

BAM-BERICHT Nr. 25 DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)
BERLIN

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade
eines brennenden Gebäudes unter besonderer
Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung
von Außenstützen**

von Dr. Ing. E. Knublauch

Verwendete Formelzeichen

1. Darstellung des Problems	1
1.1. Bisherige Untersuchungen	1
1.2. Einige Gesetze natürlicher Brände in Innenräumen	2
1.2.1. Abbrenngeschwindigkeit	2
1.2.1.1. Abbrenngeschwindigkeit und Energiefreisetzung	2
1.2.1.2. Gesetzmäßigkeiten der Abbrenngeschwindigkeit	3
1.2.1.3. Abbrenngeschwindigkeit und Brenndauer	4
1.2.2. Brandbelastung	4
1.2.3. Brandraumtemperaturen	4
1.2.4. Feuerbeanspruchung	4
1.3. Ergebnisse und Wertung bisheriger Untersuchungen	5
1.3.1. Brandversuche Hamburg [6]	5
1.3.2. Brandversuche altes Schulhaus [8, 9]	7
1.3.3. Brandversuche Boreham Wood, England [11]	8
1.3.4. Brandversuche Underwriters Laboratories, Trenton [12]	9
1.4. Zusammenfassung, Gegenstand eigener Untersuchungen	10
2. Modellgesetze bei der Nachbildung des Brandgeschehens vor der Fassade eines Gebäudes beim Brand in dessen Innern	10
2.1. Temperaturen und Geschwindigkeiten in Flammen	11
2.2. Wärmestrahlung von Flammen	14
2.3. Bemerkungen zur Zahl $m^2/r_0 g^2 g$	14
2.4. Zusammenfassung der Modellgesetze	15
3. Modellversuche zum Studium natürlichen Brandgeschehens vor der Fassade eines Gebäudes	15
3.1. Erste Versuchsreihe	16
3.1.1. Versuchsanordnung	16
3.1.1.1. Brandhaus	16
3.1.1.2. Meßeinrichtungen	16
3.1.1.3. Brandlast, Aufbau der Krippen	17
3.1.2. Versuchsergebnisse	17
3.1.2.1. Brandraumtemperaturen	18
3.1.2.2. Temperaturen in den Fensterflächen der Brandräume	18
3.1.2.3. Temperaturen außerhalb des Brandraumes	23
3.1.2.4. Wärmestrahlung	25
3.1.3. Versuchsergebnisse bei Versuchen mit Brandlasten in beiden Brandräumen	25

3.2. Zweite Versuchsreihe	27
3.2.1. Versuchsanordnung	28
3.2.1.1. Brandhaus	28
3.2.1.2. Meßeinrichtungen	30
3.2.1.3. Brandlast, Aufbau der Krippen	30
3.2.2. Versuchsergebnisse im 0,6 x 0,6 x 0,4 m ³ -Brandraum	31
3.2.2.1. Visuelle Beobachtungen über den Brandverlauf	31
3.2.2.2. Abbrenngeschwindigkeit	31
3.2.2.3. Temperaturen außerhalb des Brandraumes	31
3.2.2.4. Wärmeübergang außerhalb des Brandraumes	33
3.2.3. Ergebnisse von Versuchen mit zwei nebeneinander liegenden 0,3 x 0,6 x 0,4 m ³ -Brandräumen	34
4. Zusammenfassung und Wertung der Untersuchungsergebnisse	36
4.1. Feuerbeanspruchung von Außenstützen	36
4.1.1. Temperaturen in der Fensterfläche des Brandraumes	36
4.1.2. Temperaturen außerhalb der Fensterlaibung	37
4.1.3. Temperaturen vor der Fassade des nächst höheren Geschosses	37
4.2. Feuerbeanspruchung von Fassaden	38
4.3. Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Fassaden und Außenstützen durch Brandversuche	38
Schrifttum	39

