{\text{mod,fi}}$  orientiert sich am Verhältnis des Restquerschnittsumfangs zur Restquerschnittsfläche. Die Werte von  $k_{\text{mod,fi}}$  sind  $< 1$  und setzen damit den charakteristischen Wert der Festigkeit bei Normaltemperaturen  $f_k$  herab.

Der Bemessungswert für die Festigkeit bei Brandbeanspruchung  $f_{\text{fi,d}}$  berechnet sich nach:

$$f_{\text{fi,d}} = k_{\text{mod,fi}} \cdot k_{\text{fi}} \cdot f_k / \gamma_{\text{M,fi}}$$

$f_k$  : charakteristischer Festigkeitswert bei Normaltemperaturen

$k_{\text{fi}}$  : Koeffizient,  $k_{\text{fi}} = 1,25$  für Vollholz,  $k_{\text{fi}} = 1,15$  für Brettschichtholz (nach NAD)

$\gamma_{\text{M,fi}}$  : Teilsicherheitsbeiwert,  $\gamma_{\text{M,fi}} = 1$  (nach NAD) ( $\Rightarrow$  hat keinen Einfluss auf  $f_{\text{fi,d}}$ )

Es muss noch erwähnt werden, dass die angegebenen Formeln für  $k_{\text{mod,fi}}$  im Anhang A des EC 5-1-2 ausschließlich für Nadelholz gelten. Somit kommt eine Bemessung für Laubhölzer nach Methode 2 vorerst nicht in Frage.

### 2.2.3.3. Generelle Bemessungsmethode (Methode 3)

Bei dieser allgemeinen Methode sollen sowohl Temperatur- und Feuchtigkeitsgehalte in jedem Punkt des (Rest-)Querschnitts berücksichtigt werden, als auch deren Auswirkungen auf die Steifigkeits- und Festigkeitswerte. In Anhang E des EC 5-1-2 werden hierfür zusätzliche Informationen zu den thermischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen, wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, angegeben. Es liegen keine Berechnungsmodelle vor.

Die Anwendung der generellen Bemessungsmethode ist nach dem Nationalen Anwendungsdokument nicht freigegeben.

Des Weiteren sind nur Bemessungsmethoden für Normbrandbeanspruchungen (ETK) zulässig. Somit darf auch Anhang D des EC 5-1-2, der sich mit parameterabhängiger Brandbeanspruchung befasst, nur nach Absprache mit der Bauaufsichtsbehörde angewendet werden.

### 3. Bewertung der Normensituation

#### 3.1. DIN 4102 Teil 4

Die zur Zeit noch gültige nationale Norm zur Brandschutzbemessung, DIN 4102 Teil 4, hat einen entscheidenden Nachteil: Die in den Tabellen angegebenen Mindestquerschnittsbreiten und die Seitenverhältnisse  $h : b$  sind auf eine bestimmte Anzahl beschränkt. Es lassen sich keine beliebigen Querschnittsformen berechnen. Dies bedeutet eine nicht unerhebliche Einschränkung in den Möglichkeiten der Planung und Ausführung von Bauwerken.

Andererseits erscheinen die Formeln, welche zur Berechnung der Tabellenwerte in DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 5.5 angewendet wurden (siehe SCHEER und KNAUF, 1993), als äußerst komplex und für die Praxis eher ungeeignet.

Des weiteren beziehen sich die Tabellenwerte in DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 5.5 nur auf Nadelholz (Brettschicht- und Vollholz). Für Laubholz sollen die angegebenen Mindestbreiten mit dem Faktor 0,8 multipliziert werden. Diese Modifizierung mag zwar für die Praxis einfach zu berechnen sein, erscheint jedoch als zu ungenau für eine sinnvolle Bemessung für den Brandfall. Die Tragfähigkeit eines Bauteiles unter Brandbeanspruchung hängt zum einen von der Abbrandgeschwindigkeit  $\beta$  ab, die sich nicht mit einem bestimmten Wert für Laubholz charakterisieren lässt (siehe Kap.3.2.1.). Darüber hinaus differieren vermutlich auch die Festigkeitsabnahmen für Laubholz bei Temperaturanstieg gegenüber denen des Nadelholzes. Hierüber liegen den Autoren jedoch keine Untersuchungsergebnisse vor.

