

Vergleichende Sicherheitsbetrachtung
zur brandschutztechnischen Bemessung
unterschiedlicher Bauteile nach dem
 $t_{\ddot{a}}$ -Verfahren (DIN 18 230)

T 2160

T 2160

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

ABSCHLUSSBERICHT

zum Forschungsvorhaben

VERGLEICHENDE SICHERHEITSBETRACHTUNG ZUR BRANDSCHUTZTECHNISCHEN BEMESSUNG UNTERSCHIEDLICHER BAUTEILE NACH DEM $t_{\ddot{a}}$ -VERFAHREN (DIN 18 230)

im Auftrag des
Instituts für Bautechnik, Berlin
Az.: IV 1-5-459/86

Dietmar Hosser

Ulrich Schneider

August 1988
(Revision August 1989)

INHALT

	Seite
Vorbemerkung	II
Zusammenfassung	III
Summary	IV
Resumé	V
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung des Vorhabens	2
2.1 Gesamtzielsetzung	2
2.2 Einzelzielsetzungen	2
3. Brandstatistische Datenbasis	3
3.1 Ausgangssituation	3
3.2 Nutzungsklassen	4
3.3 Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden	4
3.4 Brandausbreitungswahrscheinlichkeit	6
4. Rechnerische Verfahren für den brandschutztechnischen Nachweis	8
4.1 Übersicht	8
4.2 Ermittlung der Brandwirkungen	9
4.3 Nachweis von Stahlbetonbauteilen	17
4.4 Nachweis von Stahlbauteilen	19
4.5 Nachweis von Holzbauteilen	20
5. Unsicherheiten beim brandschutztechnischen Nachweis	21
5.1 Übersicht	21
5.2 Streuungen der Brandwirkungen	22
5.3 Bauteilspezifische Modellunsicherheiten	23
5.4 Feuerwiderstand von Stahlbetonbauteilen	30
5.5 Feuerwiderstand von Stahlbauteilen	32
5.6 Feuerwiderstand von Holzbauteilen	32
5.7 Vergleich mit Ergebnissen von Normbrandversuchen	37
6. Schlußfolgerungen und Empfehlungen	40
6.1 Nachweiskonzept	40
6.2 Sicherheitskonzept	42
6.3 Vereinfachungsmöglichkeiten	43
7. Literaturhinweise	44
Anhang 1 Verteilungsannahmen für die zufällig streuenden Einflußgrößen	
Anhang 2 Ermittlung der Sicherheitsbeiwerte der DIN V 18 230 mit bisherigen und überarbeiteten Eingangsgrößen	

VORBEMERKUNG

Das Forschungsvorhaben "Vergleichende Sicherheitsbetrachtung zur brandschutztechnischen Bemessung unterschiedlicher Bauteile nach dem t_a -Verfahren (DIN 18 230)" wurde im Mai 1985 von König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Frankfurt/Main, gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider, Kassel, beim Institut für Bautechnik, Berlin, beantragt und im Dezember 1985 bewilligt. Im November 1986 schied König und Heunisch auf eigenen Vorschlag als Vertragspartner aus dem Werkvertrag aus; der Vertrag wurde auf Prof. Dr.-Ing. D. Hosser, Braunschweig, übertragen, der bereits vorher bei König und Heunisch für die Durchführung des Vorhabens verantwortlich war.

Der Abschlußbericht wurde im August 1988 als Entwurf fertiggestellt. Am 8./9. Dezember 1988 wurde er in München dem NABau-Arbeitskreis AK 12.04 "Baulicher Brandschutz im Industriebau - DIN 18 230 Teil 1" vorgestellt und im Grundsatz zustimmend zur Kenntnis genommen. Eine ausführliche Präsentation der Forschungsergebnisse erfolgte am 30./31. März 1989 in Leverkusen im NABau-Arbeitsausschuß 12.04 "Baulicher Brandschutz im Industriebau", der die Berücksichtigung der Forschungsergebnisse als eine Grundlage für die bevorstehende Überarbeitung der Vornorm DIN 18 230 beschloß. Die Vorgehensweise bei der praktischen Umsetzung wurde schließlich im o.g. Arbeitskreis 12.04 am 29./30.06.1989 festgelegt.

Redaktionelle Wünsche aus den Diskussionen in den genannten Gremien wurden in der vorliegenden revidierten Endfassung August 1989 des Abschlußberichtes berücksichtigt.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Forschungsvorhaben wurde einigen inzwischen offenkundig gewordenen Mängeln im Sicherheitskonzept der Vornorm DIN 18 230 nachgegangen. Sie betreffen unter anderem die systematischen Fehler durch Vernachlässigung der Bauteilabhängigkeit der äquivalenten Branddauer und die zum Teil zu günstigen Annahmen zur Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden und zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit sowie die zum Teil zu gering angesetzten zufälligen Streuungen der äquivalenten Branddauer und der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen. Die Ergebnisse der Überprüfung lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Die äquivalente Branddauer nach DIN V 18 230 erfaßt zutreffend tragende Einzelbauteile, deren Versagen im Brandfall durch Erreichen einer kritischen Temperatur von ca. 400 bis 600 °C im Bau- oder Betonstahlquerschnitt an der am stärksten beanspruchten Stelle eingeleitet wird. Näherungsweise dürfen stabilitätsgefährdete Stahlbeton- und Stahlstützen in gleicher Weise behandelt werden, wobei hier der Steifigkeitsverlust an der kritischsten Stelle bei etwa den o.g. Temperaturen für das Versagen im Brandfall entscheidend ist. Auch bei tragenden Holzbauteilen liegen die äquivalenten Branddauern in ähnlicher Größenordnung. Zusatzüberlegungen sind dagegen erforderlich, wenn Bauteile betrachtet werden, die primär dem Raumabschluß dienen und im Brandfall durch Überschreiten einer relativ geringen Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite (140 K bzw. 180) versagen. Hier kann t_a um bis zu 30 % höher ausfallen.

Im Sicherheitskonzept ist eine erhöhte durchschnittliche Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brände von etwa $5 \cdot 10^{-7}$ bis 10^{-6} je m^2 und Jahr anzunehmen. Außerdem sollten die ehemals mit 20 % abgeschätzten zufälligen Streuungen der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen auf 25 % angehoben werden. Bei sehr schmalen Holzbauteilen, die nach längerer Branddauer nur noch geringe Restquerschnitte aufweisen, ist der Anwendungsbereich so zu beschränken, daß die Querschnittsminderung durch Abbrand ca. 25 % nicht überschreitet. Bei einigen Sonderbauteilen treten größere Streuungen in der Feuerwiderstandsfähigkeit auf und die Wahrscheinlichkeit, bereits vor dem Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer zu versagen, liegt über den in DIN V 18 230 zugrundegelegten 10 %. Hier kann nur durch eine konsequente Qualitätssicherung vermieden werden, daß das angestrebte Sicherheitsniveau unterschritten wird.

Aufgrund der bisherigen Vergleichsrechnungen und Erfahrungen mit der DIN V 18 230 erscheint eine generelle Anhebung des Sicherheitsniveaus nicht gerechtfertigt. Daher wurde eine Neukalibrierung der erforderlichen Zuverlässigkeit vorgenommen, die sich an den bereits in verwendeten Eckwerten des Sicherheitskonzeptes orientierte. Hierbei zeigte sich, daß aus den derzeitigen Sicherheitsbeiwerten etwa eine Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f \cdot 10^{-5}/a$ bei mehrgeschossigen Gebäuden bzw. $p_f \cdot 5 \cdot 10^{-5}/a$ bei eingeschossigen Gebäuden resultiert.

SUMMARY

In this research project some deficiencies in the safety concept for the fire protection engineering design according to DIN V 18 230 were analysed, especially the systematic faults due to the neglected dependency on the type of structural element, the partly too favourable assumptions for the occurrence probability of severe fires and for the scattering of the equivalent fire duration and fire resistance of the elements. The main results are as follows.

The equivalent fire duration according to DIN V 18 230 is appropriate for structural elements the fire induced failure of which depends on the exceedance of a critical steel temperature between 400 and 600 °C in the most critical cross section. Reinforced concrete and steel columns sensitive with respect to buckling may be treated approximately in the same way; in this case the loss of stiffness in the the most critical cross section is of interest. The equivalent fire duration is generally valid for timber structures, too. Additional considerations are necessary for structural elements designed for thermal isolation (temperature rise less than 140 K or 180 K). In this case the equivalent fire duration can be underestimated by up to 30 %.

In the safety concept an increased probability of occurrence of severe fires of $5 \cdot 10^{-7}$ to $10^{-6}/a$ shall be assumed. Furthermore, the stochastic uncertainties of the fire resistance shall be increased from 20 % to 25 %. Nevertheless, the concept is not applicable to very slender timber elements the cross section of which can be reduced by charring by more than 25 %. The probability of failure before reaching the nominal standard fire duration and the scattering of the fire resistance of some special structural elements (e.g. doors or dampers) are higher than assumed in DIN V 18 230. Only by the help of quality assurance an unacceptable reduction of the target safety level can be avoided in this case.

Based on several comparison calculations and practical experience with DIN V 18 230, a general increase of the safety factors - in order to account for the above mentioned uncertainties - seems not to be justified. Therefore it is proposed to accept the slightly increased probability of failure of about $p_f = 5 \cdot 10^{-5}/a$ for single-story buildings and $p_f = 10^{-5}/a$ for multistory buildings, when holding the present safety factors.

RESUME

Dans ce projet de recherche des investigations ont été faites sur certaines insuffisances dans le concept de sécurité de la pré-norme DIN 18 230. Elles concernent entre autres les erreurs systématiques qui surviennent lorsque l'on néglige le fait que la durée équivalente d'incendie dépend de l'élément de construction, les hypothèses en partie trop favorables sur la probabilité qu'un feu se déclare ou se propage, ainsi que les dispersions aléatoires en partie sous-estimées de la durée équivalente d'incendie et de la durée de résistance au feu d'éléments de construction. Les résultats du contrôle sont récapitulés ci-dessous.

La durée équivalente d'incendie selon la norme DIN V 18 230 saisit avec justesse les éléments constructifs porteurs dont la ruine, en cas d'incendie est provoquée par une température critique atteignant environ 400 à 600 °C dans la section de l'acier de construction ou d'armature à l'endroit le plus sollicité. Approximativement on peut traiter de la même manière les colonnes en acier et celles en béton armé menacées dans leur stabilité, en tenant compte que la perte de rigidité à l'endroit critique, aux températures indiquées ci-dessus, est décisive pour la ruine en cas d'incendie.

Même pour les éléments porteurs en bois les durées équivalentes d'incendie se situent dans des ordres de grandeur similaires. Des réflexions supplémentaires sont par contre nécessaires quand il s'agit d'éléments de construction qui servent en priorité à clore un compartiment et qui, en cas d'incendie, s'effondrent quand la température augmente au delà d'une valeur relativement faible sur la face non exposée au feu (140 ou 180 K). Dans ce cas t_e peut augmenter de 30 %.

Dans le concept de sécurité il faut choisir comme probabilité moyenne d'un incendie dangereux $5 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-6} par m² et an. Par ailleurs, les dispersions aléatoires de la durée de résistance au feu d'éléments de construction, estimées autrefois à 20 %, devraient être haussées à 25 %.

Dans le cas d'éléments de construction en bois très étroits, qui après un incendie de longue durée ne présentent plus que des sections résiduelles faibles, il faut limiter le domaine d'application de sorte que la réduction de section due au feu ne dépasse pas 25 %. La résistance au feu de certains éléments spéciaux présente de plus grandes dispersions et la probabilité que la ruine survienne avant que la durée nominale de la résistance au feu ne soit atteinte, se situe au delà des 10 % pris comme base dans la norme DIN V 18 230. Seule une surveillance rigoureuse de la qualité peut éviter dans ce cas que le niveau de sécurité voulu ne soit abaissé. D'après les calculs comparatifs faits jusqu'à présent et d'après les expériences d'avec la norme DIN V 18 230 un relèvement général du niveau de sécurité ne semble pas justifié. C'est pourquoi un nouveau calibrage de la fiabilité nécessaire a été entrepris, qui s'oriente sur les valeurs de référence dans le concept de sécurité. Il s'est avéré qu'à partir des coefficients actuels de sécurité on obtient une probabilité de ruine de $p_f \approx 10^{-5}/a$ pour des bâtiments à plusieurs étages et de $p_f \approx 5 \cdot 10^{-5}/a$ pour des bâtiments à un étage.

1. EINLEITUNG

Das brandschutztechnische Bemessungsverfahren der DIN V 18 230 "Baulicher Brandschutz im Industriebau" /1/ basiert auf dem Konzept der "äquivalenten Normbranddauer". Bei diesem Verfahren werden die Wirkungen eines natürlichen Brandes (in einem Industriegebäude) auf beliebige Bauteile näherungsweise durch die äquivalente Branddauer eines Normbrandes ausgedrückt, der die gleiche Wirkung auf die Bauteile erzielt.

Dieses Bemessungsverfahren wird national wie auch im europäischen Rahmen wegen seines einfachen Ansatzes und in Ermangelung akzeptabler Alternativen mehr und mehr angewendet; aufgrund zahlreicher, offenkundig zu grober Vereinfachungen und einer generell schwachen Datenbasis der maßgebenden Parameter bleiben die Grundlagen jedoch nach wie vor umstritten. Aus diesem Grunde wurde 1985 vom NABau-Arbeitsausschuß DIN 18 230 die Überführung der Vornorm alter Art /1a/ in einen Weißdruck abgelehnt; statt dessen erschien DIN 18 230 1988 als Vornorm neuer Art /1b/. Der Arbeitsausschuß hat gleichzeitig eine grundlegende Überprüfung und Überarbeitung der Norm in die Wege geleitet. Hierzu wurden eine Reihe von Forschungsarbeiten angeregt, die sich mit verschiedenen Teilaspekten des Bemessungsverfahrens befassen:

- mit der statistischen Datenbasis der Brandhäufigkeit und Zuverlässigkeit der Brandbekämpfung (Prof. Schneider mit Prof. Hosser und Dr. Kersken-Bradley für IfBt),
- mit der Übertragbarkeit des in kleinen Brandräumen experimentell ermittelten Abbrandfaktors m auf größere Geometrien (MPA Dortmund mit Prof. Schneider für IfBt),
- mit der Übertragbarkeit des für kleine Räume theoretisch begründeten Ventilationsfaktors w auf reale Geometrien (Prof. Schneider für Betonverein und VDA),
- mit den Ungenauigkeiten und Ungewißheiten des bauartunabhängigen $t_{\ddot{a}}$ -Verfahrens bei Anwendung auf beliebige Baustoffe und Bauteile (Prof. Hosser und Prof. Schneider, dieses Vorhaben).

Aufgrund der mehr konzeptbezogenen Fragestellung soll dieses Vorhaben eine Art Klammer für die oben genannten Parallelvorhaben darstellen.

2. ZIELSETZUNG DES VORHABENS

2.1 Gesamtzielsetzung

In diesem Vorhaben soll das probabilistische Sicherheitskonzept der DIN 18 230 /2, 3/, insbesondere hinsichtlich der zugrundeliegenden Datenbasis, überprüft und falls erforderlich verbessert werden.

Hierzu ist eine umfassende Unsicherheitsanalyse durchzuführen, die sowohl die zufälligen Streuungen der maßgebenden Einflußgrößen der Bemessung als auch die Modellunsicherheiten des zum Teil stark vereinfachenden Bemessungsverfahrens mit Hilfe der äquivalenten Branddauer quantifizieren soll.

Weiterhin sollen die im bisherigen bauteilunabhängigen Konzept vernachlässigten Unterschiede im Brandverhalten von typischen Stahlbeton-, Stahl- und Holzbauteilen anhand vorliegender rechnerischer Nachweisverfahren studiert und mit den üblichen Streuungen experimentell in Normbrandversuchen bestimmter Feuerwiderstandsdauern verglichen werden.

Anhand der neu gewonnenen Informationen soll schließlich beurteilt werden, ob eine bauteilunabhängige Bemessung, die weiterhin aus Vereinfachungsgründen anzustreben ist, ggf. mit Sicherheitszuschlägen beaufschlagt werden muß, oder ob umgekehrt bei Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens, aus wirtschaftlichen Überlegungen, reduzierte Sicherheitsanforderungen vertretbar sind.

2.2 Einzelzielsetzungen

Aus Abschnitt 2.1 ergeben sich folgende Einzelzielsetzungen und Arbeitsschwerpunkte:

- 1) Zusammenstellung der verfügbaren statistischen Daten zur Brandentstehungstätigkeit und zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit im Industriebau.

- 2) Zusammenstellung der unsicheren Eingangsparameter bei der brandschutztechnischen Bemessung und Beschreibung durch probabilistische Modelle.
- 3) Ermittlung der Gesamtunsicherheiten der brandschutztechnischen Bemessung infolge unsicherer Parameter, getrennt für verschiedene Baustoffe und Bauteile unter Berücksichtigung von natürlichen Bränden. Vergleich der bauteilabhängigen Unsicherheiten mit den Streuungen der Feuerwiderstandsdauern bei Normbrandversuchen.
- 4) Untersuchung der Konsequenzen aus den Ergebnissen von 1) und 3) auf das bislang bauteilunabhängige Sicherheitskonzept für brandschutztechnische Bemessungen mit Hilfe der äquivalenten Branddauer nach DIN 18 230.
- 5) Vorschlag für eine Weiterentwicklung des Sicherheitskonzeptes der DIN 18 230 und der zugehörigen Sicherheitsgrundlagen.

3. BRANDSTATISTISCHE DATENBASIS

3.1 Ausgangssituation

Der Bemessung nach DIN V 18 230 /1/ liegt ein probabilistisches Sicherheitskonzept zugrunde /2, 3/, das die Gefährdung eines Industriegebäudes durch Brände und die Zuverlässigkeit der vorgesehenen Brandbekämpfungsmaßnahmen bewertet. Als Maß für die bei der Auslegung der baulichen Brandschutzmaßnahmen einzuhaltende Sicherheit dient die Wahrscheinlichkeit, daß in einem Brandbekämpfungsabschnitt ein voll entwickelter Brand auftritt. Diese Wahrscheinlichkeit setzt sich zusammen aus der Wahrscheinlichkeit, daß in dem Brandbekämpfungsabschnitt ein Entstehungsbrand auftritt, und der Wahrscheinlichkeit, daß sich dieser - nach Versagen der vorgesehenen Brandbekämpfung - im gesamten Brandbekämpfungsabschnitt ausbreitet.