Verwendete Formelzeichen

A	Grundfläche des Brandraumes in m ²	T	Absolute Temperatur in °K
A _F	Fensterfläche in m ²	T _O	Absolute Temperatur zu Versuchsbeginn in °K
c _p	Spezifische Wärme des Gases in kcal/(kg grad)	t	Zeit
c _{St}	Spezifische Wärme des Stahls in kcal/(kg grad)	t _O	Äquivalente Brenndauer in min
D	Abstand der Brandraumfenster in m	U/F	Profilfaktor in 1/m
g	Erdbeschleunigung in m/s ²	u	Gasgeschwindigkeit in m/s
H _u	Heizwert nach DIN 51 900 in kcal/kg	Ü	Seitlicher Überstand einer einseitigen Stützenbekleidung in m
h	Fensterhöhe in m	y	Meßbare Veränderung im Brand
I	Wärmestrahlungsintensität in kcal/(m ² h)	x, z	Ortskoordinaten
l _F	Flammenhöhe in m	α	Wärmeübergangszahl in kcal/(m ² h grad)
M	Maßstab	α'	Rechengröße in kcal/(m ² h grad)
Q	Brandlast in kg	ϑ	Gastemperatur in °C
Q _O	Ascheanteil in kg	ϑ _{Br}	Brandraumtemperatur in °C
\dot{Q}	Abtrenngeschwindigkeit in kg/min	ϑ _{St}	Stahltemperatur in °C
q	Brandbelastung in kg/m ²	ρ	Rohdichte in kg/m ³
\dot{q}	Freigesetzte Wärmeenergie in kcal/min	Φ	Konfigurationsfaktor
r _O	Charakteristische Längenabmessung eines Modells in m		

1. Darstellung des Problems

Die allgemeinen Anforderungen an den baulichen Brandschutz sind wegen der grundsätzlichen Bedeutung für die Allgemeinheit in Gesetzen, den Bauordnungen, geregelt.

Weitere brandschutztechnische Anforderungen enthalten die Durchführungsverordnungen zu den Bauordnungen. Sie werden speziell bezüglich der Zulässigkeit brennbarer Baustoffe konkretisiert durch die „Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau“.

Diese Vorschriften enthalten Begriffe, wie feuerhemmend, feuerbeständig, schwerentflammbar usw., die einer Realdefinition durch Prüfverfahren und zu erfüllende Anforderungen bedürfen. Derartige Realdefinitionen werden in Normen gegeben, die durch Einführungserrlässe Bestandteil der gesetzlichen Vorschriften werden. Der Text einer Norm kann leichter dem technischen Fortschritt oder den durch Forschung vermehrten Kenntnissen angepaßt werden als der Text eines Gesetzes.

Die wichtigste Norm des baulichen Brandschutzes ist DIN 4102 – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen [1 . . . 4]. Diese Norm umfaßt einen großen Bereich des baulichen Brandschutzes, beginnend mit der Beurteilung des Verhaltens von Baustoffen unter der Einwirkung kleiner Zündquellen bis zur Feststellung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen unter der Einwirkung eines voll entwickelten Brandes.

Die Anforderungen hinsichtlich des baulichen Brandschutzes an die Baustoffe und Bauteile an der Außenseite eines Gebäudes (tragende, nichttragende und nichtaussteifende Außenwände, Brüstungen, Außenstützen, Fenster) finden sich in der Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen in der Fassung vom 27. 1. 1970 in den §§ 30 und 41. Der § 30 bezieht sich auf nichttragende Außenwände. Er findet eine Ergänzung in den Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau, Fassung Mai 1970, Abschnitt 3. Der § 41 Bau O NW läßt die Möglichkeit offen, an Fenster zusätzliche Anforderungen zu stellen. Die Bau O NW kennt keine speziellen Anforderungen an Außenstützen oder tragende Außenwände. Sie werden hinsichtlich des Brandschutzes wie alle übrigen Stützen und Wände behandelt.

Die Anforderungen in den übrigen Bauordnungen der Länder sind ähnlich unterteilt.

Die gesetzlichen Vorschriften für die Ausführung der äußeren Bauteile wirken insgesamt uneinheitlich. Es ist nicht wahrscheinlich, daß ein Brand auf ein nichttragendes Außenwandelement (Forderung W 90) anders einwirkt als auf ein tragendes (Forderung F 90). Es ist auch nicht einsichtig, daß Anforderungen an Außenwände gestellt werden, nicht jedoch gleichzeitig an die darin befindlichen Öffnungen (Verglasungen, Fenster usw.) (vgl. hierzu die Ausführungen von Schütze [5]).