#### 3.2. EC 5-1-2

##### 3.2.1. Werte für die Abbrandgeschwindigkeit $\beta$

Im Gegensatz zur DIN 4102 Teil 4 sind im EC 5-1-2 die Abbrandgeschwindigkeiten eine wichtige Größe zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer. Allerdings sind die dort aufgeführten Werte für  $\beta$  zum Großteil nicht stimmig mit den in der Literatur aus Abbrandversuchen angegebenen Abbrandgeschwindigkeiten (siehe auch Kap.1.3.3).

Bezüglich der genaueren Bemessungsverfahren (Kap.2.2.3.2.) nach Anhang A des EC 5-1-2 sollte jedoch mit möglichst genauen Werten gerechnet werden. Hier erscheint vor allem die pauschalierte Abbrandrate für Laubholz in Tabelle A.1 von 0,54 mm/min als eher ungeeignet, denn die Abbrandgeschwindigkeit ist dem derzeitigen Wissenstand entsprechend vor allem holzartenspezifisch (LACHE 1990, RÖLL 1984 u.a.). Sie lässt sich nicht in die beiden Gruppen Laub- und Nadelholz aufteilen, wenngleich die baulich relevanten Nadelhölzer zum Großteil bei etwa 0,6 – 0,7 mm/min einzuordnen sind.

Weiterhin korrelieren die Abbrandraten nur in seltenen Fällen nachweislich mit der Rohdichte. Somit ergeben auch die Angaben für Mindestrohdsichten in den Tabellen für die Abbrandgeschwindigkeiten wenig Sinn.

Natürlich existiert eine positive Korrelation zwischen der Rohdichte und der Festigkeit des Restquerschnitts. Dieser Effekt hat jedoch keinen Einfluss auf die Verringerung des Querschnitts durch den Abbrand.

In Kapitel 1.3. wurden bereits einzelne Literatur-Werte mit den Werten aus Tabelle 3.1 des EC 5-1-2 verglichen. Dies sind jedoch die Abbrandwerte  $\beta_0$ , die zur Berechnung des ideellen Restquerschnitts (siehe Kap.2.2.3.1.) und auch zur Ermittlung des Restquerschnitts ohne Berücksichtigung des Eckabbrandes (siehe Kap.2.2.3.2. Punkt 1) dienen.

In Tabelle 9 erfolgt nun eine Gegenüberstellung der aus der Literatur ermittelten Wertebereiche für  $\beta$  verschiedener Laub- und Nadelhölzer und der Abbrandwerte für die genaue Bemessung nach Tabelle A.1 (Anhang A) des EC 5-1-2:

Tabelle 9: Gegenüberstellung von  $\beta$  aus Literatur und EC 5-1-2 (Tab.A.1)

Literaturwerte für	$\beta$ [mm/min]	Tab.A.1 in EC 5-1-2	$\beta$ [mm/min]
<i>Nadelholz</i>			
Fichte	0,51 – 0,70	Nadelvollholz	0,67
Kiefer	0,58 – 0,70	Nadelbrettschichtholz	0,64
Tanne	0,6		
Nadelholz (GK I+II)	0,7		
Lärche	0,50 – 0,60		
Westl. Hemlocktanne	0,58 – 0,62		
Douglasie	0,58 – 0,62		
Riesenlebensbaum	0,69 – 0,88		
<i>Laubholz gemäßigter Breiten</i>			
Eiche	0,4 – 0,6	Laubholz (VH und BSH)	0,54
Nussbaum	0,50 – 0,55	(Vollholz und Brettschichtholz)	
Esche	0,56 – 0,68		
Ahorn	0,60 – 0,61		
Weißbuche	0,66		
Buche	0,67 – 0,80		
Birne	0,78		
<i>Laubholz tropischer Breiten</i>			
Sipo-Mahagoni, Makoré,	0,43 – 0,46		
Teak			
Sapelli-Mahagoni, Koto,	0,50 – 0,59		
Keruing, Framire, Meranti,			
Wengé			
Limba, Abachi	0,61 – 0,69		
Abura, Ramin	0,71 – 0,76		
Tepa	0,86 – 0,90		

Tabelle 9 zeigt deutlich, dass vor allem das Laubholz nicht unter einem Wert zusammengefasst werden sollte. Eine Abbrandgeschwindigkeit von 0,54 mm/min ließe sich für Eiche und Nussbaum noch vertreten, würde aber spätestens bei Esche, bei der Abbrandraten bis zu 0,68 mm/min gemessen wurden, zu einer möglicherweise gefährlichen Verfälschung bei Querschnittsbemessungen für den Brandfall führen.