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden und die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit in Industriegebäuden lagen zum Zeitpunkt der

Erarbeitung des Sicherheitskonzeptes /2, 3/ lediglich einige Erfahrungswerte aus dem Ausland vor. Daher sollten jetzt durch die Auswertung verfügbarer deutscher Brandstatistiken von Feuerwehren, Industrieverbänden und Brandversicherungen in /4/ bessere Daten gewonnen werden.

3.2 Nutzungsklassen

Es zeigte sich, daß die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden und die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit von der Nutzungsart der Industriegebäude und den damit im Zusammenhang stehenden besonderen Vorkehrungen für den Brandschutz abhängen. Neben den globalen, nutzungsunabhängigen Werten, die in DIN V 18 230 derzeit vorgegeben sind, wäre demnach künftig eine Unterscheidung von Nutzungsklassen denkbar. Schwierigkeiten bereitet zur Zeit allerdings die Klassifizierung, da je nach Datenquelle sehr unterschiedliche Zuordnungen der Betriebsarten zu Nutzungsklassen festzustellen sind. Für die Zukunft erscheint eine Vereinheitlichung der Klassifizierungen dringend erforderlich, da sonst die Vergleichbarkeit der Daten nicht sichergestellt ist.

Einen Vorschlag für künftige Nutzungsklassen enthält Tabelle 3.1, zusammen mit der Einordnung der bisher bei verschiedenen Datenquellen vorgefundenen Klassen

3.3 Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden

Alle ausgewerteten Statistiken weisen absolute Häufigkeiten von Bränden unterschiedlicher Größe auf, wobei die Klassifizierung der Brandgröße nach DIN 14 010 dominiert. In der Regel wurden in den Feuerwehrstatistiken nur Brände größer als Kleinbrand B, also keine Entstehungsbrände (Kleinbrand A) erfaßt. Ein Vergleich mit den Schadensstatistiken der Brandversicherer, die alle regulierten Brandschäden, also auch Entstehungsbrände, enthalten, läßt auf eine "Dunkelziffer" in den Feuerwehrstatistiken von ca. 30 % schließen.

Tabelle 3.1 Nutzungsklassen

Industriezweig	Untergruppe	Klasseneinteilung nach			
		Berliner Feuerwehr	Feuerwehr Hamburg	Werkfeuerwehr	Brandkasse
M Metall	Gießereien Stahl Maschinenbau Fahrzeugbau Flugzeugbau Metallwaren Sonstige		Metallbe- u. -verarbeitung	Eisen u. Stahl	Bergbau/Hütte
		Kraftfahrzeu- u. Schiffsbau		Maschinenbau	Eisen- u. sonst. Metallverarb.
		Metallverar- beitung			
T Textil	Allg. Textil Bekleidung Sonstige	Textilherstel- lung und -verarbeitung	Textil und Bekleidung	Bekleidung	Textil
P Papier	Allg. Papier Druck Sonstige	Papier und Druck	Papier- und Pappverar- beitung		
H Holz	Allg. Holz Sonstige	Holzbe- und -verarbeitung	Holzbe- und verarbeitung	Holz und Kunststoffe	Holz
C Chemie	Kunststoffe	Kunststoff und Gummi	Kunststoff		
	Gummi		Gummi		
	Allg. Chemie Farben, Lacke Sonstige	Chem. Herst. Farben, Lacke	Chem. Ind.	Chemie	Chemie
	Raffinerien	flüssige und gasf. Brennst.	Mineralöver- arbeitung	Raffinerien	
E Elektro	Energieerzeug. Elektrotechnik Elektronik			Energieerzeug.	
				Elektro	
N Nahrung	Nahrungsmittel Allgemein Sonstige	Mühlenbetr. Kühlhausbetr. Nahrungsmittel		Nahrungsmittel	Nahrungs- und Genußmittel
A Automobil	keine			Automobil	
S Sonstige	keine	feste Brennst.	Sonstige	Sonstige	Steine/Erden
		Sonstige			Sonstige

Problematisch ist die Angabe von relativen Häufigkeiten, bezogen auf die Anzahl der insgesamt in der Statistik erfaßten Gebäude oder gar auf den Quadratmeter Brandabschnittsfläche, wie in DIN V 18 230 benötigt. Während die Anzahl der erfaßten Industriebetriebe durchweg angegeben werden konnte, z. B. von den Versicherungen und Statistischen Landesämtern, mußte bei den Brandabschnittsgrößen zum Teil auf Durchschnittswerte oder Schätzwerte zurückgegriffen werden.

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten von Bränden \geq Kleinbrand B nach verschiedenen Datenquellen. Auf den ersten Blick erscheinen die Zahlen - abgesehen von einigen "Ausreißern" - recht homogen; sie liegen auch in der Nähe des für DIN 18 230 geschätzten Durchschnittswertes ($p_1 = 2 \cdot 10^{-6} / \text{m}^2 \cdot \text{Jahr}$). Der Gesamtmittelwert beträgt $p_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ je m^2 und Jahr, mit einer Bandbreite von $2 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-4}$.

Tabelle 3.2 Nutzungsspezifische Auftretenswahrscheinlichkeiten von Bränden (\geq Kleinbrand B)

Industriezweig	Verbände	Auftrittswahrscheinlichkeit p_1 [$10^{-5} / \text{m}^2 \cdot \text{Jahr}$]			
		Berliner Feuerwehr	Feuerwehr Hamburg	Stadt Kassel	Brandkasse 3)
M Metall	9,8 1)	0,57	0,18	0,50	0,41
T Textil		0,23	2,07	0,15	0,34
P Papier		-	1,07	1,38	0,39
H Holz		1,00	0,45	0,22	0,30
C Chemie	3,7 2) (0,58)	3,98	0,20	0,42	0,29
E Elektro		-	0,67	-	-
N Nahrung		0,54	0,75	0,31	0,21
A Automobil	2,2	-	-	-	-
S Sonstige		18,0	0,32	0,42	0,36
		0,79	0,27	0,44	

1) nur Stahlwerke

2) vermutlich \geq Kleinbrand A

3) $A_m = 2500 \text{ m}^2$

3.4 Brandausbreitungswahrscheinlichkeit

Die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit p_2 (bzw. p_2 p_3) gemäß DIN V 18 230 wird als Übergangswahrscheinlichkeit von einem Kleinbrand B zum Großbrand definiert. Eine Einbeziehung der vom Werkspersonal - ohne Einsatz von öffentlicher oder Werkfeuerwehr - gelöschten Entstehungsbrände (Kleinbrände A) erscheint derzeit nicht sinnvoll, da die statistischen Daten bezüglich der Erfassung von Kleinbränden A uneinheitlich sind.

Eine Gegenüberstellung der Auswertungsergebnisse in Tabelle 3.3 zeigt, daß bei den Brandausbreitungswahrscheinlichkeiten sowohl nutzungsspezifische Einflüsse, als auch das Vorhandensein einer schlagkräftigen Werkfeuerwehr eine Rolle spielen. Insgesamt bleibt festzustellen, daß die für das Sicherheitskonzept der DIN V 18 230 geschätzte Wahrscheinlichkeit $p_2 = 10\%$ bei Vorhandensein einer "normalen" öffentlichen Feuerwehr in etwa zutrifft; die Bandbreite reicht hier von 5 ‰ (Automobilindustrie mit Werkfeuerwehr) bis 22 ‰ (Holzindustrie in Hamburg).

Tabelle 3.3 Brandausbreitungswahrscheinlichkeiten p_2
(vom Kleinbrand B zum Großbrand)

Industrie- zweig	Verbände	Brandausbreitungswahrscheinlichkeit p_2 nach					
		Berliner Feuerwehr	Feuerwehr Hamburg	Stadt München	Stadt Kassel	Werk feuerwehr	Brand- kasse
M Metall	0,056	0,069	0,164	0,50			
T Textil		0,108				0,05	
P Papier			0,143				
H Holz		0,106	0,222				
C Chemie	0,04 1)	0,117	0,200			0,08	
E Elektro						0,05	
N Nahrung		0,049	0,126				
A Automobil	0,02					0,005	
S Sonstige		0,024	0,105			0,16 2)	
Summe		0,079	0,160	0,25	0,051	0,008	0,10

1) vermutlich von Kleinbrand A zum Großbrand

2) nur Bergbau

Die großen Werke mit eigener Werkfeuerwehr liegen durchweg günstiger als die Großstädte mit Berufsfeuerwehr. Aus dem Verhältnis zwischen den p_2 -Werten 0,1 (nur öffentliche Feuerwehr) und 0,04 (mit Werkfeuerwehr) ist erkennbar, daß sich die Wirksamkeit einer öffentlichen Feuerwehr mit der einer Werkfeuerwehr nicht voll überlagert.

Die zusätzlichen Angaben einzelner Werke haben ähnliches im Hinblick auf die Wirkung stationärer Feuerlöschanlagen gezeigt; hier erscheint die Reduktion mit der zusätzlichen Wahrscheinlichkeit $p_3 = 2 \cdot 10^{-2}$ (ge-

mäß DIN V 18 230) zu optimistisch. Es ist vielmehr so, daß die Löschanlagen an den besonderen Gefahrenschwerpunkten der Werke die Funktion eines "Backup-Systems" übernehmen für den Ausnahmefall, daß eine raschere manuelle Brandbekämpfung nicht stattfinden kann.

4. RECHNERISCHE VERFAHREN FÜR DEN BRANDSCHUTZTECHNISCHEN NACHWEIS

4.1 Übersicht

Der brandschutztechnische Nachweis mit Hilfe einer äquivalenten Branddauer umfaßt folgende Teilaufgaben:

- 1) Abschätzung des bei gegebenen Randbedingungen (Brandraum, Ventilation, Brandlast) zu erwartenden natürlichen Brandes,
- 2) Ermittlung der äquivalenten Branddauer als Dauer des dem zu erwartenden natürlichen Brand äquivalenten Normbrandes nach DIN 4102 Teil 2,
- 3) Nachweis der ausreichenden Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen unter den Wirkungen des äquivalenten Normbrandes und der im Brandfall vorhandenen sonstigen Belastungen (Gebrauchslasten).

Im Hinblick auf eine Quantifizierung der Gesamtunsicherheit in dem brandschutztechnischen Nachweis nach DIN 18 230 /1/ sind alle drei Teilaufgaben zu analysieren. Allerdings sind die jeweiligen Unsicherheiten nicht unabhängig voneinander. Insbesondere die Teilaufgaben 2 und 3 sind baustoff- und bauteilabhängig zu lösen.

Die bauteilspezifischen Untersuchungen werden auf einige repräsentative Bauteile beschränkt, deren Standsicherheit unter Gebrauchslast im Brandfall gefährlich ist:

- Stahlbetonbauteile (Abschnitt 4.3)
- Stahlbauteile (Abschnitt 4.4) und
- Holzbauteile (Abschnitt 4.5).

Die Nachweisverfahren für die Teilaufgaben werden unter den folgenden Aspekten diskutiert:

- Welche Parameter beeinflussen maßgebend das Ergebnis des Nachweises?
- Wo finden sich Vernachlässigungen, Näherungen oder Ungewißheiten im Nachweis, die Ursache für größere Modellunsicherheiten sein könnten?

Es wird davon ausgegangen, daß eine zu weitgehende Differenzierung bezüglich der bauteilspezifischen Unsicherheiten beim brandschutztechnischen Nachweis unpraktikabel wird. Daher werden für die Analysen Bauteile ausgewählt, die bezüglich der Unsicherheiten für eine größere Bauteilkategorie abdeckend sind (z. B. schlanke Stahlbetonstützen für Stahlbetonbauteile).

4.2 Ermittlung der Brandwirkungen

Bei dem Bemessungsverfahren mit Hilfe der äquivalenten Branddauer werden die Brandwirkungen eines natürlichen Brandes auf Bauteile näherungsweise auf die Brandwirkungen eines Normbrandes nach DIN 4102 Teil 2 /5/ zurückgeführt. Hierbei wird eine - experimentell für einen beschränkten Anwendungsbereich belegte - Proportionalität zwischen der äquivalenten Normbranddauer $t_{\ddot{a}}$ und

- der Brandlast q (in kWh/m²)
- einem Abbrandfaktor m und
- einem Wärmeabzugsfaktor w

unterstellt /1/. Der Proportionalitätsfaktor c (in min · m²/kWh) ist abhängig von der Wärmeabsorption der Umfassungsbauteile /6/:

$$t_{\ddot{a}} = q \cdot m \cdot w \cdot c. \quad (4.1)$$

Weitere wesentliche Einflüsse wie die Größe und Form und ggf. Unterteilung des Brandraumes und die (Versagens-) Art des zu bemessenden Bauteils werden nicht berücksichtigt.

Eine genauere Ermittlung der Brandwirkungen gelingt mit Hilfe der Wärmebilanztheorie, wie sie z. B. in /7, 8/ dargestellt ist. Dieses Verfahren geht aus von der Wärmebilanz in einem abgeschlossenen Brandraum gemäß 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\dot{h}_0 - (\dot{h}_e + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (4.2)$$

mit den Energieanteilen

\dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie

\dot{h}_e die durch Konvektion entzogene Energie

\dot{h}_o die durch Fensterstrahlung entzogene Energie

\dot{h}_w die an Umfassungsbauteile durch Konvektion und Strahlung abgegebene Energie

\dot{h}_g die im Brandraum gespeicherte Energie

\dot{h}_s die durch Wärmesenken aufgenommene Energie.

Zusätzlich ist die Massenbilanz im Brandraum aufzustellen:

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + R) = 0 \quad (4.3)$$

mit

\dot{m}_g die ausströmende Rauchgasmenge

\dot{m}_l die einströmende Luftmenge

R die Abbrandgeschwindigkeit des Brandgutes.

Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich daraus, daß der Brand unterschiedlich verläuft, je nachdem, ob ausreichend viel Luft für eine vollständige Verbrennung des vorhandenen Brandgutes zur Verfügung steht (brandlastgesteuerter Abbrand) oder ob die Verbrennung durch die begrenzt vorhandene Sauerstoffmenge kontrolliert wird (ventilationsgesteuerter Abbrand). Dementsprechend erfolgt die Energiefreisetzung \dot{h}_c nach unterschiedlichen Zusammenhängen:

$$\dot{h}_c = \dot{R} \cdot H_u \cdot \zeta \quad (4.4a)$$

mit

H_u unterer Heizwert (in kJ/kg)

ζ Mischungsbeiwert

bzw.

$$h_c = \frac{\dot{m}_1 \cdot H_u \cdot \zeta}{r} \quad (4.4b)$$

mit

r Luftbedarf pro kg Brandgut (in kg/kg).

Die Gastemperatur im Brandraum T_g folgt aus dem Energieterm h_g . Für die brandschutztechnische Bemessung ist jedoch die Energieaufnahme der Umfassungsbauteile maßgebend:

$$\dot{h}_w = A_t \left\{ \alpha \cdot (T_g - T_w) + \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_w^4) \right\} \quad (4.5)$$

mit

A_t Gesamtoberfläche der Umfassungsbauteile (in m^2)

α Wärmeübergangszahl (in $kJ/m^2 K$)

ε_{res} mittlere Emissionszahl.

Darin sind die Bauteil-Oberflächentemperaturen T_w unter Berücksichtigung der Anfangs- und Randbedingungen aus der Fourierrechnung zu bestimmen:

$$c_w \cdot \rho_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \quad (4.6)$$

mit

c_w spezifische Wärmekapazität (in $kJ/kg \cdot K$)

ρ_w Dichte in kg/m^3

λ_w Wärmeleitfähigkeit (in kJ/mhK)

Energiebilanz, Massenbilanz und Fourierrechnung werden simultan im Zeitschrittverfahren gelöst, wobei sich u. a. die Gastemperatur und die Bauteiltemperatur als Temperatur-Zeitverläufe $T_g(t)$ bzw. $T_w(t)$ ergeben.

Da eine geschlossene analytische Lösung des Problems nicht existiert, sind die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Temperaturzeitverläufe auch nur numerisch im Rahmen von Parameterstudien zu verfolgen. Ein direkter Zusammenhang zwischen den o. g. Beziehungen und den Faktoren m , w und c läßt sich nicht erkennen. Damit ist klar, daß das Näherungsverfahren mit Hilfe der äquivalenten Branddauer nur empirisch an dem genaueren Verfahren mit Hilfe der Wärmebilanzrechnung kalibriert werden kann. Dies ist ursprünglich /6/ am Beispiel von natürlichen Bränden in kleinen Brandräumen geschehen. Bei Variation von Brandraumgeometrie und Ventilation über das in den Brandversuchen abgedeckte Parameterspektrum hinaus geht die Proportionalität zwischen äquivalenter Branddauer $t_{\ddot{a}}$ und Brandlast q verloren. Hier sind mit dem Näherungsverfahren der DIN 18 230 größere Modellunsicherheiten zu erwarten.

Aus diesem Grunde haben die Autoren in /24/ das Verfahren mittels äquivalenter Branddauer modifiziert und auf die Aufspaltung von $t_{\ddot{a}}$ in Faktoren verzichtet. Statt dessen wird $t_{\ddot{a}}$ numerisch aus Wärmebilanzrechnungen - wie oben beschrieben - ermittelt und in Abhängigkeit von einem bezogenen Brandlastparameter und einem bezogenen Ventilationsparameter grafisch dargestellt:

$$t_{\ddot{a}} = f(Q/A_t, A_w \cdot \sqrt{h}/A_t) \text{ (bei natürlicher Ventilation)} \quad (4.7)$$

$$t_{\ddot{a}} = f(Q/A_t, L_w \cdot V / A_t) \text{ (bei Zwangsventilation)}$$

mit

- Q Brandlastmenge (in kJ)
- h mittlere Öffnungshöhe bei natürlicher Ventilation (in m)
- LW Luftwechselrate bei Zwangsventilation (in 1/h)
- V Brandraumvolumen (in m³).