Diese Beispiele zeigen die Unsicherheit des Gesetzgebers als Folge mangelnder Kenntnisse über den Verlauf eines Brandes, soweit er sich durch heiße Gase, Wärmestrahlung oder Flammen auf die Außenseite des Gebäudes auswirkt.

Die vorliegende Untersuchung soll helfen, zu einer sicheren und praxisgerechteren Beurteilung des Brandrisikos außenliegender Bauteile zu kommen. Ein Hauptaugenmerk wird den Außenstützen gelten.

1.1. Bisherige Untersuchungen

Das Problem der Feuerbeanspruchung und damit der notwendigen Feuerwiderstandsfähigkeit besitzt für den Stahlbau eine besondere Aktualität [6]. Seit einigen Jahren werden nämlich im In- und Ausland zahlreiche, den verschiedensten Zwecken dienende Gebäude mit stählernen Außenstützen ausgestattet. In solchen Fällen ist eine für Innenstützen in der Regel notwendige Ummantelung aus architektonischen Gründen unerwünscht. Hinzu kommt, daß die Ummantelungen wetterbeständig sein müßten, was bei den zur Verfügung stehenden Bekleidungsmaterialien relativ schwierig zu erreichen ist.

Es war deshalb der Deutsche Ausschuß für Stahlbau, der sich daher im Jahre 1956 die Aufgabe stellte, eine Brandversuchseinrichtung zu schaffen, die in analoger Weise wie für den nach DIN 4102, Bl. 2 [1] genormten Innenstützenbrandversuch die Prüfung von Außenstützen gestatten sollte. Die benutzte, mit Ölbrennern beheizte Versuchseinrichtung ist von Boué in [7] ausführlich beschrieben. Wichtige Versuchsergebnisse sind von Boué in [6] veröffentlicht.

Im Herbst 1961 wurden in Hamburg Brandversuche in einem abzubrechenden Schulhaus ausgeführt. Über diese Versuche berichten Schütze [8] und Bongard [9, 10].

Im Jahre 1964 wurden Brandversuche in einem speziell errichteten Experimental-Brandhaus in der Fire Research Station, Boreham Wood, Herts, England, ausgeführt. Meßergebnisse über das Verhalten der dabei untersuchten Außenstützen sind in [11] von Butcher und anderen mitgeteilt worden.

Die jüngsten, dem Verfasser bekannt gewordenen Untersuchungen wurden 1970 von Seigel (Underwriters Laboratories in Trenton, New Jersey) veröffentlicht [12].

Alle diese Versuche deuten darauf hin, daß die Feuerbeanspruchung von Außenstützen oder der Außenseite von Fassaden von der Beanspruchung vergleichbarer Bauteile im Gebäudeinneren bei einem Schadenfeuer im Gebäude erheblich abweicht. Sie muß in der Regel als geringer angenommen werden.

Die Gesamtzahl der ausgeführten Brandversuche ist gemessen an der Fülle der zu variierenden Parameter gering. Einige nach Ansicht des Verfassers wichtige Parameter sind bisher nur unvollkommen untersucht worden. Vor allen Dingen besteht noch zu geringe Klarheit über den brandschutztechnisch ungünstigsten Brandverlauf für Außenstützen und Fassaden. Angesichts dieser Sachlage hält der Verfasser die vom Deutschen Stahlbauverband gegebenen vorläufigen Ausführungsrichtlinien für Außenstützen in Profil- und Kastenform in einer seiner Publikationen [13] für verfrüht.

Nach dieser Publikation sollen einseitige Abschirmungen mit einem seitlichen Überstand für an der Fassade angelehnte Außenstützen ausreichend sein. Die notwendigen Brandschutzmaßnahmen würden wegen der geringer werdenden Wärmestrahlungseinflüsse geringer werden, wenn die Stütze von der Außenwand abgerückt wird.