Hier stellt sich ein weiteres Problem. Eine exakte Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit einer Holzart ist nur schwer möglich. Hierfür gibt es mehrere Ursachen. Der Hauptgrund liegt in der Einhaltung von Versuchsbedingungen bei der Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeiten unter Normbeanspruchung (Näheres dazu in SEEMANN 2000). Es ist zur Zeit nur schwer möglich, sich auf einen genauen Abbrandwert einer Holzart, geschweige denn einer Holzartengruppe, mit zwei Nachkommastellen zu einigen. Es trifft eher selten zu, dass aus zwei verschiedenen Versuchen zur Abbrandmessung gleiche Abbrandwerte resultieren. Somit ergibt sich für jede Holzart ein mehr oder weniger breiter Streubereich für  $\beta$ . Natürlich sollten nur Versuche herangezogen werden, deren Versuchsbedingungen nachweislich den Normbrandbedingungen ent-

sprachen und ähnliche Messmethoden anwendeten (siehe Kap.1.3.). Eine derartige Aufstellung von ermittelten Wertebereichen für  $\beta$  findet sich in Tabelle 9.

Es werden nun zwei Möglichkeiten dargestellt, um von einem Wertebereich, wie er in der Tabelle meist angegeben ist, zu einem festen Wert für  $\beta$  zu gelangen:

1) Eine Möglichkeit wäre die Angabe des jeweils höchsten ermittelten Wertes für  $\beta$  (Tabelle 10). Die Holzarten sind hier nach steigenden Abbrandgeschwindigkeiten angeordnet. Bei den Tropenhölzern ergibt sich eine sehr große Spreitung zwischen 0,43 – 0,90 mm/min. Auch die Abbrandraten unserer heimischen Laubhölzer liegen bis zu 0,25 mm/min auseinander, die der heimischen Nadelhölzer dagegen maximal 0,10 mm/min.

Tabelle 10: Vorschlag für Abbrandtabelle mit den jeweils höchsten ermittelten  $\beta$ -Werten

<i>Nadelholz</i>	$\beta$ [mm/min]	<i>Tropenholz</i>	$\beta$ [mm/min]
Lärche	0,60	Teak	0,43
Hemlock, Douglasie	0,62	Makoré	0,45
Fichte, Kiefer, Tanne	0,70	Sipo-Mahagoni	0,46
<i>Laubholz</i>		Sapelli-Mahagoni	0,50
Nussbaum	0,55	Koto	0,53
Eiche	0,60	Keruing	0,55
Ahorn	0,61	Framiré, Wengé	0,57
Weißbuche	0,66	Limba	0,61
Esche	0,68	Meranti	0,65
Birne	0,78	Abachi	0,69
Buche	0,80	Abura	0,73
		Ramin	0,76
		Tepa	0,90

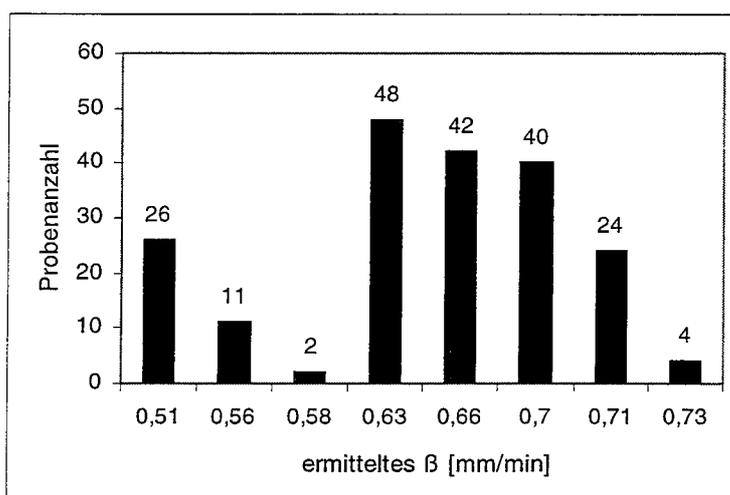
Daraus ließe sich folgendes schließen: Beim einheimischen Nadelholz ändert sich nur relativ wenig. Die Abbrandgeschwindigkeiten für Fichte, Kiefer und Tanne sollten hierbei auf 0,70 mm/min angehoben werden, während die Lärche auf 0,60 mm/min und Douglasie bzw. Hemlock auf 0,62 mm/min gesetzt werden sollten. Von einem Auf- oder Abrunden wird vorerst abgeraten; diese aus wissenschaftlichen Versuchen gewonnenen Abbrandwerte sollten so verwendet werden, wie sie auch ermittelt wurden (s. letzte Seite). Auch die Werte für das einheimischen Laubholz könnten wie in Tabelle 10 aufgeführt, übernommen werden.