Das Diagramm in Bild 4.1a gilt beispielhaft für Ölbrandlasten, für die abgesicherte Annahmen zur Abbrandrate in Abhängigkeit von der Ventilation aus /23/ vorlagen. Einige für eine Industriehalle von 5000 m² Grundfläche und 8 m Höhe mit normaler Wärmedämmung der Umfassungsbau- teile ($c = 0,2$) nach DIN 18 230 errechnete äquivalente Branddauern sind gestrichelt eingetragen. Hierbei wurde der Abbrandfaktor $m = 0,4$ für

schweres Heizöl unterstellt. Der Ventilationsfaktor w der DIN 18 230 wurde entsprechend den Erläuterungen zu /1/ aus dem in /23/ gewählten Ventilationsparameter $A_w \cdot \sqrt{h}/A_t$ rückgerechnet:

$$w = w' \cdot 3/2$$

mit

$$w' = \frac{A}{(A_w \cdot A_t \cdot \sqrt{h})^{1/2}} \quad (4.8)$$

und damit

$$w = \left(\frac{A}{A_t}\right)^{3/2} \cdot (A_w \cdot \sqrt{h}/A_t)^{-3/4} \quad (4.9)$$

Aus dem Diagramm geht hervor, daß die äquivalente Branddauer bei größeren Brandlasten unterproportional wächst; das Verfahren der DIN 18 230 tendiert dort zur sicheren Seite. Anders verhält es sich mit der Ventilation. Die Kurven in Bild 4.1b entsprechen denen in Bild 4.1a, es wurde aber der Ventilationsparameter auf der Abszisse dargestellt und der Brandlastparameter als Scharparameter gewählt. Jetzt zeigt sich, daß es offenbar "optimale" Ventilationsverhältnisse gibt, bei denen sich die größte Abbrandrate einstellt; diese liegt deutlich höher, als es dem experimentell nach DIN 18 230 Teil 2 /1c/ bestimmten Abbrandfaktor m entspricht. Bei unterschiedlichen Brandlasten treten die optimalen Abbrandraten bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen auf, wie sich aus einem Vergleich von Bild 4.1b und Bild 4.2 ergibt, das für Kabelbrandlasten gilt. Über Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen von Großversuchen in Finnland im Rahmen des SFB 148 und Berechnungen nach DIN V 18 230 /1a/ wurde auch in /25/ berichtet.

Bei rechnerischen Untersuchungen zum w -Faktor in /26/ wurde festgestellt, daß dieser in DIN 18 230 grundsätzlich zu günstig angenommen wird. Je nach Wahl der Parameter ergaben sich Abweichungen in den berechneten äquivalenten Branddauern, die bei kleinen A_{v+h}/A -Werten besonders groß waren. In einigen Fällen ergaben die Wärmebilanzrechnungen auch günstigere Werte als sie in DIN 18 230 errechnet werden. Prinzipiell wurde festgestellt, daß Brandverlauf und w -Faktor brandlastabhängig sind, so daß die in DIN 18 V 230 vorausgesetzte Proportionalität von q , m und w in der Praxis zu erheblichen Fehleinschätzungen bezüglich der äquivalenten Branddauern führen kann.

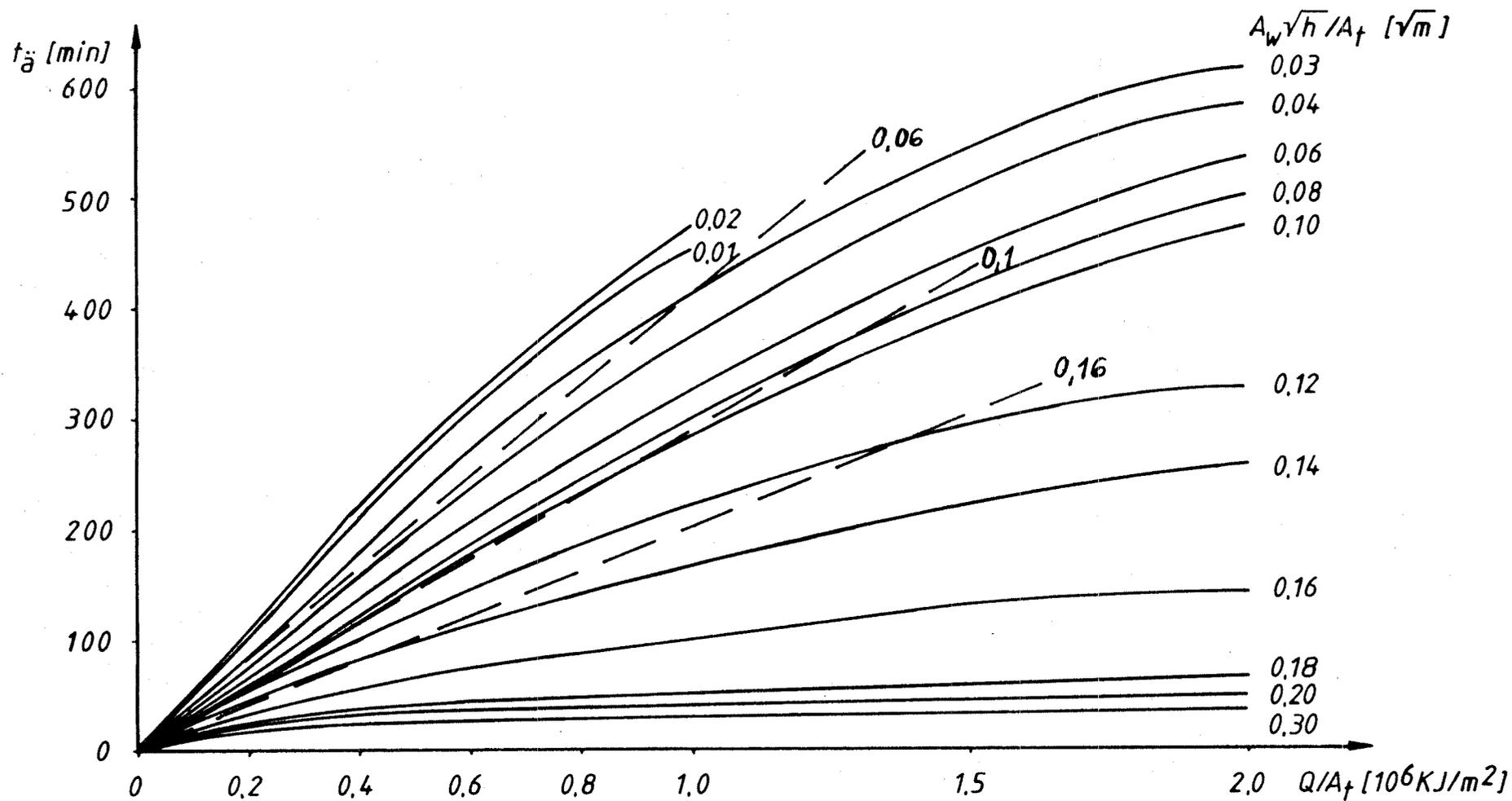


Bild 4.1a: Äquivalente Branddauern für Ölbrände in Abhängigkeit von bezogener Brandlast und Ventilation aufgetragen über dem Brandlastparameter

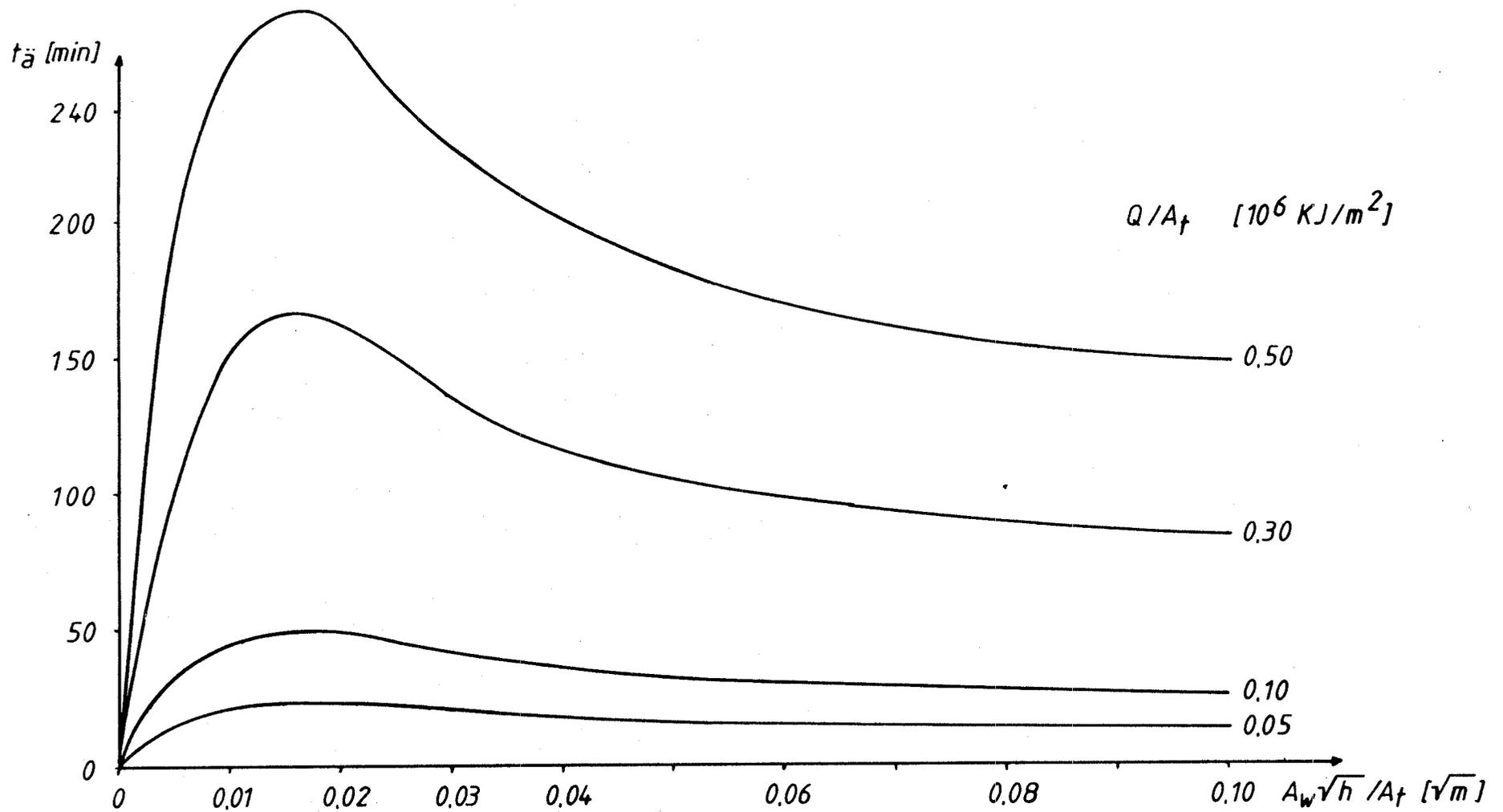


Bild 4.1b: Äquivalente Banddauern für Ölbrände in Abhängigkeit von bezogener Brandlast und Ventilation aufgetragen über dem Ventilationsparameter

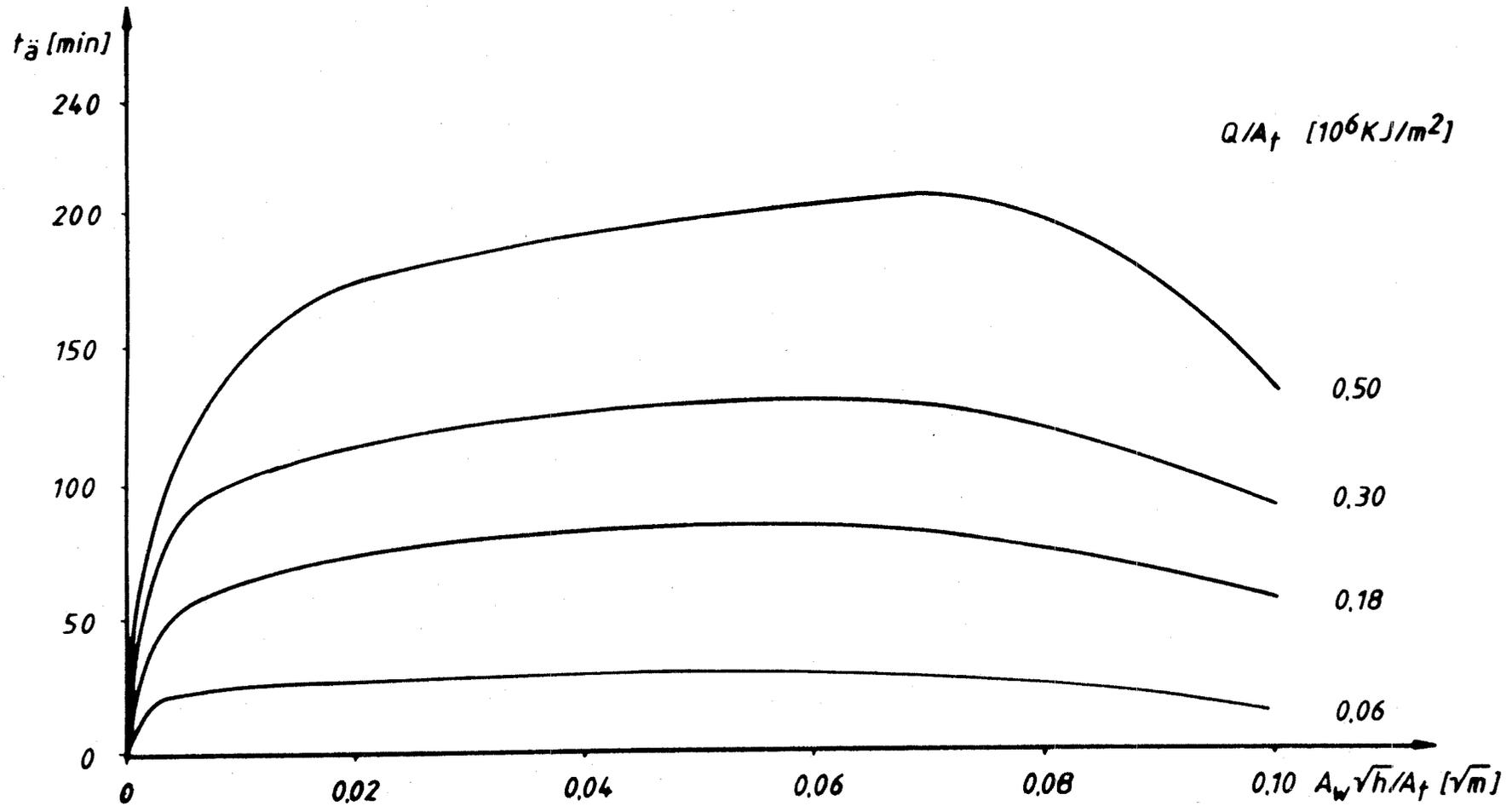


Bild 4.2: Äquivalente Branddauern für Kabelbrände in Abhängigkeit von bezogener Brandlast und Ventilation aufgetragen über dem Ventilationsparameter

Der Geometrieinfluß ist nur bei kleinen Hallen zu vernachlässigen. Berechnungen an großen Industriehallen der Automobilindustrie haben ergeben, daß z. B. die Hallenhöhe bei kleinen Brandlasten ein entscheidender Faktor für das Brandgeschehen ist. Ebenso hat sich gezeigt, daß die Öffnungscharakteristik der Dachentlüftung großen Einfluß auf den Brand- bzw. Verqualmungsverlauf hat. Die in DIN 18 230 getroffene Annahme - alle Öffnungen sind bei Brandbeginn offen - ist zumindest bei niedrigen Brandlasten eine bei weitem zu optimistische Annahme.

4.3 Nachweis von Stahlbetonbauteilen

Als brandschutztechnische Bemessung wird im folgenden der rechnerische Vergleich zwischen der vorhandenen Beanspruchung eines Bauteils infolge Gebrauchslast und der bei den erhöhten Temperaturen infolge Brand geltenden Beanspruchbarkeit verstanden /9/. Dies gilt also für alle diejenigen Bauteile, bei denen der Verlust der Standsicherheit im Brandfall das für den Feuerwiderstand maßgebende Kriterium ist.

Im Prinzip sind für eine derartige Bemessung die bei Normaltemperatur üblichen Bemessungsverfahren anwendbar. Allerdings sind die bei Raumtemperatur geltenden Werkstoffgesetze (z. B. σ - ϵ -Linien) durch solche bei erhöhten Temperaturen zu ersetzen. Derartige Werkstoffkennlinien für die Werkstoffe Beton und Stahl sind z. B. in /10/ angegeben; in /11/ wurden von den Autoren ähnlich vereinfachte Beziehungen verwendet. Genauere Werkstoffgesetze finden sich z. B. in /12/.

Ein weiteres Problem stellt die Ermittlung der Temperaturen in Bauteilen dar, die z. B. von der in Abschnitt 3.1 erhaltenen Oberflächentemperatur T_w oder von der Gastemperatur im Brandraum T_g - im folgenden Raumtemperatur genannt - ausgehen kann. Bei beliebiger Querschnittsform und Beflammung ist dieses mehrdimensionale instationäre Problem analytisch nicht lösbar. Es stehen jedoch numerische Verfahren nach der Finite-Element-Methode zur Verfügung. Für gängige Querschnittsformen und Temperatur-Zeitverläufe, z. B. für bestimmte Zeitpunkte eines Normbrandes, sind aus solchen Berechnungen Temperaturfelder abgeleitet und grafisch dargestellt worden (z. B. in /10/).