Das Brandgeschehen vor der Fassade eines Gebäudes kann in besonders ungünstigen Brandfällen – hiervon sollte der Gesetzgeber ausgehen und Befreiungen in Sonderfällen gewähren – erheblich sein.

Von einem derartigen Brand berichtet Schütze [5]. Bei dem



Bild 1
Brandübertragung über eine Außenwand vom Erdgeschoß bis ins 3. Obergeschoß beim Brand eines Ladengeschäftes (nach Schütze [6], dort Bild 7)

Brand eines Textilgeschäftes im Erdgeschoß eines Wohngebäudes wurde beobachtet, daß zeitweise die Außenfront in ganzer Höhe (ca. 12 m) in Flammen gehüllt war. Eine Ansicht des Brandhauses zeigt *Bild 1*. Der Brand wurde dabei fast *gleichzeitig* in fünf Räume im ersten bis dritten Obergeschoß übertragen.

Die horizontale Auskrugung des Erkers von rd. 1 m hat die Brandübertragung nicht beeinflußt.

Schütze weist auf die relativ geringe thermische Beanspruchung des hochfeuerbeständigen Mauerwerks der Außenfront hin (erkennbar an der nur wenig beschädigten Blechplatte am Erker im 1. und 2. OG). Diese Beobachtung muß so gedeutet werden, daß die Achse der Flammen erheblich *vor* der Fassadenfläche verlief.

Der Ort maximaler Beanspruchung eventuell vorhandener äußerer Bauteile muß demnach nicht in der Fassadenfläche liegen. Ein Abrücken von der Außenwand bringt also nicht in jedem Fall geringere Feuerbeanspruchungen. Diese Aussage wird erhärtet durch den in *Bild 2* dargestellten Brandversuch des Verfassers in einem kleineren Brandhaus mit einer Grundfläche von ca. 2 m x 3,5 m und einer Fensterfläche von 1,50 m Höhe und 1 m Breite. Man erkennt deutlich die – gemessen an der Fensterhöhe – weit und hoch herausschlagenden Flammen.

Angesichts dieser Beobachtungen erscheint es notwendig, nach einer Einführung in einige Gesetzmäßigkeiten natürlicher Brände, die bisherigen Brandversuche erneut zu untersuchen.

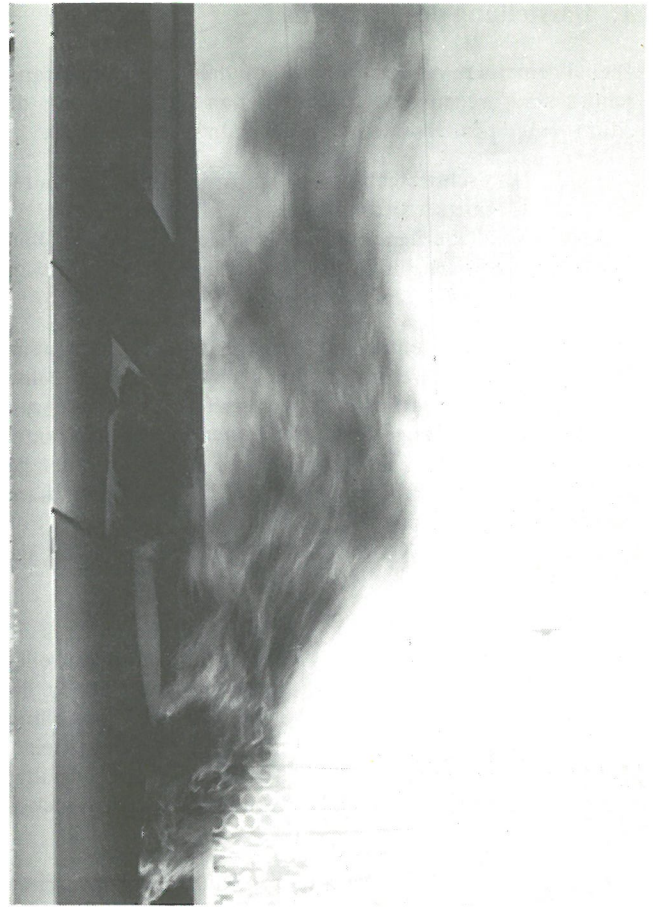


Bild 2
Flammen und Heißgase vor der Fassade eines Brandhauses (Brandraumfläche ca. 7 m², Fensterhöhe 1,5 m, Überschlagsweg ca. 1,4 m)

1.2. Einige Gesetze natürlicher Brände in Innenräumen

Es wird zunächst auf die Originalarbeit des Verfassers zu diesem Thema verwiesen [14]. Die folgenden Ausführungen stellen eine der speziellen Fragestellung angepaßte Kurzfassung dar.