Bei den Tropenhölzern stellt sich die Frage, welche dieser Hölzer tatsächlich als Bauholz in Frage kommen. Hierzu zählen in jedem Fall Teak, Meranti und evtl. Mahagoni. Über die Bedeutung der übrigen aufgeführten Holzarten wäre zu diskutieren. Für Brettschichtholz und Vollholz einer Holzart sollten, falls möglich, keine unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten angenommen werden. Die evtl. ungünstigere Eigenschaft von Vollholz, nämlich bei erhöhten Temperaturen Risse zu bilden, sollte nicht auf die Abbrandrate umgelegt werden, sondern evtl. in einen Sicherheitsfaktor bei der Ermittlung der Restquerschnittsfestigkeit einfließen. Die Abbrandrate einer Holzart sollte aus der Sicht der Autoren unverfälscht in der Norm vorliegen.

2) Eine zweite Möglichkeit bestünde in der Gewichtung der einzelnen (Mittel-) Werte für  $\beta$  einer Holzart nach der für ihre Ermittlung verwendeten Probenanzahl. Hierbei lassen sich nur jene Versuche verwerten, aus deren Versuchsbeschreibung Angaben über die Probenanzahl hervorgehen. Als Beispiel für die Berechnung sei die Holzart Fichte angeführt.

Tabelle 11: Verwendete Probenanzahl je Abbrandversuch bei Fichte

Einzelne Mittelwerte für $\beta$ (mm/min)	Anzahl der Proben	Autoren
0,66	19	DORN, EGNER 1966
0,73	4	HALL 1968
0,70	40	STANKE 1969
0,51	25	RÖLL 1984
0,63	48 (20%u)	LACHE 1992
0,71	24 (8%u)	LACHE 1992
0,66	20 (BSH-Träger)	LACHE 1992
0,58	2	KETTLER 1994
0,66	3	HUNTIEROVÁ 1995
0,51	1	BAUER 1995
0,56	6	TOPF, HOCH 1995
0,56	5	HOCH 1998



$\beta$ [mm/min]	Proben
0,51	26
0,56	11
0,58	2
0,63	48
0,66	42
0,70	40
0,71	24
0,73	4

Summe der Proben →

197

gewichteter MW für  $\beta$  →

0,64

Abbildung 3: Anzahl der Proben je ermitteltem  $\beta$ -Wert für Fichte

Es resultiert eine nach der Probenanzahl gewichtete mittlere Abbrandrate von 0,64 mm/min bei einer Anzahl von insgesamt 197 Proben für die Holzart Fichte.

Verfährt man bei allen untersuchten Holzarten auf dieselbe Weise, so ergibt sich folgendes Bild (Tabelle 12):

Tabelle 12: nach Probenanzahl gewichtete Abbrandgeschwindigkeiten von Holzarten

<i>Nadelholz</i>			<i>Tropenholz</i>		
	$\beta$ [mm/min]	Probenzahl		$\beta$ [mm/min]	Probenzahl
Lärche	0,55	2	Makoré	0,45	1
Hemlock	0,60	10	Sipo-Mahag.	0,46	1
Fichte	0,64	197	Sapelli-Mahag.	0,50	1
Douglasie	0,66	5	Koto	0,53	2
Kiefer	0,72	25	Framire	0,56	3
<i>Laubholz</i>			<i>Meranti</i>		
Eiche	0,53	66	Wengé	0,57	2
Nussbaum	0,53	2	Limba	0,61	2
Ahorn	0,60	3	Abachi	0,69	3
Esche	0,61	5	Abura	0,72	3
Weißbuche	0,66	3	Ramin	0,76	1
Buche	0,76	16	Tepa	0,88	5
Birne	0,78	1			
Nach EC 5-1-2:					
<i>Nadelholz</i>					
Vollholz	0,67				
Brettschichtholz	0,64				
<i>Laubholz</i>					
Voll- und BSH (Brettschichtholz)	0,54				

Die Werte für Nadelholz stimmen auch hier (Tab.12) weitgehend mit dem EC 5-1-2 überein, abgesehen von Lärche, deren Wert jedoch nur von zwei Proben repräsentiert wird.