Für die rechnerischen Untersuchungen in diesem Vorhaben soll auf vereinfachte Nachweisverfahren für Stahlbetonbalken, -stützen, -wände und -decken zurückgegriffen werden, die an den Ergebnissen von Normbrandversuchen geeicht wurden. Nach /11/ treten hierin als maßgebende Einflußgrößen für die Beanspruchbarkeit neben den wärmetechnischen Kennwerten des Betons die temperaturabhängigen Festigkeiten von Betonstahl und Beton, bei schlanken Stützen zusätzlich die temperaturabhängigen E-Moduli und die Bewehrungslage auf. Als Beanspruchungsparameter kommen die äußeren Lasten aus Eigengewicht und Verkehrslast sowie ggf. eine Zwangbeanspruchung infolge Verformungsbehinderung hinzu. Für schlanke Stahlbetonstützen wurde von Henke in /27/ ein Nachweisverfahren nach Theorie II. Ordnung in Anlehnung an Ansätze von Kordina/Quast angewendet. Der Unterschied gegenüber der Kaltbemessung besteht lediglich in den temperaturabhängigen Arbeitslinien für Beton und Betonstahl. Dieses Verfahren wird hier zu Vergleichszwecken einbezogen, weil sich in /27/ eine für die Zielsetzung dieser Arbeit verwertbare Unsicherheitsanalyse anschließt. Die dabei näher untersuchten unsicheren Parameter sind:

- 1) Rechenwert der Betondruckfestigkeit β_R bei 20 °C (stellvertretend für die Druckfestigkeit bei erhöhten Temperaturen)
- 2) Stahlstreckgrenze β_S
- 3) Querschnittsbreite b
- 4) Querschnittsdicke d
- 5) Bewehrungslage Zugrand x_Z
- 6) Bewehrungslage Druckrand x_D
- 7) Temperaturabhängige Fließgrenze des Betonstahles
- 8) Temperaturleitfähigkeit a im Querschnitt
- 9) Belastung aus Eigengewichtslasten D
- 10) Belastung aus Verkehrslasten L .

Dagegen werden Unsicherheiten der E-Moduli von Beton und Stahl, der Form der Arbeitslinie des Betons sowie des Brandraum-Temperaturverlaufes nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) außer acht gelassen, weil sie sich bei Vorberechnungen nur unwesentlich auf die Ergebnisse auswirkten.

4.4 Nachweis von Stahlbauteilen

Verfahren für den rechnerischen Nachweis von Stahlkonstruktionen bei natürlichen Bränden und Normbränden stehen bereits seit Anfang der 70er Jahre zur Verfügung /14 - 17/. Eine Ursache dafür war sicherlich, daß in den meisten Fällen das Erreichen einer kritischen Stahltemperatur als realistisches Versagenkriterium herangezogen werden kann. Die damit zu vergleichende vorhandene Stahltemperatur läßt sich relativ einfach aus der Gastemperatur im Brandraum bestimmen, ohne daß hierfür ein aufwendiges numerisches Verfahren benötigt wird; dies gilt auch für bekleidete Stahlprofile.

Auf der Basis dieser Vorschläge wurden 1979 die Empfehlungen der EKS /18/ abgeleitet, die als Grundlage für eine im europäischen Rahmen harmonisierte Vorgehensweise beim brandschutztechnischen Nachweis von Stahlkonstruktionen dienen. Mit den EKS-Empfehlungen können die erforderlichen rechnerischen Untersuchungen von unbekleideten und bekleideten Stahlbauteilen durchgeführt werden.

Maßgebende Parameter der Beanspruchbarkeit sind die Spannungs-Dehnungsline von Stahl bzw. Festigkeit und E-Modul bei erhöhten Temperaturen, die wärmetechnischen Kennwerte des Stahls und ein Profilmfaktor sowie bei bekleideten Stahlkonstruktionen zusätzlich die Abmessung und wärmetechnischen Kennwerte der Bekleidung. Die Beanspruchungsparameter sind die gleichen wie bei Stahlbetonbauteilen. Stahlstützen unter ETK-Brandwirkung wurden auch in /27/ untersucht. Wegen der ähnlichen Zielsetzung sollen diese Untersuchungen wiederum hier einbezogen werden. Aus der Vielzahl der in den Nachweis eingehenden Parameter schlagen im wesentlichen folgende auf die Ergebnisse durch:

- 1) Brandraumtemperatur T_{BR}
- 2) Stahlstreckgrenze $\beta_{S,0}$ bei 20 °C
- 3) Elastizitätsmodul E_0
- 4) Flanschbreite b
- 5) Querschnittshöhe h
- 6) Flanschdicke t
- 7) Stegdicke s

- 8) Wärmeleitfähigkeit der Isolierung λ_i
- 9) Dicke der Isolierung d_i
- 10) Belastung aus Eigengewichtslasten D
- 11) Belastung aus Verkehrslasten L .

Im Sinne einer gröberen Klassifizierung der Bauteilunterschiede gemäß Abschnitt 4.1 können die unbedeckten und bedeckten Stahlstützen bezüglich der Unsicherheiten als abdeckend für unbedeckte und bedeckte Stahlbauteile angesehen werden. Der Einfluß der Querschnittsform kann durch Auswahl von Profilen mit unteren und oberen U/A -Werten berücksichtigt werden (z. B. IPB 220 mit $U/A = 88$ und IPB 180 mit $U/A = 160$). Daneben ist die Stützenschlankheit λ in angemessenen Grenzen ($\lambda \leq 150$) zu variieren.

4.5 Nachweis von Holzbauteilen

Vereinfachte rechnerische Verfahren zum brandschutztechnischen Nachweis von Holzbauteilen wurden seit Ende der 70er Jahre entwickelt /19/ und auch im Rahmen von deutschen Untersuchungen /20, 21/ angewendet. Ein kompliziertes Verfahren nach der Methode der finiten Differenzen wurde in /22/ benutzt.

Hier wird auf die in /20, 27/ weiterentwickelten Näherungsverfahren für Balken und Stützen zurückgegriffen, die eine für praktische Belange ausreichende Genauigkeit aufweisen. Ein wesentliches Kriterium bei Holzbauteilen ist der zeitlich mit dem Brandgeschehen fortschreitende Abbrand, der eine Querschnittsreduktion und ggf. Exzentrizität einer vorhandenen Normalkraft mit sich bringt. Die Beanspruchbarkeit ist wiederum mit den temperaturabhängigen Materialeigenschaften - Festigkeit und E-Modul - von Holz zu berechnen. Bei der Beanspruchungsermittlung sind die äußeren Lasten, ggf. auftretende Verformungen (Theorie II. Ordnung) oder Zwangsschnittgrößen zu berücksichtigen. Bei Holzstützen kann eine theoretische Knickspannung σ_{kr} in Abhängigkeit vom Abbrand w und der mit dem Abbrand veränderlichen Stabschlankheit $\lambda(w)$ ermittelt werden; mit der Restquerschnittsfläche $A_{Rest}(t)$ ergibt sich dann die Stützentraglast $P(t)$ in Abhängigkeit der Branddauer t .

Die Tragfähigkeit von Holzbalken errechnet sich aus der temperaturabhängigen Biegedruckfestigkeit σ_{BR} des Holzes und dem Widerstandsmoment $W_{Rest}(t)$ des Restquerschnittes nach der Branddauer t .

Insgesamt sind folgende unsichere Parameter für die Tragfähigkeit wesentlich:

- 1) Quetschgrenze σ_{IID}
- 2) Elastizitätsmodul E
- 3) Abbrandrate w bei Stützen
- 4) Biegedruckfestigkeit σ_{BR} bei Balken
- 5) Abbrandraten w_s (seitlich) und $w_{o,u}$ (oben und unten) bei Balken
- 6) Belastung infolge Eigengewichtslasten D
- 7) Belastung infolge Verkehrslasten L .

5. UNSICHERHEITEN BEIM BRANDSCHUTZTECHNISCHEN NACHWEIS

5.1 Übersicht

In Abschnitt 4 wurden die rechnerischen Verfahren für die Ermittlung der Brandwirkungen bei natürlichen Bränden und für den brandschutztechnischen Nachweis von unterschiedlichen tragenden Bauteilen zusammenfassend dargestellt. Es wurde auch bereits auf die nach vorliegenden Erfahrungen maßgebenden unsicheren Einflußgrößen verwiesen.

Diese rechnerischen Nachweisverfahren sollen im folgenden die Grundlage für eine Abschätzung der resultierenden Gesamtunsicherheiten brandschutztechnischer Bauteilnachweise sein. Hierbei wird grundsätzlich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz verfahren. Die Gesamtunsicherheiten in der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ und der Feuerwiderstandsdauer t_f der verschiedenen Bauteile (bei einem Normbrand nach ETK) werden getrennt ausgewiesen. Neben den Parameterstreuungen bei der Ermittlung der Brandwirkungen werden auch die Modellunsicherheiten bei der bauteilunabhängigen Definition von $t_{\ddot{a}}$ untersucht. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.7 mit den beobachteten Unsicherheiten bei Brandversuchen an Sonderbauteilen verglichen.

5.2 Streuungen der Brandwirkungen

Ausgehend von den in Abschnitt 4.2 benannten Einflußgrößen bei der rechnerischen Ermittlung von Brandwirkungen nach der Wärmebilanztheorie wurden von den Autoren bereits in /11/ umfangreiche Parameterstudien zur Quantifizierung von Empfindlichkeiten und Unsicherheiten durchgeführt. Zusammenfassend läßt sich aus den damaligen Ergebnissen schließen:

- Für die Verhältnisse des Industriebaus sind die Gastemperaturen im Brandraum nach dem Flashover mit einer nahezu konstanten Standardabweichung von gut 100 °C behaftet.
- Die als Grundlage für die Ermittlung der äquivalenten Branddauer dienenden Bauteiltemperaturen weisen bei Stahlbetonteilen einen mit steigender Raumtemperatur abnehmenden Variationskoeffizienten zwischen knapp 20 % bis gut 10 % auf.

Im Rahmen von Forschungsarbeiten über den Brandschutz in Kernkraftwerken /23, 24/ wurden von den Autoren die Unsicherheiten der Brandwirkungen weiter studiert und dabei auch deren Auswirkungen auf eine bauteilunabhängig definierte äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$ untersucht. Es wurden verbesserte Abbrandfunktionen für reale Brandgüter (Kabel- und Ölbrandlasten) entwickelt; der Zusammenhang zwischen Abbrandrate und Ventilation wurde bei natürlicher Ventilation und Zwangsventilation konsistent berücksichtigt. Die Ergebnisse der in weiten baupraktischen Grenzen durchgeführten Parameterstudien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Abbrandgeschwindigkeit ist eine Funktion der Ventilationsverhältnisse und der Temperaturentwicklung im Brandraum; sie erreicht ein Maximum bei etwa stöchiometrischem Abbrand und weist sowohl bei Luftmangel (ventilationsgesteuerter Brand) als auch bei Luftüberschuß (brandlastgesteuerter Brand) kleinere Werte auf. Der Einfluß der Streuungen von spezifischer Abbrandgeschwindigkeit und Ventilation auf die äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$ ist bei geringer natürlicher Ventilation be-

sonders groß. Die betreffenden Ergebnisse sind mit wesentlich größeren Unsicherheiten behaftet, als dies in /11/ abgeschätzt wurde.

Die in /11/ vorausgesetzte Proportionalität zwischen Brandlast und äquivalenter Branddauer konnte über weite Bereiche bestätigt werden. Ausgenommen bei sehr kleiner Brandlast und geringer Ventilation (bei denen $t_{\ddot{a}}$ vergleichsweise hoch ist), sowie bei sehr großer Brandlast (bei der $t_{\ddot{a}}$ unterproportional ansteigt), wächst $t_{\ddot{a}}$ in guter Näherung linear mit der Brandlast. Damit pflanzen sich die Streuungen der Brandlast (Variationskoeffizient 10 %) direkt in der äquivalenten Branddauer fort.

Die Geometrie des Brandraumes, die in den Nachweis nach DIN 18 V 230 /1/ nur über die Grundfläche A eingeht, wurde durch unterschiedliche Wahl des Verhältnisses von Raumbofläche A_t zu Grundfläche A variiert. Durch Bezug von Ventilation und Brandlast auf die Raumbofläche A_t blieb dies ohne Auswirkung auf die äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$. Mit dieser Darstellungsweise können also Modellunsicherheiten im Verfahren nach DIN 18 V 230 aufgrund des Geometrieinflusses weitgehend vermieden werden. Derzeit sind diese Modellunsicherheiten mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von mindestens 10 % zu bewerten.

Eine weitere Modellunsicherheit wurde im Zusammenhang mit den Brandherdgrößen in großen Brandräumen festgestellt. Bei den Ölbränden wurde generell eine Ölläche in der Größe von 1/16 der Raumbofläche A_t unterstellt; wenn die Brandherdgröße auf die halbe Fläche reduziert wird, ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen bis zu 25 % höhere äquivalente Branddauern. Ein ähnlicher Effekt ist bei Kabelbrandlasten bezüglich der Anzahl der Kabelpritschen zu beobachten. Als repräsentativer Fall wurden hier 4 Pritschen unterstellt; bei 6 Pritschen (maximale Ausnutzung bei Kabelkanälen) wurde $t_{\ddot{a}}$ bis zu 20 % geringer, bei 3 Pritschen ca. 10 % größer.

Ähnlich wie in /11, 23/ kann die resultierende Streuung der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ infolge der diskutierten Unsicherheitsquellen mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes abgeschätzt werden (das sich be-

kanntlich mit zunehmender Anzahl streuender Parameter, die näherungsweise normal verteilt sind, approximativ der strengen Lösung nähert):

$$\sigma_{t_{\ddot{a}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{w}} \cdot \sigma_{\bar{w}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \bar{Q}} \cdot \sigma_{\bar{Q}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial B} \cdot \sigma_B\right)^2} \quad (5.1)$$

- \bar{w} = bezogene Ventilation .
= $A_w \cdot \sqrt{h}/A_t$ bei natürlicher Ventilation in \sqrt{m}
- \bar{Q} = bezogene Brandlast = Q/A_t in 10^6 kJ/m²
- B = Brandherdgröße bzw. Brandlastverteilung
= $F \cdot A_t$ bei Ölbrandlasten in m² bzw.
n · Pritschen bei Kabelbrandlasten -
- $\partial t_{\ddot{a}}/\partial X_i$ = partielle Ableitungen der äquivalenten Branddauer nach den Parametern X_i
- σ_{X_i} = Standardabweichungen der Parameter X_i .

Auf diese Weise wurden folgende resultierenden Streuungen der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ ermittelt:

- bei Ölbrandlasten: 17 % bis 34 %, im Mittel 27 %
- bei Kabelbrandlasten: 16 % bis 56 %, im Mittel 24 %.

Die großen Unsicherheiten beruhen hauptsächlich auf Übergängen zwischen brandlast- und ventilationsgesteuertem Abbrand. Diesem "Grenzbereich" wurde bisher im Rahmen von DIN 18 230 zu wenig Beachtung geschenkt.

Eine Verbesserung in der Brandraummodellierung wurde auch mit dem in /26/ für den Industriebau entwickelten Wärmebilanzmodell erreicht. Neben der örtlich begrenzten Flammenzone wird darin zwischen heißen und kalten Bereichen in den Industriehallen differenziert. Der Flashover tritt nur bei Überschreitung vorgegebener Brandraumparameter (Temperaturen, Wärmestromdichten) ein, so daß in jedem Einzelfall eine differenzierte Aussage über die Art des Brandgeschehens möglich ist. Die äquivalenten Branddauern wurden für den zu Beginn auftretenden Heißgasbereich berechnet, so daß sich auf der sicheren Seite liegende Feuerwiderstandsdauern ergeben.

5.3 Bauteilspezifische Modellunsicherheiten

Neben den in Abschnitt 5.2 diskutierten zufälligen Streuungen der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ sollen die möglichen Fehler und Modellunsicherheiten aufgrund bauteilspezifischer Einflüsse noch etwas genauer analysiert werden. Vom Konzept her müßte die äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$ für ein bestimmtes Bauteil stets so definiert werden, daß die für den Feuerwiderstand maßgebende Brandwirkung im natürlichen Brand und im äquivalenten Normbrand übereinstimmen /6/ (Bild 5.1).

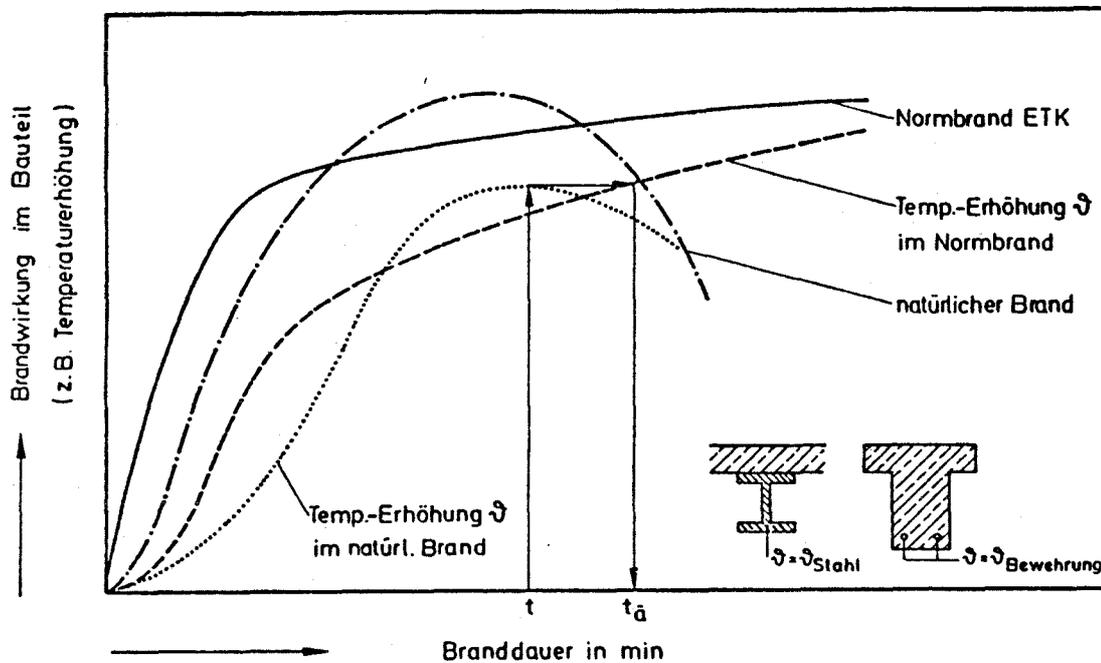


Bild 5.1 Definition der äquivalenten Branddauer durch Vergleich der Brandwirkungen im Bauteil

Ungeschützte Stahlkonstruktionen nehmen - aufgrund der guten Wärmeleitung - nach kurzer Zeit praktisch die Brandraumtemperatur an; daher kann $t_{\ddot{a}}$ vereinfachend durch Vergleich der Gastemperatur beim Natur- und ETK-Brand bestimmt werden. Dagegen folgt die Temperatur der tragenden Teile bekleideter Stahlkonstruktionen oder der Zugbewehrung von Stahlbetonbauteilen der Gastemperatur mit deutlicher Verzögerung und größerer Temperaturdifferenz. Die äquivalente Branddauer kann dabei erheblich größer werden. Als Beispiel sind in Bild 5.2 die bei einem Naturbrand und einem ETK-Brand gemessenen Temperaturen in unterschiedlicher Tiefe eines Betonbauteils und in einer Stahlplatte, die dem Vergleichs-

bauteil gemäß DIN 18 230 Teil 2 /1c/ entspricht, aufgetragen. Sie stecken in etwa den Anwendungsbereich zwischen ungeschütztem Stahl und für die Feuerwiderstandsklasse F 90 ausgelegten Stahlbeton- und geschützten Stahlbauteilen ab. Die äquivalente Branddauer $t_{\bar{a}}$ kann dabei Werte zwischen 60 und 100 Minuten annehmen. Das Vergleichsbauteil der DIN 18 230 Teil 2 verhält sich in etwa wie ein für die Feuerwiderstandsklasse F 90 bemessenes Stahlbetonbauteil oder ein entsprechend bekleidetes Stahlbauteil; es ist somit in der Tat repräsentativ für eine Vielzahl tragender Bauteile.