1.2.1. Abbrenngeschwindigkeit

1.2.1.1. Abbrenngeschwindigkeit und Energiefreisetzung

Ursache für das gesamte Brandgeschehen, also für die hohen Temperaturen, für die Feuerbeanspruchung der Bauteile usw., ist die im Brandraum freigesetzte Wärmeenergie. Diese hängt fast immer eng mit der Abbrenngeschwindigkeit zusammen, sollte jedoch begrifflich unterschieden werden.

Als Abbrenngeschwindigkeit wird der auf die Zeiteinheit bezogene Masseverlust bezeichnet, der z. B. in kg/min berechnet werden kann. Die Abbrenngeschwindigkeit ist eine theoretisch kaum formulierbare Größe. Sie wird überwiegend bestimmt durch die Geometrie und die Energiebilanz aller Oberflächen der Restbrandlast. Steigt nämlich die Temperatur im Brandraum zunächst örtlich über ca. 300°C an, so werden an den Oberflächen brennbarer Materialien durch thermische Dissoziation (Pyrolyse) teils zündbare Gase gebildet, die (verbrannt oder unverbrannt) den Brandraum verlassen.

Betrachtet man die Energiebilanz einer Oberfläche, dann dient der vom Brandraum her auf die Oberfläche überge-

hende Wärmestrom, der seinerseits von den Gastemperaturen und -geschwindigkeiten, Strahlungsintensitäten, Oberflächeneigenschaften usw. abhängt, im wesentlichen dazu, die Temperatur der Oberfläche zu erhöhen und den Energiebedarf für chemische und physikalische Stoffumwandlungen (Materialzersetzung, Verdampfung flüchtiger Bestandteile) zu decken. Der Rest strömt in das Innere des zersetzbaren Materials ab.

Im Falle ausreichender Luftzufuhr zum Brandherd werden alle gebildeten Zersetzungsprodukte vollständig abbrennen. Die Energiefreisetzung ist dann der Abbrenngeschwindigkeit proportional, wobei der Proportionalitätsfaktor der bei der betreffenden Verbrennung für das spezielle Material anzusetzende Heizwert ist. Im Falle nur kleiner Ventilationsöffnungen wird möglicherweise ein Teil der gebildeten Zersetzungsprodukte unverbrannt entweichen, der gesamte Masseverlust ist also größer als der für die Energiefreisetzung maßgebliche Masseverlust. In diesem Fall ist die freigesetzte Energie der Sauerstoffzufuhr zum Brandraum proportional. Der Proportionalitätsfaktor, der z. B. die Benennung kcal/Normal m³ haben könnte, hat für alle üblichen Heizmaterialien nahezu den gleichen Wert.

Im Fall zu geringer Luftzufuhr tritt häufig eine gewisse Selbstregelung auf, die auch hier eine Proportionalität zwischen der Energiefreisetzung und der Abbrenngeschwindigkeit erzeugt. Wird das aus einer Oberfläche entweichende Zersetzungsprodukt wegen Sauerstoffmangels nicht verbrannt, dann kühlt die betreffende Oberfläche u. a. wegen des Energieverlustes in das Innere des Materials rasch auf Temperaturen unterhalb der Zersetzungstemperatur ab. Der für die Energiefreisetzung im Brandraum überschüssige Anteil der Pyrolyse kommt zum Stillstand.