Beim Laubholz führt auch die Auswertung nach der Probenhäufigkeit zu einer relativ hohen Spreitung bei den Abbrandgeschwindigkeiten. Am deutlichsten zeigt sich dies bei den Tropenhölzern. Auch wenn hier nur sehr wenige Proben getestet wurden, ergeben sich doch relativ deutliche Unterschiede in den Abbrandgeschwindigkeiten der einzelnen Hölzer. Ein Wert von 0,54 mm/min, wie in EC 5-1-2 angegeben, deckt nur einen Teilbereich der Laubhölzer ab und ist definitiv nicht repräsentativ für die Laubhölzer an sich, auch wenn baulich relevante Laubhölzer, wie z.B. Eiche oder Meranti relativ gut mit dem Wert der Euronorm übereinstimmen.

Insbesondere für die Buche als Bauholz sollte der EC 5 modifiziert werden.

### 3.2.2. Der Einfluss des Abbrandes auf die Bauteilbemessung nach EC 5 Teil 1-2

Zuletzt soll der tatsächliche Einfluss der Abbrandgeschwindigkeit  $\beta$  auf die Maße eines Bauteils bei Brandbeanspruchung näher betrachtet werden. Hierbei spielt die Genauigkeit von  $\beta$  eine Rolle. Aufgrund von Einwänden gegen eine Angabe von  $\beta$  "auf zwei Stellen hinterm Komma" soll im Folgenden begründet werden, warum eine solche Angabe sinnvoll ist.

1. Mathematisch betrachtet ist es ohne Belang, an welcher Stelle des  $\beta$ -Wertes das Komma steht. Relevant ist nur, ob  $\beta$  auf insgesamt (Vor- plus Nachkommastellen, die 0 nicht mitgezählt) zwei Stellen oder eine Stelle angegeben wird. Würde  $\beta$  statt in mm/min in cm/h angege-

ben (z. B. für Fichte 3,8 cm/h statt 0,64 mm/min, hier also ebenfalls zweistellige Angabe), käme eine solche Diskussion, die in erster Linie optisch motiviert ist, nicht auf.

2. Wollte man dennoch  $\beta$  nur auf eine Stelle hinter dem Komma angeben, stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss einer solchen Rundung auf die Bauteilbemessung wäre.

Tabelle 13: Differenzen im Abbrand bei Variation von  $\beta$

<i>Branddauer</i>	<i>a) <math>d_{char}</math> für <math>\beta = 0,1</math> mm/min</i>	<i>b) <math>d_{char}</math> für <math>\beta = 0,01</math> mm/min</i>
nach 30 min	3 mm	0,3 mm
nach 60 min	6 mm	<b>0,6 mm</b>
nach 90 min	9 mm	0,9 mm

Im ungünstigsten Fall entstände beim Runden ein Fehler von 0,05 mm/min für  $\beta$ , was bei einer Brandbeanspruchung von 60 min einem Abbrand von  $0,6 \text{ mm} \cdot 5 = 3 \text{ mm}$  entspräche, vgl. Tabelle 13.

Zusätzlich gilt zu beachten, dass der Abbrand meist 3- oder 4-seitig am beanspruchten Bauteil (Träger, Stütze) erfolgt.

In Tabelle 14 sind vier Beispiele für Querschnitte angegeben, die für 60 Minuten vierseitig brandbeansprucht sind.  $A_{r\beta_1}$  beschreibt die Restquerschnittsfläche mit  $\beta = 0,65$  mm/min und  $A_{r\beta_2}$  mit  $\beta = 0,6$  mm/min. Der Restquerschnitt  $A_r$  wurde jeweils nach Methode 2-2) (Kap.2.2.3.2.) ermittelt.