Einen ungünstigen Grenzfall stellen Bauteile dar, die der thermischen Isolierung dienen und bei denen die Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite (im Mittel 140 K, maximal 180 K) maßgebend für die Dimensionierung ist (z. B. Feuerschutztüren, Brandschutzklappen, leichte Trennwände o. ä.). Eine Definition von $t_{\bar{a}}$ über die Brandwirkungen in dem Vergleichsbauteils gemäß /1c/ liegt für derartige Bauteile bis zu 30 % auf der unsicheren Seite.

Über ähnliche Beobachtungen bei Stahlbauteilen hat Pettersson bereits in /15/ berichtet. Als wichtige Einflüsse auf die äquivalente Branddauer, deren Vernachlässigung größere Modellunsicherheiten zur Folge hat, identifizierte er bei ungeschützten Stahlkonstruktionen den Profilfaktor U/A (vgl. DIN 4102 Teil 4) und die resultierende Emissionszahl ϵ des Brandraumes. Bei bekleideten Stahlbauteilen sind es der Profilfaktor U/A , ein Isolationsparameter λ/d und die kritische Stahltemperatur (Bild 5.3). Besonders gravierend werden diese Einflüsse bei geringer Ventilation. Wenn der Anwendungsbereich auf kritische Stahltemperaturen um 500°C bzw. Ventilationsparameter $A_V\sqrt{h}/A_t > 0,05$ beschränkt wird, hält Pettersson die Modellunsicherheiten der folgenden bauteilunabhängigen Beziehung für akzeptabel:

$$t_{\bar{a}} = 0,067 \frac{q_t}{(A_V\sqrt{h}/A_t)^{1/2}} \quad (\text{min}) \quad (5.2)$$

mit

q_t = Brandlast bezogen auf die Raumbofläche A_t (MJ/m²)

A_V = Öffnungsfläche (m²).

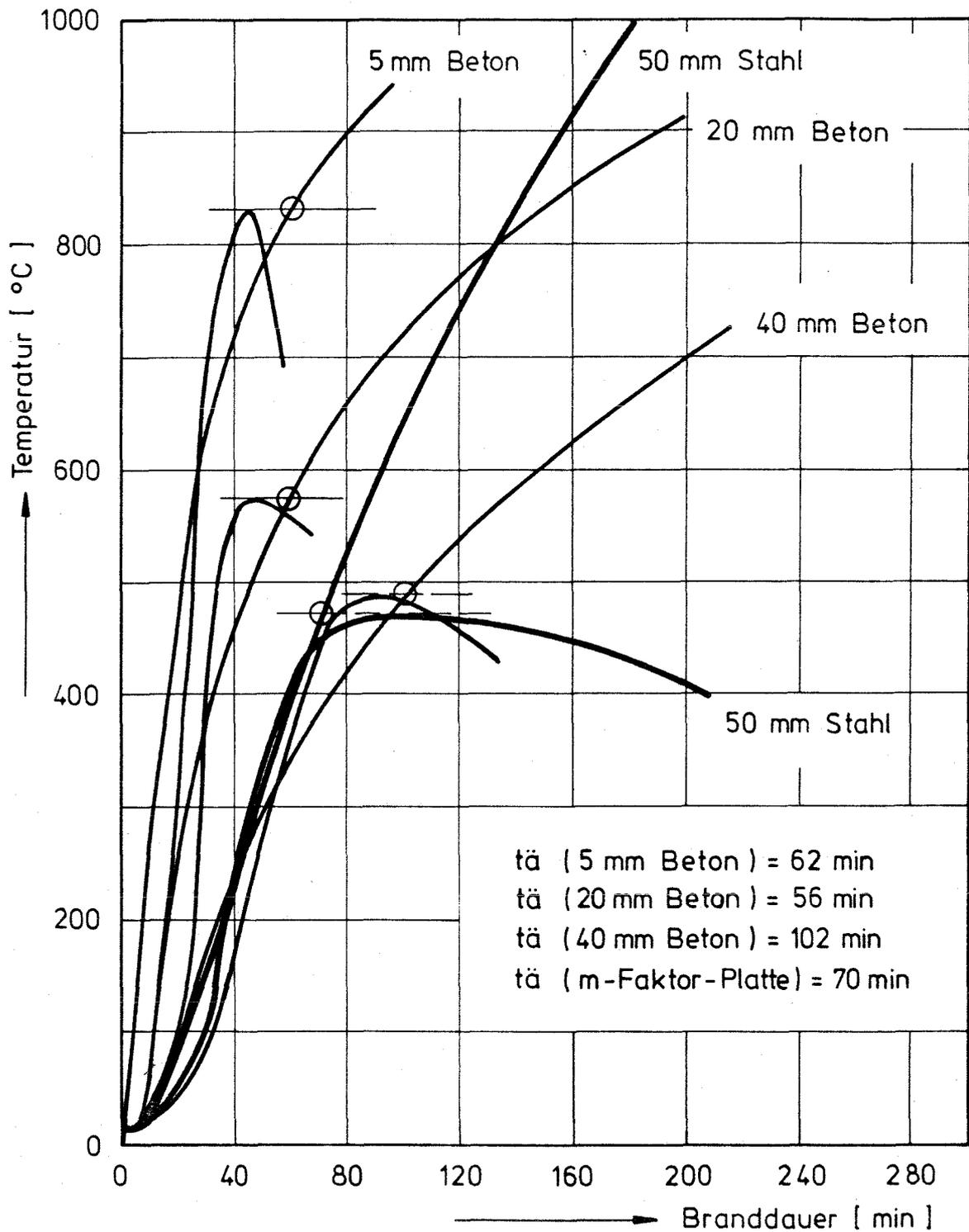


Bild 5.2 Temperaturentwicklung in unterschiedlicher Tiefe von Stahlbetonbauteilen und in einer Stahlplatte /1c/ bei Naturbrand und ETK-Brand

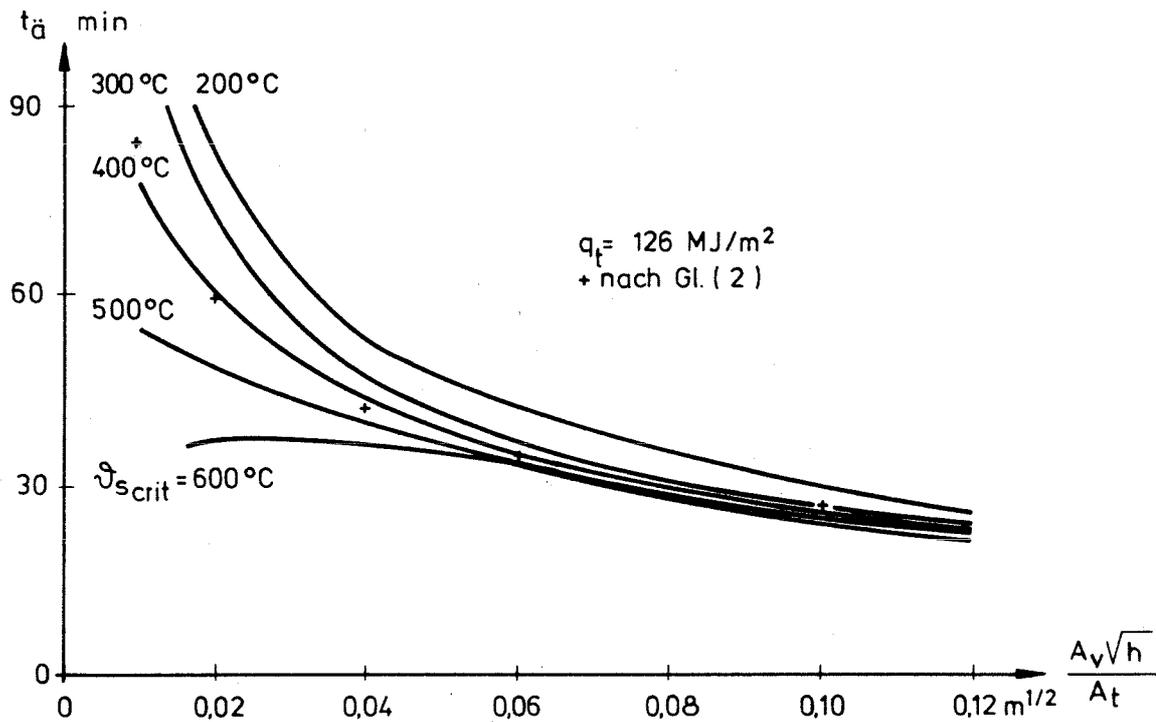


Bild 5.3 Äquivalente Branddauer bei bekleideten Stahlkonstruktionen mit unterschiedlicher kritischer Stahltemperatur (nach /7/)

Diese Beziehung stellt nach /29/ auch eine brauchbare Näherung für Bauteile aus Voll- und Brettschichtholz dar (Bild 5.4), wobei die äquivalente Branddauer über die maximale Abbrandtiefe als maßgebende Brandwirkung ermittelt wird. Die Abbrandtiefe in einem Naturbrand und in einem Normbrand kann mit Hilfe empirischer Ansätze auf der Grundlage von Versuchsergebnissen bestimmt werden.

Trotz der festgestellten Modellunsicherheiten scheint Gl. (5.2) ein brauchbarer Ansatz für eine bauteilunabhängige Definition der äquivalenten Branddauer $t_{\ddot{a}}$ zu sein, solange die erläuterten Anwendungsgrenzen eingehalten werden. Zum Vergleich mit Gl. (4.1) nach DIN V 18 230 kann Gl. (5.2) so transformiert werden, daß die Brandlast q auf die Grundfläche A des Brandbekämpfungsabschnittes bezogen und in kWh/m^2 angegeben wird:

$$t_{\ddot{a}} = 0,235 \cdot q \cdot \frac{A}{(A_v A_t \sqrt{h})^{1/2}} \quad (5.3)$$

Der Faktor 0,235 entspricht dem Umrechnungsfaktor c in /1a, 1b/. Er gilt für einen Raum mit Umfassungsbauteilen mittlerer Wärmedämmung und kann bei sehr geringer Wärmedämmung auf 0,17 zurückgehen und bei sehr hoher Wärmedämmung auf 0,41 anwachsen /14, 29/. Der Quotient stimmt mit dem analytischen Ausdruck für den Faktor w' gemäß Erläuterung zu /1a, 1b/ überein; gerechnet wird allerdings mit $w = w' \cdot \sqrt{w'}$, wobei $\sqrt{w'}$ als versteckter Sicherheitsbeiwert aufgefaßt wird. Der Faktor m der DIN V 18 230 fehlt in Gl. (5.3), da nur Holzkrippen als Brandlast untersucht wurden ($m = 1,0$). Insgesamt stimmen also die Gln. (4.1) und (5.3) vom Ansatz her überein, allerdings gibt es Abweichungen bei den Zahlenwerten für c und w . Solche Abweichungen (zur unsicheren Seite) hatte auch bereits Schneider in /6/ festgestellt, als er äquivalente Branddauern für Stahlbetonbalken auf der Grundlage von Messungen bei Brandversuchen in Metz berechnete.

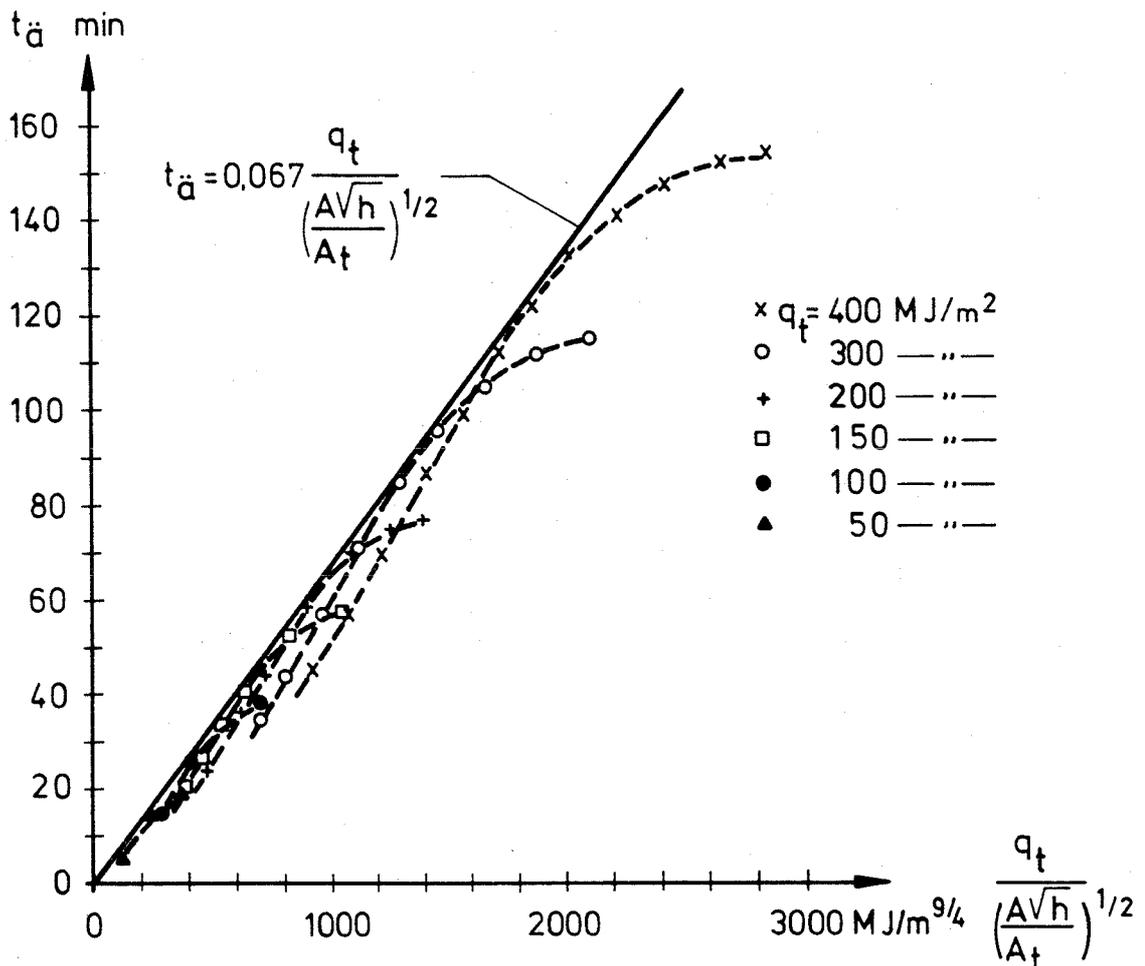


Bild 5.4 Äquivalente Branddauer von Holzbauteilen in Abhängigkeit des Parameters $q_t / (A_t)^{1/2}$ (nach /29/)

5.4 Feuerwiderstand von Stahlbetonbauteilen

In den Arbeiten /11, 23, 24, 27/ wurden auch die Tragfähigkeiten brandbeanspruchter Stahlbetonbauteile unter Gebrauchslasten behandelt. Hierbei wurden die Unsicherheiten der im Abschnitt 4.3 genannten maßgebenden Einflußgrößen quantifiziert und durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben. Als Anhalt für die Querschnittswerte und für die temperaturabhängigen Materialkennwerte dienten vorliegende statistische Daten der entsprechenden Größen bei Normaltemperatur. Auch die Verteilungsannahmen für die ständigen Lasten (aus Eigengewicht) und für die zeitlich veränderlichen Lasten (Verkehrslasten) wurden in Übereinstimmung mit Zuverlässigkeitsanalysen von Bauteilen bei Normaltemperatur gewählt. Alle Verteilungsannahmen sind im Anhang zusammengestellt.