1.2.1.2. Gesetzmäßigkeiten der Abbrenngeschwindigkeit

Für die Abbrenngeschwindigkeit existieren zwei Schranken. Grundsätzlich kann die Energiefreisetzung und wegen der im Abschnitt 1.2.1.1 erläuterten Selbstregelung auch die Abbrenngeschwindigkeit einen durch die Ventilation des Brandraumes gesetzten Maximalwert nicht überschreiten. In vielen Fällen steht eine beliebige Luftmenge in der Umgebung des Brandherdes zur Verfügung. Dann wird die Abbrenngeschwindigkeit durch die Eigenschaften des brennbaren Materials und durch die Art, in der es vorliegt, begrenzt. So brennt ein Stapel locker aufgeschichteter, dünner Bretter schneller ab, als unzersägte auf dem Boden liegende Baumstämme, zerknülltes Altpapier schneller als ein Stapel Bücher usw.

Abtrenngeschwindigkeit und Lüftung

Unter der Annahme ruhender, heißer Luft im Inneren des Brandraumes lassen sich die in der Zeiteinheit durch die Fenster ein- und ausströmenden Luftvolumina bestimmen. Danach ergibt sich, wie Kawagoe [15] zeigte, daß bei einem vollentwickelten Brand die Energiefreisetzung und damit näherungsweise die Abbrenngeschwindigkeit dem sog. Lüftungsfaktor $A_F \sqrt{h}$ proportional ist (A_F die Gesamtfläche der Fenster; h Fensterhöhe). Die Gültigkeit dieser Beziehungen wurde von einer Reihe von Forschern, vor allem in Modellbrandversuchen untersucht und weitgehend bestätigt. Bei diesen Versuchen wurde die Brandbelastung wegen der besseren Reproduzierbarkeit durch Krippen dargestellt. Diese bestehen aus Kanthölzern mit meist quadratischem Querschnitt, die in Lagen kreuzweise übereinander geschich-

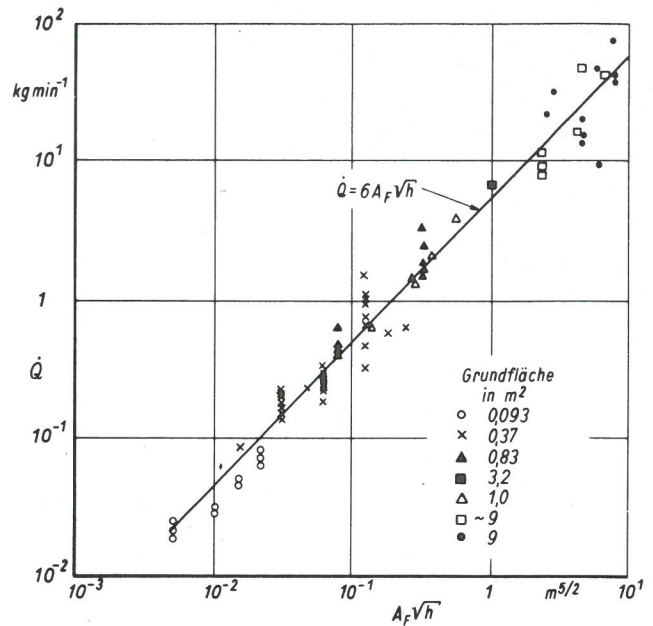


Bild 3 a
Abtrenngeschwindigkeit \dot{Q} als Funktion des Lüftungsfaktors $A_F \sqrt{h}$ nach [16]

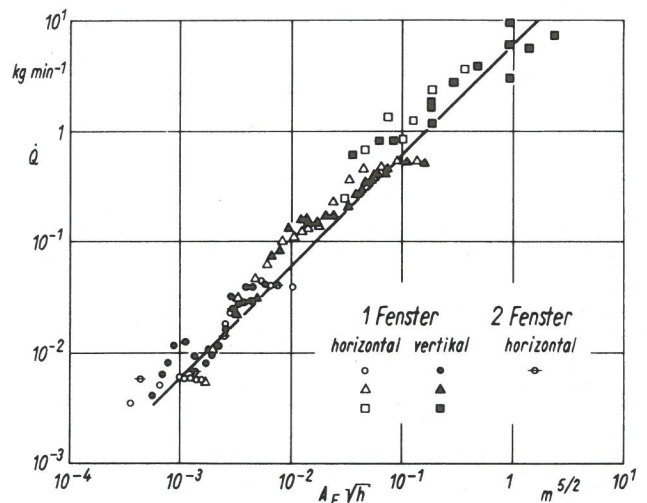


Bild 3 b
Abtrenngeschwindigkeit \dot{Q} als Funktion des Lüftungsfaktors $A_F \sqrt{h}$ nach [17]

tet sind. Als Beispiel für solche Untersuchungsergebnisse sei in Bild 3 a eine Darstellung von Thomas [16] wiedergegeben. Bei diesen Versuchen wurde überwiegend die Größe des Brandraumes variiert.