Tabelle 14: Vergleich von Restquerschnitten bei verschiedenen Abbrandraten, Beanspruchung 60 min

B	H	A [mm <sup>2</sup> ]	$A_{r\beta_1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{r\beta_2}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\Delta A_r$	Abweichung
260	260	67600	32351	34571	2220	6,9%
200	400	80000	38511	41211	2700	7,0%
200	600	120000	62911	66811	3900	6,2%
240	600	144000	83791	87931	4140	4,9%

$$\beta_1 = 0,6 \text{ mm/min}; \beta_2 = 0,65 \text{ mm/min}; \Delta A_r = A_{r\beta_2} - A_{r\beta_1}$$

Hier zeigt sich, dass bei ausreichend großen Querschnitten und einer Branddauer von 60 Minuten eine Rundung (von 0,05 mm/min) bei  $\beta$  zu deutlichen Abweichungen in der Fläche des Restquerschnitts ( $\Delta A_r$ ) von z. B. 7 % führen kann. Durch Rundung von  $\beta$  auf eine Stelle ergeben sich bei der Auslegung von Balken nach den o. g. Beispielen demnach um bis zu ca. 7% zu geringe oder zu große Querschnitte. Bei 90 min wären die Abweichungen entsprechend höher.

**Fazit:** Tabelle 12 enthält (auf der Basis aller Anfang 2000 weltweit für die Holzforschung München verfügbaren Versuche) detaillierte Angaben der Abbrandgeschwindigkeit.

Die baulich wichtigsten Hölzer sind bereits hinreichend untersucht worden. Die  $\beta$ -Werte weiterer Hölzer, die auf geringen Probenanzahlen beruhen, sollten, soweit ihre Aufnahme in den EC 5 sinnvoll ist, durch weitere gezielte Versuche abgesichert werden.

Die Angabe der Abbrandgeschwindigkeit auf zwei Stellen hinter dem Komma ist im Hinblick auf realitätsnahe Bauteilbemessung sinnvoll und bereits im EC 5 verwirklicht.

Für Laubholz (außer Eiche) existiert eine Inkonsistenz zwischen den beiden Bemessungsverfahren mit reduzierter Festigkeit und Steifigkeit des Anhangs A des EC 5 1-2.

#### 4. Literaturverzeichnis

- Abashidze G.S., Mirashvili L.I., 1980.** Method of reduction of wood ignitability. Symposium 9 in Tbilis, VTT (Technical Research Centre of Finland), Espoo, S.213-216.
- Bauer G., 1995.** Vergleichsversuche: Abbrandverhalten von verschiedenen Holzarten, die als Anleimer für Türblätter verwendet werden. Bericht Nr.954054, Institut für Holzforschung der Universität München, Februar/März 1995.
- Dreyer R., 1969.** Brettschichtverleimte Holzbalken unter Biege- und Feuerbeanspruchung. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, 2.Fachgespräch, 1969, Heft Nr.56, S.31-33.
- Dorn H., Egner K. 1961.** Brandversuche an geleimten Holzbauteilen. Holz-Zentralblatt Jg.87 (1961) Nr.28, S.435-438.
- Dorn H., Egner K., 1966.** Brandversuche an brettschichtverleimten Holzträgern unter Biegebeanspruchung. Vorträge zum Fachgespräch am 23.Oktober 1966 in Würzburg, DGfH, München, Bericht 1/67, S.21-34.
- Glos P., Henrici D., 1990.** Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. Institut für Holzforschung, Universität München, Abschlussbericht 87505, Projekt Nr. E-88/33.
- Hall G.S., 1968.** Fire Resistance Tests of Laminated Timber Beams. TRADA Research Report.
- Hoch A., 1998.** Abbrandverhalten verschiedener Holzarten und Holzwerkstoffe. Bericht Nr. 98 4 118, Institut für Holzforschung der Universität München, August 1998.
- Huntierová Z., 1995.** Analyse des Brandverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung von Feuerschutzmitteln. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Universität München, Buchverlag Gräfelfing.
- Kallioniemi P., 1980.** Fire resistance and protection of joints in timber structures. Symposium 9 in Tbilis, VTT (Technical Research Centre of Finland), Espoo, S.161-176.
- Kallioniemi P., 1980.** The strenght of wood structures during fires. Symposium 9 in Tbilis, VTT (Technical Research Centre of Finland), Espoo, S.145-156.
- Kersken-Bradley M., Klingsch W., Witte H., 1989.** Abbrandraten von Holz und Holzwerkstoffen (Kap.3.1), Auszug aus: Vereinfachende Regeln für die Brandschutzbemessung von Holz und Holzverbindungen, Juni 1989.
- Kettler A., 1994.** Vergleichsversuche: Abbrandverhalten von verschiedenen Holzarten, die als Anleimer für Türen verwendet werden. Bericht Nr. 94 4 080, Institut für Holzforschung der Universität München, 1994.
- Kirpichenkov G.M., Kasabyan L.V., Shlemin F.M., 1980.** Calculation of fire resistance of timber structures. Symposium 9 in Tbilis, VTT (Technical Research Centre of Finland), Espoo, S.103-117.
- Klingsch W., Tavakkol-Kah M., Wesche J., Kersken-Bradley M., 1993.** Temperatureentwicklung in brandbeanspruchten Holzquerschnitten. Schlussbericht des Forschungsvorhabens F-90/1 der DGfH mit finanzieller Unterstützung des DIBt.
- Knublauch E., Rudolphi R., 1971.** Der Abbrand als Grundlage zur theoretischen Vorausbestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen. bauen mit holz, 12/71, S.590-593.
- König J., 1992.** The effect of density on charring and loss of bending strenght in fire. Trätekk Rapport I 9210062, 8/92.
- Kordina K., Meyer-Ottens C., 1994.** Holz-Brandschutz-Handbuch. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH), München, 2.Auflage 1994.