Die Untersuchungen brachten folgende Erkenntnisse:

- Bei biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen sind die Unsicherheiten der Temperatur der Zugbewehrung und der temperaturabhängigen Stahlfestigkeit sowie die Unsicherheiten der quasi-ständig wirkenden Verkehrslast entscheidend für die resultierende Streuung der Tragfähigkeit bei Brand.
- Die Größenordnung der resultierenden Streuung ist mit der Annahme von 20 % in /2, 3/ konservativ abgeschätzt. Eine entsprechende Auswertung in /28/ für Stahlbetonstützen unterschiedlicher Schlankheit und Lastexzentrizität ergab die in Bild 5.5 gezeichneten Variationskoeffizienten der Tragfähigkeit, die auch für Biegebauteile abdeckend sind.
- Bei Stahlbetondruckgliedern (Stützen, Wände) mit geringer Schlankheit sind die Unsicherheiten der Betontemperatur und der temperaturabhängigen Betonfestigkeit neben den Lastunsicherheiten entscheidend; hier liegt die Größenordnung der resultierenden Streuung jedoch ebenfalls zwischen 15 % und 20 %.
- Stahlbetondruckglieder mit größerer Schlankheit reagieren empfindlich auf die Verformungen nach Theorie II. Ordnung. Neben den bei gedrun- genen Druckgliedern maßgebenden Parametern spielen auch Exzentrizitäten des Lastangriffs, die Bewehrungslage und Stahlfestigkeit sowie Zwängungen infolge Verformungsbehinderung eine Rolle. Die resultierenden Unsicherheiten bleiben jedoch durchweg unter 20 %.

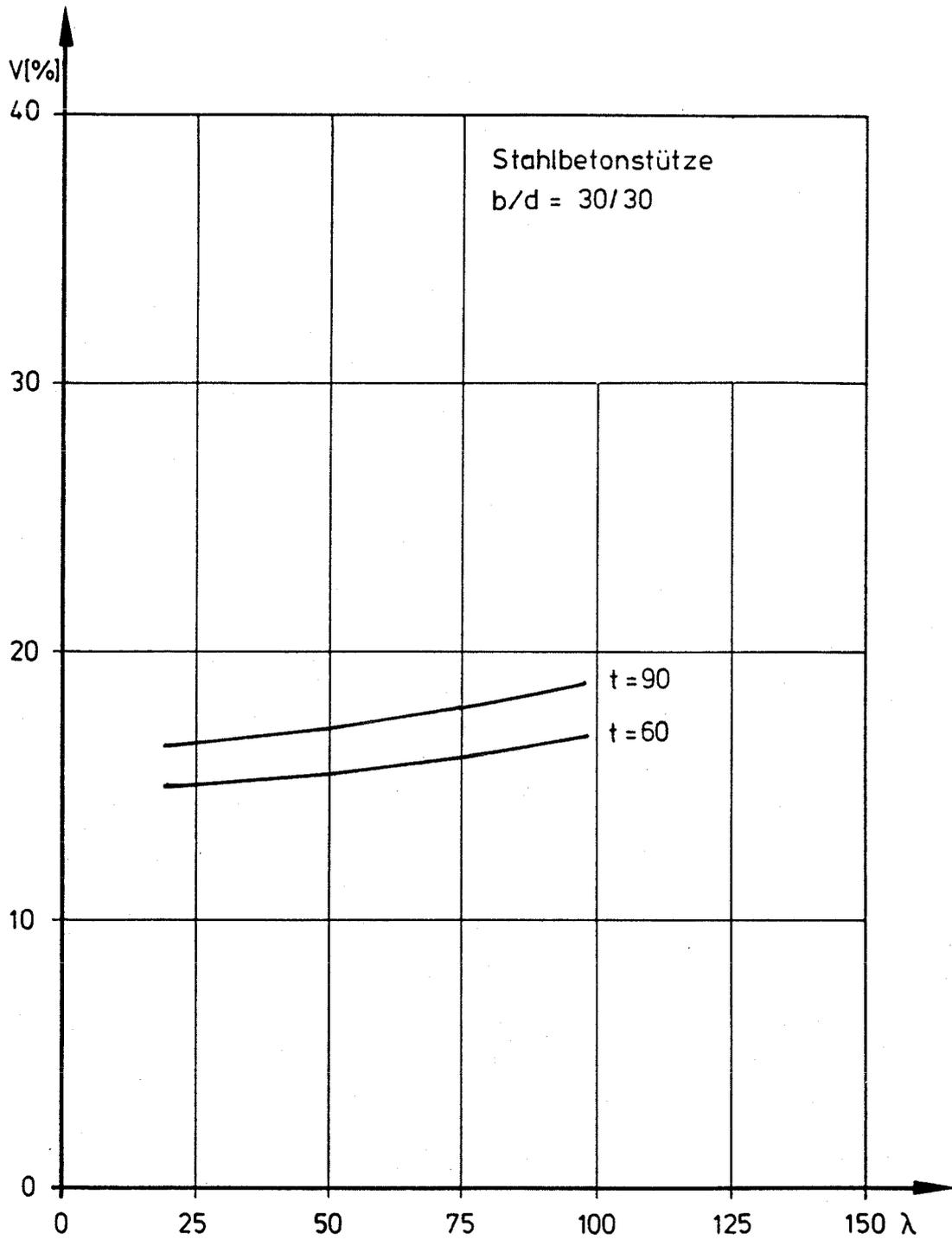


Bild 5.5 Variationskoeffizienten der Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonstützen in Abhängigkeit von der Schlankheit

5.5 Feuerwiderstand von Stahlbauteilen

Die Unsicherheiten der Tragfähigkeit von Stahlbauteilen im Brand beruhen im wesentlichen auf den Streuungen der Wärmeübergangsberechnung, der temperaturabhängigen Materialkennwerte des Stahls und der Belastung. Die rechnerischen Untersuchungen auf der Grundlage der Streuungsannahmen in /28/ (vgl. Anhang) zeigen folgende Ergebnisse:

- Hinsichtlich brandbeanspruchter, unbekleideter Stahlbauteile gelten sinngemäß die für biegebeanspruchte Stahlbetonbauteile in Abschnitt 4.3 gemachten Aussagen: die resultierenden Variationskoeffizienten liegen in der Größenordnung von 6 bis 18 %, wobei die Streuungsanteile der Verkehrslast und der Stahlfestigkeit dominieren. Feingliedrige Profile verhalten sich ungünstiger als dicke Profile (Bild 5.6).
- Bekleidete Stahlkonstruktionen zeigen aufgrund der größeren Unsicherheiten im Wärmedurchgang etwas größere Streuungen als unbekleidete Konstruktionen. In Ermangelung eigener Daten werden die Unsicherheiten in Dicke und Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials aus /28/ entnommen. Die resultierenden Variationskoeffizienten liegen zwischen 10 und 20 ‰ (Bild 5.7).

5.6 Feuerwiderstand von Holzbauteilen

Bei Holzbauteilen werden die Unsicherheiten der Tragfähigkeit im Brandfall bestimmt durch die starken Streuungen der Querschnittsreduktion durch Abbrand, die (relativ geringen) Unsicherheiten der temperaturabhängigen Materialkennwerte sowie die Laststreuungen. Zusätzlich sind bei schlanken Stützen die Unsicherheiten aus Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Berechnungen auf der Basis der Annahmen von /28/ sind in den Bildern 5.8 und 5.9 grafisch dargestellt. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

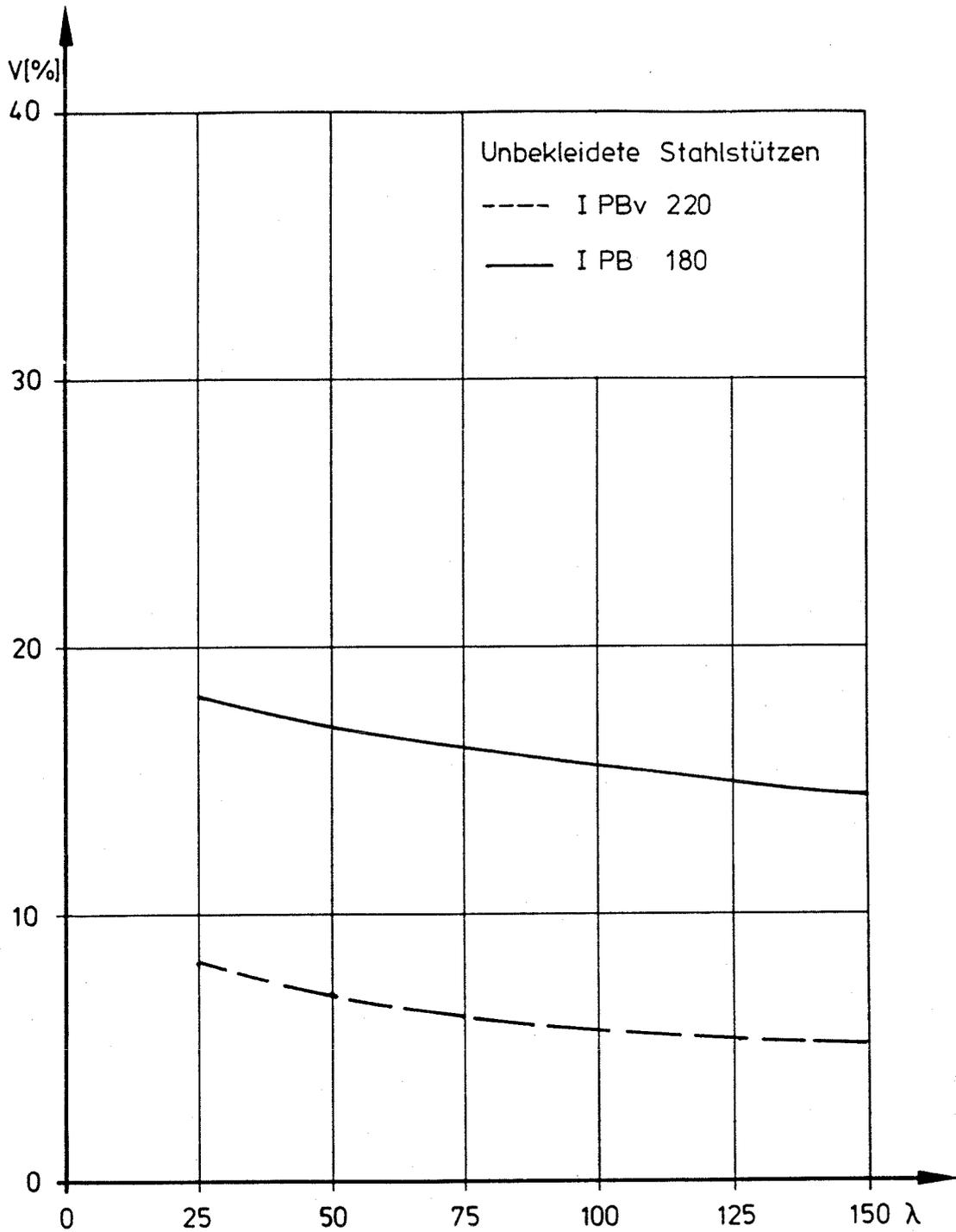


Bild 5.6 Variationskoeffizienten der Tragfähigkeiten brandbeanspruchter, unbekleideter Stahlstützen in Abhängigkeit von der Schlankheit

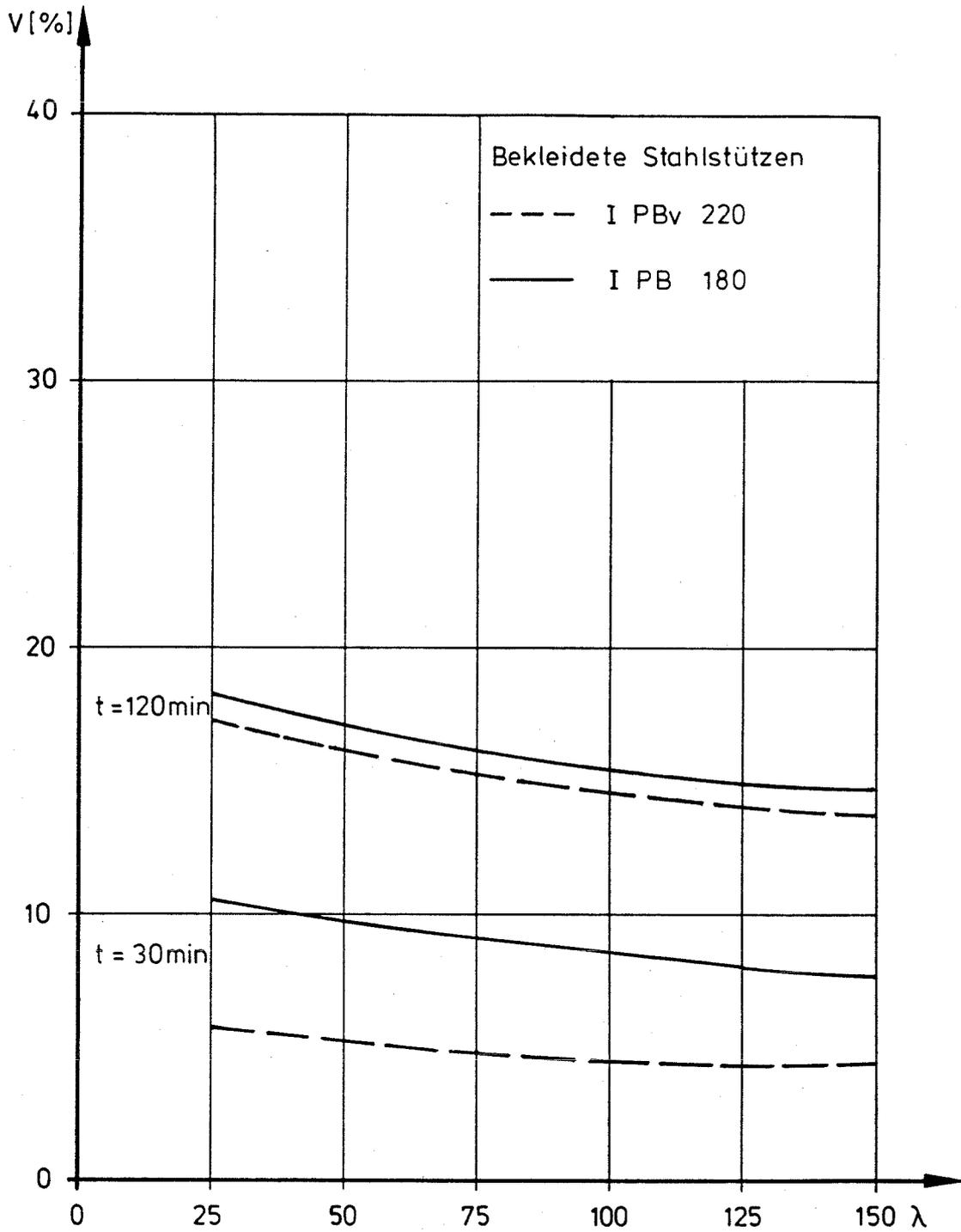


Bild 5.7 Variationskoeffizienten der Tragfähigkeiten brandbeanspruchter bekleideter Stahlstützen in Abhängigkeit von der Schlankheit

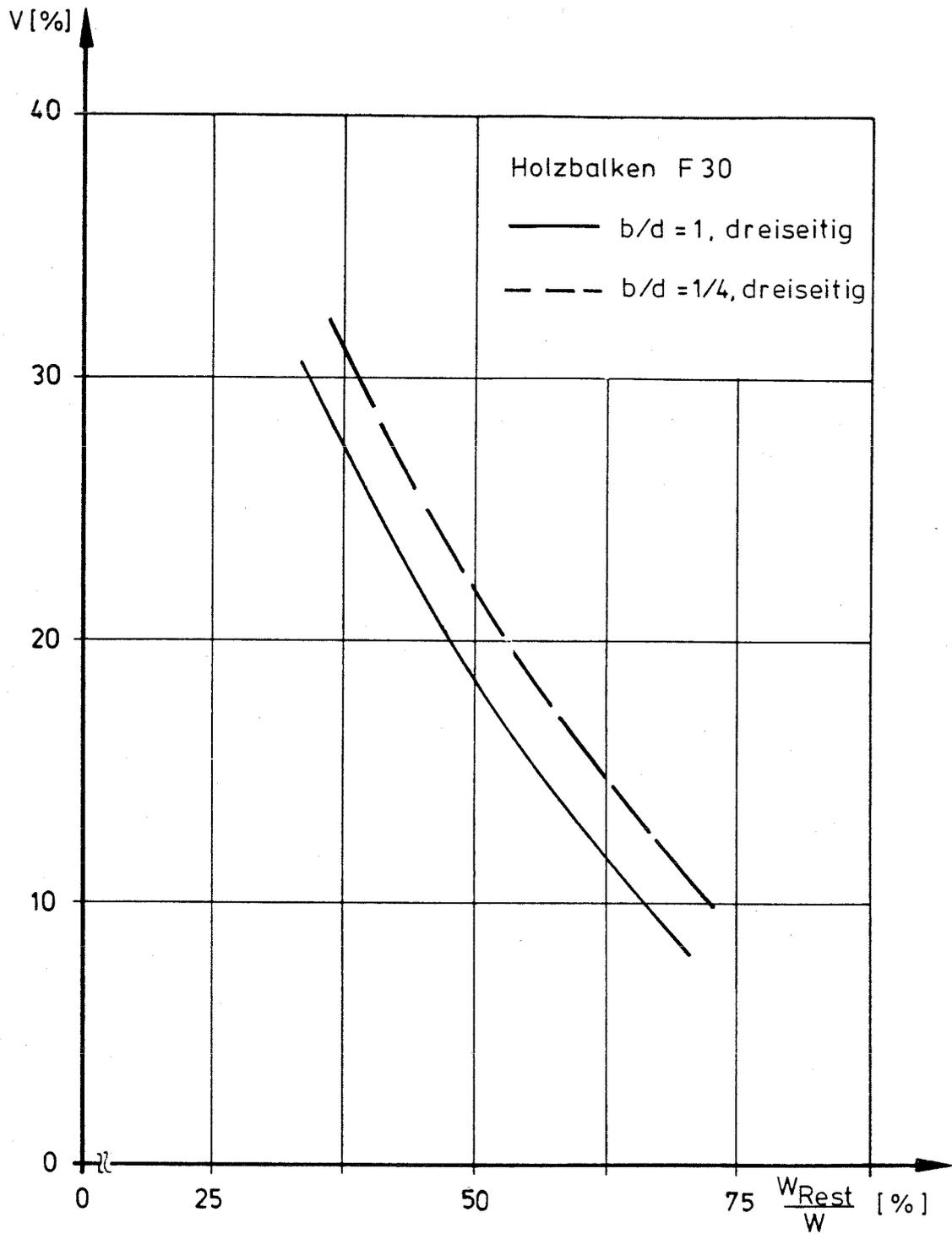


Bild 5.8 Variationskoeffizienten der Tragfähigkeiten brandbeanspruchter Holzbalcken in Abhängigkeit vom verbleibenden Restwiderstandsmoment

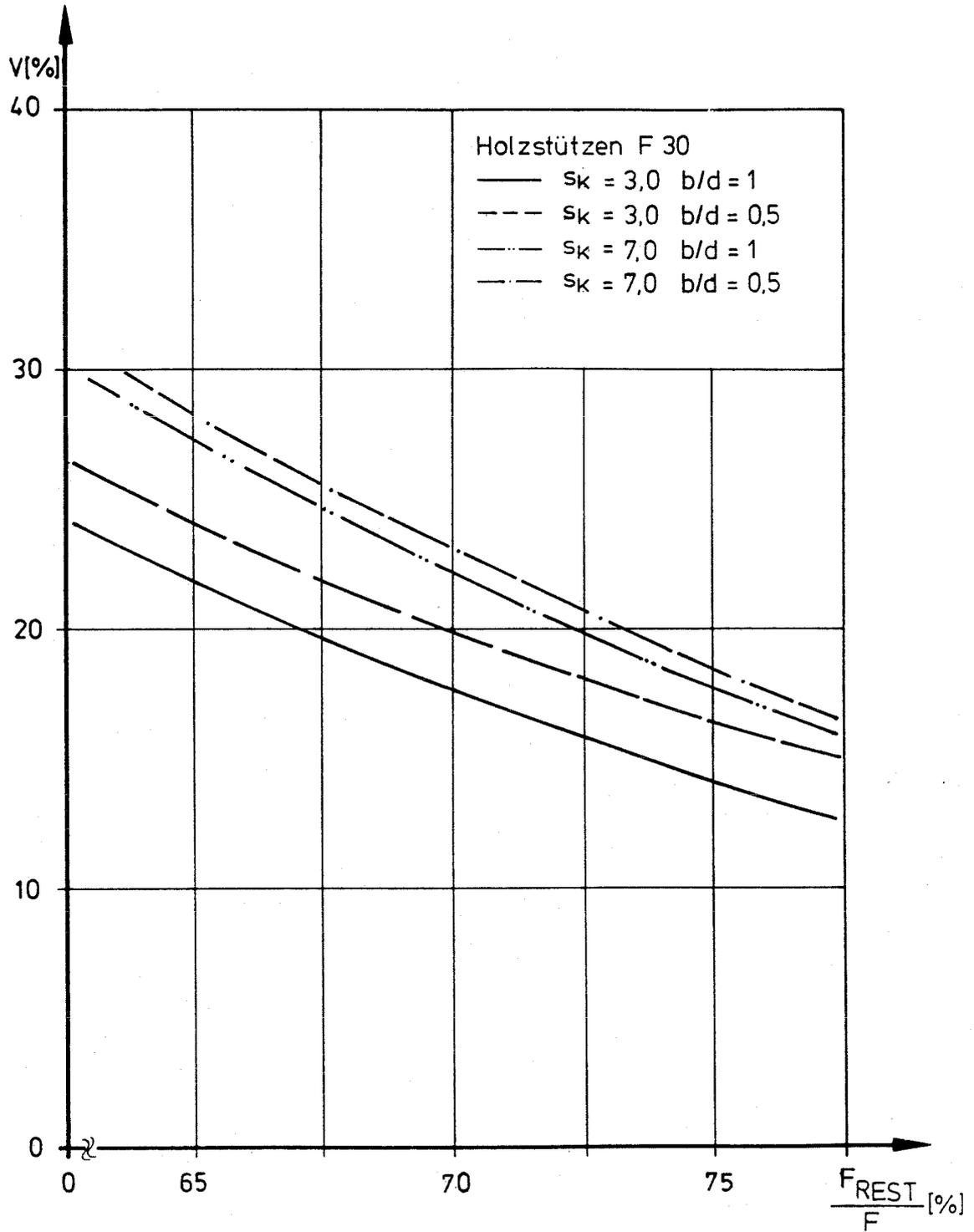


Bild 5.9 Variationskoeffizienten der Tragfähigkeiten brandbeanspruchter Holzstützen in Abhängigkeit vom verbleibenden Restquerschnitt

- Allein aufgrund der Abbrandfunktion sind resultierende Streuungen der Tragfähigkeit von 10 % - 20 % bei planmäßig zentrisch belasteten Stützen zu erwarten; die Streuungsanteile der Materialkennwerte und Belastung tragen dazu relativ wenig bei.
- Bei exzentrisch belasteten schlanken Stützen und bei Balken wächst die Unsicherheit im Abbrand aufgrund von beanspruchungsbedingten Abplatzungen noch an, so daß in der Summe deutlich über 20 % als resultierende Streuung möglich sind.
- Die Unsicherheiten sind besonders groß bei sehr schlanken Querschnitten, bei denen der nach Abbrand verbleibende Restquerschnitt unter 70 % des Ausgangsquerschnittes liegt; in diesen Fällen steigt der Variationskoeffizient auf Werte von 30 - 50 % an.

5.7 Vergleich mit Ergebnissen von Normbrandversuchen

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen für Kernkraftwerke /23, 24/ wurden auch eine Reihe von Sonderbauteilen hinsichtlich der Streuungen der Feuerwiderstandsdauer im Normbrand untersucht, und zwar:

- Feuerschutztüren
- Brandschutzklappen
- Kabelabschottungen
- Leichte Trennwände.

In der Mehrzahl der Fälle war die maximale Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite für das Bauteilver sagen im Normbrand maßgebend. Bei einem Türtyp führte der Wattebauschversuch für den Raumabschluß zur Klassifizierung. Die mittlere Temperaturerhöhung war bei einigen leichten Trennwänden entscheidend für die Einstufung. Die Standsicherheit der nur durch ihr Eigengewicht belasteten Bauteile war in keinem Fall durch Brand gefährdet. Die statistischen Kennwerte der Feuerwiderstandsdauern aller betrachteten Bauteile der Klasse F 90 nach dem o. g. Temperaturkriterium sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt. Hieraus geht hervor, daß die mittleren Feuerwiderstandsdauern m_{tf} bei 100 bis 115

min liegen. Die Versuchsstreuungen (Variationskoeffizient V_{tf}) betragen 11 % - 24 %. Nach Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer von 90 min haben die Bauteile eine Versagenswahrscheinlichkeit $p_N = 8 - 28 \%$.

Tabelle 5.1: Statistische Kennwerte der Feuerwiderstandsdauer der betrachteten F 90 Bauteile nach dem Temperaturkriterium (180 K)

Bauteil	Bauart Variante	Kennwert			
		m_{tf} (min)	σ_{tf} (min)	V_{tf}	p_N %
Feuerschutz- türen	-	115	28	0,24	19
Brandschutz- klappen	a)	96	10,6	0,11	28
	b)	103	16,5	0,16	8
Kabelschotts	Wandschotts	104	16	0,15	19
leichte Trennwände	-	106	13	0,12	11
a) in nichtbrennbaren Leitungen b) in brennbaren Leitungen					

Es zeigte sich, daß die Streuungen der Feuerwiderstandsdauer - wie bei den zuvor behandelten Bauteilen - in der Regel zwischen 10 % und 20 % (vgl. V_{tf}) liegen; ein "Ausreißer" trat bei Feuerschutztüren mit 24 % auf.

Die Ergebnisse aller Bauteiluntersuchungen sind nochmals in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Man erkennt, daß - abgesehen von schlanken Stahlbetonstützen, schmalen Holzbauteilen und Feuerschutztüren - die resultierenden Streuungen der Feuerwiderstandsdauern unterschiedlichster Bauteile unter 20 % bleiben. Dies entspricht dem Ansatz im Sicherheitskonzept der DIN V 18 230 /2, 3/. Darin sind jedoch nicht die Modellunsicherheiten infolge von Abweichungen zwischen den im Normbrandversuch geprüften und den in Bauwerken eingebauten Bauteilen enthalten.

Tabelle 5.2 Resultierende Variationskoeffizienten und Nennwertfraktilen der Feuerwiderstandsdauer unterschiedlicher Bauteile

Bauteil	Quelle	Variationskoeffizient (%)	Bemerkung	Nennwertfraktile (%)	Bemerkung
Stahlbetonbauteile - Biegebauteile - Druckglieder	/11,23,28/	6 bis 15 10 bis 20		< 10 > 10	bei / > 20
Stahlbauteile - unbekleidet - bekleidet	/28/	6 bis 20 6 bis 20		z.T. > 10	bei U/A > 100
Holzbauteile - Balken - Stützen	/28/	8 bis 30	bei $\frac{A_{Rest}}{A} < 70$	< 10 z.T. > 10	bei $q_t > 200 \frac{MJ}{m^2}$
Sonderbauteile - Feuerschutztüren - Brandschutzklappen - Kabelschotts - leichte Trennwände	/23,24/	24 11 bis 16 15 12	Vorderseite	19 8 bis 28 19 11	bei Zulassungsprüfungen

Die Nennwertfraktilen in Tabelle 5.2 besagen, welcher Prozentsatz geprüfter Bauteile bereits vor dem Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer versagen kann. In /2, 3/ wurde dieser Prozentsatz mit 10 % angenommen, was angesichts von Tabelle 5.2 bei einigen Bauteilen etwas zu optimistisch erscheint, insbesondere bei schlanken Stahlbetonstützen, bei Stahlbauteilen mit größerem Profilmfaktor, bei Holzstützen im Falle größerer Brandlasten und bei nahezu allen Sonderbauteilen. Die größeren Nennwertfraktilen deuten auf Abweichungen vom durchschnittlichen brandschutztechnischen Sicherheitsniveau zur unsicheren Seite hin. Derartige systematische Abweichungen müssen im Rahmen der Bemessung, nicht jedoch durch Anhebung der Nennwertfraktile im Sicherheitskonzept korrigiert werden.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

6.1 Nachweiskonzept

Der große Vorzug des Bemessungsverfahrens der DIN V 18 230 für den baulichen Brandschutz im Industriebau liegt in der quantitativen Berücksichtigung der wesentlichen brandschutztechnischen Gegebenheiten des betrachteten Brand(bekämpfungs)abschnittes, nämlich

- Brandlast,
- Abbrandverhalten,
- Ventilationsverhältnisse,
- Wärmeaufnahme durch die Umfassungsbauteile.

Damit ist dieses Verfahren jeder empirischen Festlegung von Brandschutzanforderungen an Bauteile überlegen. Dies gilt auch dann, wenn das zugrundeliegende Rechenmodell der äquivalenten Normbranddauer eine starke Vereinfachung der Realität darstellt und im Vergleich zu genaueren Rechnungen und Versuchen zum Teil abweichende Ergebnisse liefert.

Dessen ungeachtet sollten bei der fälligen Überarbeitung der Vornorm einige inzwischen offenkundig gewordenen Mängel beseitigt werden. Sie betreffen vor allem

- die zum Teil fehlerhafte Einschätzung des Einflusses der Brandraumgeometrie und der Ventilation auf das Abbrandverhalten und die Temperaturentwicklung in größeren Räumen,
- die systematischen Fehler durch Vernachlässigung der Bauteilabhängigkeit der äquivalenten Branddauer ohne Beschränkung der Anwendungsgrenzen,
- die zum Teil zu günstigen Annahmen zur Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden und zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit sowie die Vernachlässigung nutzungsspezifischer Unterschiede,

- die zum Teil zu gering angesetzten zufälligen Streuungen der äquivalenten Branddauer und der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen,
- die fehlende Möglichkeit vereinfachter Nachweise bei konservativen Rechenannahmen.

Die in /26/ aufgezeigten systematischen Fehler bei der Einschätzung des Ventilationseinflusses und der Brandraumgeometrie lassen sich nur eliminieren, wenn die Abhängigkeit zwischen dem Abbrandverhalten eines Brandgutes und der Ventilation konsequenter beachtet wird. Hier kann die Vorgabe von Abbrandfunktionen in Abhängigkeit der Ventilation weiterhelfen, wobei die jetzt vorliegenden Abbrandfaktoren m gemäß /1c/ ggf. als Einhängewerte für definierte Ventilationsverhältnisse dienen können /24/. Es deutet sich aus den bisherigen Untersuchungen an, daß die m -Faktoren bei bestimmten Ventilationsverhältnissen deutlich überschritten werden können; die "optimalen" Ventilationsverhältnisse sind von der Brandlastart- und Anordnung abhängig und lassen sich daher vermutlich nur aufgrund von Versuchen in größerem Maßstab sinnvoll eingrenzen. Auch der Wärmeabzugseffekt bedarf einer kritischen Überprüfung, insbesondere in ausgedehnten Brandabschnitten mit Wärmeabzugsöffnungen in größerer Entfernung vom Brandherd.

Die äquivalente Branddauer kann weiterhin bauteilunabhängig ermittelt werden, wenn die Anwendungsgrenzen klar definiert sind. Grundsätzlich lassen sich tragende Einzelbauteile zutreffend erfassen, deren Versagen im Brandfall durch Erreichen einer kritischen Temperatur von ca. 400 bis 600 ° C im Bau- oder Betonstahlquerschnitt an der am stärksten beanspruchten Stelle eingeleitet wird. Stellvertretend für diese Bauteile darf weiterhin das Vergleichsbauteil gemäß DIN 18 230 Teil 2 /1c/ zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer herangezogen werden. Näherungsweise dürfen stabilitätsgefährdete Stahlbeton- und Stahlstützen in gleicher Weise behandelt werden, wobei hier der Steifigkeitsverlust an der kritischsten Stelle bei etwa den o.g. Temperaturen für das Versagen im Brandfall entscheidend ist. Auch bei tragenden Holzbauteilen liegen die äquivalenten Branddauern in ähnlicher Größenordnung. Bei Gesamttragwerken wie Durchlaufdecken oder -träger, Rahmen, Fallwerke sind in der Regel vielfältige Möglichkeiten zur Lastumlagerung in geringer

erwärmte oder beanspruchte Bereiche vorhanden, die sich im Brandfall günstig auf die Tragfähigkeit auswirken. Die in der Praxis übliche getrennte brandschutztechnische Bemessung der Einzelbauteile dieser Tragwerke nach den vorgenannten Grundsätzen liegt daher im allgemeinen auf der sicheren Seite, sofern ungünstige Effekte infolge von Zwängungen ausgeschlossen werden können.

Zusatzüberlegungen sind dagegen erforderlich, wenn Bauteile betrachtet werden, die primär dem Raumabschluß dienen und im Brandfall durch Überschreiten einer relativ geringen Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite (140 K bzw. 180 K) versagen. Hier kann $t_{\ddot{a}}$ um bis zu 30 % höher ausfallen. Ein Sicherheitszuschlag in dieser Größenordnung könnte ein erster (vorsichtiger) Schritt zur Korrektur sein.

Weiterhin sollten die Umrechnungsfaktoren c gemäß /1a, 1b/ überprüft werden; bei der heute üblichen guten Wärmedämmung von Umfassungsbauteilen erscheint der obere Grenzwert 0,25 recht niedrig; eine Untergliederung mit Werten bis zu 0,35 - die bereits bei den ersten Versuchen und Berechnungen zur äquivalenten Branddauer /6/ erreicht wurden - könnte hier weiterhelfen. Als Anhalt können die umfassenderen Versuchswerte gemäß /14/ dienen.

6.2 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept /2, 3/ der DIN V 18 230 ist zu überarbeiten, wobei eine höhere durchschnittliche Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brände (etwa $5 \cdot 10^{-7}$ bis 10^{-6} je m^2 und Jahr) anzunehmen ist. Nutzungsspezifische Werte können unterschieden werden, wenn eine gesicherte Datenbasis mit eindeutigen Klassifizierungen vorliegt; ein erster Schritt in diese Richtung wurde mit den statistischen Auswertungen in /4/ getan, wobei jedoch eine weitere Absicherung unumgänglich erscheint. Außerdem sollten die in /2, 3/ geschätzten zufälligen Streuungen der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen auf 25 % angehoben werden. Bei den sehr schmalen Holzbauteilen, die nach längerer Branddauer nur noch geringe Restquerschnitte aufweisen, ist der

Anwendungsbereich so zu beschränken, daß die Querschnittsminderung durch Abbrand ca. 25 % nicht überschreitet.

Bei einigen Bauteilen, die größere Streuungen in der Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen, aber dennoch aus wirtschaftlichen Gründen knapp bemessen werden, liegt die Wahrscheinlichkeit, bereits vor dem Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer zu versagen, über den in /2, 3/ zugrundegelegten 10 %. Hier kann nur durch eine konsequente Qualitätssicherung vermieden werden, daß das angestrebte Sicherheitsniveau unterschritten wird.

Aufgrund der bisherigen Vergleichsrechnungen und Erfahrungen mit der DIN V 18 230 /1/ erscheint eine generelle Anhebung des Sicherheitsniveaus nicht gerechtfertigt. Daher wurde eine Neukalibrierung der erforderlichen Zuverlässigkeit vorgenommen, die sich an den bereits in /2, 3/ verwendeten Eckwerten des Sicherheitskonzeptes orientierte. Es zeigte sich bei den in Anhang 2 dokumentierten Berechnungen, daß sich die aus Brand resultierende Versagenswahrscheinlichkeit von Einzelbauteilen lediglich auf $p_f \approx 10^{-5}$ bei mehrgeschossigen Industriegebäuden bzw. auf $p_f \approx 5 \cdot 10^{-5}$ bei eingeschossigen Industriegebäuden erhöht, wenn die Sicherheitsbeiwerte aus /1/ auch weiter beibehalten werden. Dies ist vertretbar, weil das Versagen erst nach einer längeren Branddauer - und somit nach ausreichender Vorwarnung und Möglichkeit zur Intervention - zu erwarten ist.