- Lache M., 1991.** Orientierende Untersuchungen zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit ( $\beta$ ) von Kokospalme. Institut für Holzforschung der Universität München.
- Lache M., 1992.** Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffen. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Universität München, und Abschlussbericht des AIF-Forschungsvorhabens Nr. 7796 und 8744.
- Majamaa J., 1991.** Calculation models of wooden beams exposed to fire. VTT (Technical Research Centre of Finland), Research Notes 1282, Espoo, September 1991.
- Mikkola E., 1990.** Charring of wood. VTT (Technical Research Centre of Finland), Research Report 689, Espoo.
- Ödeen K., 1967.** Fire resistance of glued, laminated timber structures. Proceedings of the Symposium held at the Fire Research Station Boreham Wood, 1967, paper 2, S.7-14.
- Rashid A., 1988.** Fire resistance of timber doors. Housing & Property, S.45-49.
- Rogowski B., 1967.** Charring of timber in fire tests. Symposium No.3, Fire and structural use of timber in buildings. Proceedings of the Symposium held at the Fire Research Station Boreham Wood, 1967, paper 4, S.52-57.
- Röll H., 1984.** Untersuchung über Abbrandverhalten von Fichte und Eiche in Abhängigkeit von Rohdichte, Jahrringen und Zeit. Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Universität München.
- Schaffer E.L., 1967.** Charring rate of selected woods - transverse to grain. U.S. Forest Service Research Paper FPL 69, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, April 1967.
- Schaffer E.L., 1966.** Review of information related to the charring rate of wood. U.S. Forest service research note, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, November 1966.
- Scheer C., Knauf T., 1993.** Bemessung von Bauteilen nach nationalen und internationalen Regeln. Beitrag aus der 6. Brandschutztagung „Brandschutz im Holzbau“ in Würzburg am 14./15.06.1993, DGfH, München 1993.
- Seemann M., 2000.** Abbrandgeschwindigkeiten von Holz und Holzwerkstoffen. Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Technische Universität München.
- Stanke J., 1969.** Die Feuerwiderstandfähigkeit von belasteten Holzstützen. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, 2. Fachgespräch, 1969, Heft Nr.56, S.27-30.
- Stanke J., Klement E., Rudolphi R., 1973.** Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung. BAM-Bericht Nr.24.
- Topf P., Hoch A., 1995.** Zwischenbericht: Abbrandverhalten verschiedener Holzarten und Holzwerkstoffe. Bericht Nr. 95 4 082, Institut für Holzforschung der Universität München, 1995.
- White R.H., Schaffer E.L., 1981.** Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. Wood and Fiber, 13(1), S.17-38.
- Zapol M.Yu., 1980.** Fire resistance of laminated timber roof structures of public buildings. Symposium 9 in Tbilis, VTT (Technical Research Centre of Finland), Espoo.