6.3 Vereinfachungsmöglichkeiten

Bei der Überarbeitung der DIN V 18 230 sollte die Möglichkeit eröffnet werden, die Bemessung auch dann durchzuführen, wenn anstelle einer Ermittlung der Brandlasten im Einzelfall Durchschnittswerte für bestimmte Nutzungsklassen, z.B. nach /30/, in Ansatz gebracht werden. In diesem Fall sind jedoch höhere Sicherheitsbeiwerte, entsprechend den größeren Brandlaststreuungen in einer Nutzungsklasse, zu verwenden. Beobachtet wurden aufgrund der Heterogenität innerhalb der Nutzungsklassen Variationskoeffizienten von im Schnitt 60 %, was ein beträchtliches Vorhaltemaß bereits in der Festlegung des Brandlastnennwertes

als 90 %-Fraktile erforderlich macht. Der Vorteil in der Verwendung von Durchschnittswerten der Brandlast liegt zweifellos in der Möglichkeit, ohne großen Aufwand zu einer groben (Vorweg-)Einstufung des erforderlichen Brandschutzniveaus zu kommen. Sofern die daraus resultierenden Anforderungen nicht problemlos erfüllt werden können, ist eine genauere Betrachtung mit im Einzelfall ermittelten Brandlasten durchzuführen.

7. LITERATURHINWEISE

- / 1/ DIN 18 230 "Baulicher Brandschutz im Industriebau"
Vornorm, Ausgabe
- / 2/ Hosser, D.: Sicherheitskonzept des Entwurfs DIN 18 230. Baulicher Brandschutz, Bemessung im Industriebau, Institut für Bautechnik, 1. Auflage, März 1979
- / 3/ Bub, H. et al.: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. Baulicher Brandschutz im Industriebau. Berlin, Köln; Beuth Verlag GmbH, 1979
- / 4/ Schneider, U., Hosser, D. und Kersken-Bradley, M.: Statistische Ermittlung der Brandentstehungshäufigkeit und -ausbreitungswahrscheinlichkeit in Industriegebäuden. Abschlußbericht zum IfBt-Forschungsvorhaben IV/1 - 5 - 460/86
- / 5/ DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen"; Teil 2: Bauteil, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977
- / 6/ Schneider, U.: Ermittlung der äquivalenten Normbranddauer gemäß dem Entwurf von DIN 18 230. Baulicher Brandschutz, Bemessung im Industriebau, Institut für Bautechnik, 1. Auflage, März 1979

- / 7/ Schneider U. et al.: Wärmebilanzberechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen. Forschungsbericht TU Braunschweig, September 1980
- / 8/ Schneider, U. und Haksever, A.: Probleme der Wärmebilanzberechnung von natürlichen Bränden in Gebäuden. Bauphysik 1/1981, S. 22 - 31
- / 9/ Bub, H. et al.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Schriftenreihe Brandschutz im Bauwesen (BRABA), Heft 4, 1983
- /10/ Comité Euro-International du Béton (CEB): Design of Concrete Structures for Fire Resistance. Preliminary Draft of an Appendix to the CEB/FIP-Model Code. CEB-Bulletin No. 145, Munich 1982
- /11/ Hosser, D. und Schneider, U.: Sicherheitsanforderungen für brandschutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauteilen nach der Wärmebilanztheorie. VFDB-Zeitschrift, Heft 1/1982 und 2/1982
- /12/ Kordina, K. und Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz- Handbuch. Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH, 1981
- /13/ Anderberg, Y. et al.: Eine differenzierte Bemessung brandbeanspruchter Baukonstruktionen aus Beton. Lund, Institute of Technology, Lund, Schweden. Deutsche Übersetzung Institut für Bautechnik, 1977
- /14/ Pettersson, O. et al.: A differentiated design of fire exposed steel structures. Lund Institute of Technology, Lund, Schweden, 1974
- /15/ Pettersson, O.: The connection between a real fire exposure and the heating conditions according to standard fire resistance

- tests - with special application to steel structures. Lund Institute of Technology, Lund, Schweden, 1975
- /16/ Ehm, H.: Das Brandverhalten von Stahlbauteilen und Stahlkonstruktionen. EKS-III-74-2-D, Brandsicherheit im Stahlbau, Teil IV, 1974
- /17/ Bongard, W.: Unverkleidete Stahlkonstruktionen - Brandverhalten und Verwendungsbereich. EKS-III-74-2-D, Brandsicherheit im Stahlbau, Teil V, 1974
- /18/ European Convention for Constructional Steelwork: European Recommendations for the Design of Steel Structures Exposed to the Standard Fire. Final Draft, July 1979
- /19/ Jönsson, R. and Pettersson, O.: Timber structures and fire. Swedish Council for Building Research, D3, 1985
- /20/ Kordina, K. et al.: Sicherheitsbetrachtung über die Normbrandprüfung an tragenden Bauteilen im Wohnungsbau. Abschlußbericht zum IfBt-Forschungsvorhaben IV/1-5-373/83, Braunschweig, November 1984
- /21/ Hahn, T.: Brandschutztechnische Bemessung von Holzbauteilen. Diplomarbeit, Gesamthochschule Kassel, April 1984
- /22/ Rudolphi, R.: Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen. Forschungsbericht 72, Bundesanstalt für Materialprüfung, September 1980
- /23/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) und Arbeitsgemeinschaft Brandschutz in Kernkraftwerken (ABK). Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken. Abschlußbericht zum BMI-Vorhaben SR 144/1, September 1985

- /24/ Schneider, U.; Hosser, D. und Max, U.: Nachweisverfahren für den Brandschutz in Kernkraftwerken. Abschlußbericht zum IfBt-Forschungsvorhaben IV/1-5-424/85
- /25/ Haksever, A. und Hagen, E.: Natürlicher Brand, seine Einflußparameter in kleinen und großen Brandräumen. Schlußbericht Teilprojekt C 3/SFB 148, Braunschweig, Mai 1988
- /26/ Schneider, U.; Max, U.: Einfluß des Wärmestaus und Wärmeabzugs auf die Brandwirkungen im Stahlbeton-Industriebau (DIN 18 230). Forschungsbericht DBV 115, Universität Kassel, Mai 1988
- /27/ Magnusson: Probabilistic analysis of fire exposed steel structures. Lund Institute of Technology, Lund, Schweden, 1974.
- /28/ Kordina, K. und Henke, V.: Sicherheitstheoretische Untersuchungen zur Versagenswahrscheinlichkeit von brandbeanspruchten Bauteilen bzw. Bauwerksabschnitten. Schlußbericht Teilprojekt D1/SFB 148, Braunschweig, April 1987
- /29/ Pettersson, O. und Jörnsson, R.: Reliability based design of fire exposed timber structures - state of art and summary design guide. Lund, Schweden, 1988
- /30/ Schneider, U. und Max, U.: Brandlasterhebungen in Industrie-Stahlhallen. Abschlußbericht im Rahmen des BMFT-Projektes BAU 6004/Studiengesellschaft P 86, Kassel, Juni 1984

ABSCHLUSSBERICHT

zum Forschungsvorhaben

**VERGLEICHENDE SICHERHEITSBETRACHTUNG
ZUR BRANDSCHUTZTECHNISCHEN BEMESSUNG
UNTERSCHIEDLICHER BAUTEILE
NACH DEM t_a -VERFAHREN (DIN 18 230)**

ANHANG 1

Verteilungsannahmen für die zufällig streuenden
Einflußgrößen

August 1988
(Revision August 1989)

Tabelle A1: Verteilungsmaßnahmen für die Einflußgrößen der Tragfähigkeitsnachweise von Stahlbetonbauteilen nach /11,23/

Einflußgröße	Nennwertfraktile	Verteilungstyp	Variationskoeffizient	Bemerkung
Bauteiltemperatur T_b, T_s	Mittelwert	normal	$V = 20 \%$ 10%	Naturbrand Normbrand
Betondruckfestigkeit β_R	5 %	normal	15 %	
Stahlfießgrenze β_s	5 %	normal	6 %	
E-Modul Beton E_b	Mittelwert	normal	10 %	
E-Modul Stahl E_s	Mittelwert	normal	5 %	wie bei Raumtemp.
Bewehrungslage u	Mittelwert	normal	25 %	
ständige Last g, N_g	Mittelwert	normal	5 %	
Nutzlast p, N_p	98 % 57 %	Extremal I	40 % 5 %	Naturbrand Normbrand

Tabelle A2: Verteilungsmaßnahmen für die Einflußgrößen der Tragfähigkeitsnachweise von Stahlbetonstützen nach /28/

Einflußgröße	Nennwertfraktile	Verteilungstyp	Variationskoeffizient/ Standardabweichung	Bemerkung
Bauteiltemperatur T_b, T_s	Mittelwert	Dreiecksvert.	$\Delta = 5 - 10 \%$	Normbrand
Betondruckfestigkeit β_R	5 %	normal	$\sigma = 5 \text{ MN/m}^2$	wie bei Raumtemp.
Stahlfießgrenze β_s	5 %	normal	$V = 5,6 \%$	"
Querschnittsabmessungen b, d	Mittelwert	Dreiecksvert.	$V = 2,5 - 3,5 \%$	$\Delta = \frac{\quad}{\sqrt{0,15 \cdot x}}$ analog b, d
Bewehrungslage u	Mittelwert	Dreiecksvert.	$\sigma = 0,9 - 1,6 \text{ cm}$,	
ständige Last D	Mittelwert	normal	$V = 18 \%$)
Verkehrslast L	10 %	normal	$V = 52 \%$)zusammen-)gefaßt

Tabelle A3: Verteilungsmaßnahmen für die Einflußgrößen der Tragfähigkeitsnachweise von bekleideten Stahlstützen

Einflußgröße	Nennwertfraktile	Verteilungstyp	Variationskoeffizient	Bemerkung
Brandraumtemperatur T	Mittelwert	normal	V = 5 %	Normbrand
Stahlstreckgrenze $\beta_{s,0}$	Mittelwert 27,81 kN/cm ²	log. normal	V = 6,5 %	St 37 bei Raumtemp.
Elastizitätsmodul E_0	Mittelwert	log. normal	$\sigma = 0,04 \cdot 10^4$ kN/cm ²	St 37 bei Raumtemp.
Querschnittsabmessungen h, b	Sollwert	normal	$\sigma = 1,5 - 2$ mm	
Querschnittsdicke t, s	(1,0-1,02) · So	normal	$\sigma = 0,45 + 0,014 \cdot So$ $0,3 + 0,03 \cdot So$	So = Sollwert
Wärmeleitfähigkeit λ_i	Mittelwert	normal	V = 20 %	temperaturabhäng.
Bekleidungsstärke d_i	Mittelwert	log. normal	V = 20 %	
ständige Last g	0,5 · q _{DIN}	normal	V = 10 %	
Verkehrslast p	0,329 · q _{DIN} - 1,517 · σ	Extremal I	$\sigma = 0,131 \cdot q_{DIN}$	quasi-ständiger Anteil

Tabelle A4: Verteilungsmaßnahmen für die Einflußgrößen der Tragfähigkeitsnachweise von Holzbauteilen nach

Einflußgröße	Nennwertfraktile	Verteilungstyp	Variationskoeffizient	Bemerkung
Brandraumtemperatur T		deterministisch		Normbrand
Quetschgrenze σ_D	Mittelwert 37,8 N/mm ²	log. normal	V = 16 %	
Elastizitätsmodul E	Mittelwert 1,275 · 10 ⁴ N/mm ²	log. normal	V = 20 %	
Biegedruckfestigkeit σ_{BR}	Mittelwert 77,3 N/mm ²	log. normal	V = 16 %	
Abbrandfunktion w (t)	Mittelwert	normal	V = 8,7 % 12 % 20 %	Stütze Balken, seitl. Balken, oben/ unten
Eigengewicht D	Mittelwert	normal	V = 10 %	
Nutzlast L	0,657 · L _{DIN} - 1,517 · σ	Extremal I	$\sigma = 0,262 L_{DIN}$	quasi-ständiger Anteil

ABSCHLUSSBERICHT

zum Forschungsvorhaben

**VERGLEICHENDE SICHERHEITSBETRACHTUNG
ZUR BRANDSCHUTZTECHNISCHEN BEMESSUNG
UNTERSCHIEDLICHER BAUTEILE
NACH DEM $t_{\ddot{a}}$ -VERFAHREN (DIN 18 230)**

ANHANG 2

Ermittlung der Sicherheitsbeiwerte der DIN V 18 230 mit
bisherigen und überarbeiteten Eingangsgrößen

August 1988
(Revision August 1989)

Erläuterungen:

P = Auftretenswahrscheinlichkeit eines Vollbrandes ($p_1 \cdot p_2$)

PF3 = zul. Versagenswahrscheinlichkeit in SK_b 3

AZUL = Referenzfläche für größenabhängige Wichtung von PF3

VF,VT = Variationskoeffizienten von t_f bzw. $t_{\ddot{a}}$

KT,KF = Fraktilfaktoren für t_f bzw. $t_{\ddot{a}}$

Tabelle 1 Sicherheitsbeiwerte Gamma für eingeschossige Industriegebäude
(bisherige Werte, Stand 1983)

A	SK 3			SK 2			SK 1		
	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM
1600.	.313E-01	1.86	1.02	.313E+00	.49	0.66	.313E+01	.00	0.57
3000.	.167E-01	2.13	1.11	.167E+00	.97	0.77	.167E+01	.00	0.57
5000.	.100E-01	2.33	1.18	.100E+00	1.28	0.85	.100E+01	.00	0.57
7000.	.715E-02	2.45	1.23	.715E-01	1.46	0.90	.715E+00	.00	0.57
10000.	.501E-02	2.58	1.28	.501E-01	1.64	0.95	.501E+00	.00	0.57
15000.	.334E-02	2.71	1.33	.334E-01	1.83	1.01	.334E+00	.43	0.65
20000.	.251E-02	2.81	1.37	.251E-01	1.96	1.05	.251E+00	.67	0.70
30000.	.168E-02	2.93	1.43	.168E-01	2.13	1.11	.168E+00	.96	0.77

Eingangsdaten:

P = .200E-06 PF3 = .100E-04 AZUL = 0. M**2 TAE = 0. MIN
 VF = .20 VT = .25 KF = 1.282 KT = 1.282

Tabelle 2 Sicherheitsbeiwerte Gamma für eingeschossige Industriegebäude
(neue Werte, Stand 2/1989)

A	SK 3			SK 2			SK 1		
	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM
1600.	.313E-01	1.86	1.02	.313E+00	.49	0.63	.313E+01	.00	0.53
3000.	.167E-01	2.13	1.12	.167E+00	.97	0.74	.167E+01	.00	0.53
5000.	.101E-01	2.32	1.20	.101E+00	1.28	0.83	.101E+01	.00	0.53
7000.	.719E-02	2.45	1.25	.719E-01	1.46	0.88	.719E+00	.00	0.53
10000.	.505E-02	2.57	1.30	.505E-01	1.64	0.94	.505E+00	.00	0.53
15000.	.338E-02	2.71	1.37	.338E-01	1.83	1.01	.338E+00	.42	0.61
20000.	.255E-02	2.80	1.41	.255E-01	1.95	1.05	.255E+00	.66	0.67
30000.	.172E-02	2.93	1.47	.172E-01	2.12	1.11	.172E+00	.95	0.74

Eingangsdaten:

P = .100E-05 PF3 = .500E-04 AZUL = 0. M**2 TAE = 0. MIN
 VF = .25 VT = .25 KF = 1.282 KT = 1.282

Tabelle 3 Sicherheitsbeiwerte Gamma für mehrgeschossige Industriegebäude
(bisherige Werte, Stand 1983)

A	SK 3			SK 2			SK 1		
	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM
1600.	.488E-02	2.58	1.28	.488E-01	1.66	0.95	.488E+00	.03	0.57
3000.	.139E-02	2.99	1.46	.139E-01	2.20	1.13	.139E+00	1.08	0.80
5000.	.501E-03	3.29	1.60	.501E-02	2.58	1.28	.501E-01	1.64	0.95
7000.	.255E-03	3.48	1.70	.255E-02	2.80	1.37	.255E-01	1.95	1.05
10000.	.125E-03	3.66	1.80	.125E-02	3.02	1.47	.125E-01	2.24	1.15
15000.	.557E-04	3.86	1.92	.557E-03	3.26	1.59	.557E-02	2.54	1.26
20000.	.314E-04	4.00	2.00	.314E-03	3.42	1.67	.314E-02	2.73	1.34
30000.	.140E-04	4.19	2.13	.140E-03	3.63	1.78	.140E-02	2.99	1.46

Eingangsdaten:

P = .200E-06 PF3 = .100E-05 AZUL = 2500. M**2 TAE = 0. MIN
 VF = .20 VT = .25 KF = 1.282 KT = 1.282

Tabelle 4 Sicherheitsbeiwerte Gamma für mehrgeschossige Industriegebäude
(neue Werte, Stand 2/1989)

A	SK 3			SK 2			SK 1		
	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM	PFB	BETA	GAM
1600.	.978E-02	2.34	1.20	.978E-01	1.29	0.83	.978E+00	.00	0.53
3000.	.279E-02	2.77	1.40	.279E-01	1.91	1.04	.279E+00	.59	0.65
5000.	.101E-02	3.09	1.56	.101E-01	2.32	1.20	.101E+00	1.28	0.83
7000.	.514E-03	3.28	1.67	.514E-02	2.57	1.30	.514E-01	1.63	0.94
10000.	.253E-03	3.48	1.79	.253E-02	2.80	1.41	.253E-01	1.96	1.05
15000.	.113E-03	3.69	1.92	.113E-02	3.05	1.54	.113E-01	2.28	1.18
20000.	.638E-04	3.83	2.02	.638E-03	3.22	1.63	.638E-02	2.49	1.27
30000.	.286E-04	4.02	2.16	.286E-03	3.44	1.76	.286E-02	2.76	1.39

Eingangsdaten:

P = .100E-05 PF3 = .100E-04 AZUL = 2500. M**2 TAE = 0. MIN
 VF = .25 VT = .25 KF = 1.282 KT = 1.282