Bild 3 b gibt Ergebnisse aus [17] wieder. Hier wurden vor allem der Ort und die Form der Ventilationsöffnungen variiert.

Jüngere Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch, daß scheinbar die in Bild 3 dargestellte Beziehung

$$\dot{Q} = 6 A_F \sqrt{h} \quad (1)$$

\dot{Q}	A_F	h
$\frac{\text{kg}}{\text{min}}$	m^2	m

für sehr hohe Brandräume nicht mehr befriedigend gilt. Die gemessene Abbrenngeschwindigkeit bleibt unter dem theoretischen Wert.

tischen Wert. Auch bei Fensteröffnungen mit mehr als ca. 5 m² Fläche werden fast immer zu kleine Abbrenngeschwindigkeiten beobachtet. In einer Reihe solcher Fälle wurden jedoch genügend detaillierte Angaben über den Aufbau der verwendeten Krippen bekannt, so daß eine Bestimmung der Abbrenngeschwindigkeiten bei freiem Abbrand möglich ist. Alle auf diese Weise untersuchten Beispiele zeigen jedoch, daß die beobachtete niedrige Abbrenngeschwindigkeit eine Folge des Krippenaufbaus ist, also nicht als Gegenbeweis für die Gültigkeit der in Bild 3 dargestellten Beziehungen gelten kann. Gleichung (1) kann also als obere Grenze zur Abschätzung der Abbrenngeschwindigkeit angesehen werden.

Es wird noch auf Brandverläufe hingewiesen, bei denen trotz genügend großer „natürlicher“ Abbrenngeschwindigkeit der Brandlast nicht die durch die Lüftung gegebene Schranke erreicht wird: Bei großen Räumen mit kleinen Fenstern wird die geringe freiwerdende Wärmeenergie mitunter rasch von den großen Begrenzungsflächen aufgenommen. Die Brandlast wird damit zu wenig erwärmt, um die für den Feuerübersprung nötigen Zersetzungsprodukte zu liefern. Der Brand weitet sich nur zum Schwelfeuer aus. Solche Brandabläufe sind bei experimentellen Bränden im natürlichen Maßstab beobachtet worden. So berichtet z. B. Schütze [8], daß bei seinen Versuchen mit einer Fensterfläche von 7,5 % der Grundfläche des Brandraumes kein vollentwickelter, bei Fensterflächen zwischen 9,3 % und 14,2 % ein besonders gut entwickelter Brand entstanden ist.

Abbrand bei nicht beschränkter Ventilation

Bei nicht beschränkter Ventilation des Brandherdes ist die Abbrenngeschwindigkeit vor allem eine Funktion der Eigenschaften der brennbaren Materialien und deren Oberflächen (Heizwert, Zersetzungstemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherung), der geometrischen Zuordnung aller Oberflächen zueinander (Erwärmung der Oberflächen durch Wärmestrahlung), der Packungsdichte, Zahl und Form der Zwischenräume (Erwärmung der Oberflächen durch strömende Gase, Abführung von brennbaren Zersetzungsprodukten) und der Zeit. Allgemeine Aussagen können dazu noch nicht gemacht werden, sogar über so spezielle im Bauwesen vorkommende Anordnungen brennbarer Materialien wie Wand- und Deckenverkleidungen oder Fußböden oder so typische Lagergüter wie Bücherregale oder auf Paletten lagernde Wellpappenkartons sind kaum Meßergebnisse bekannt.

Abtrenngeschwindigkeit als Funktion der Zeit

Die die Abbrenngeschwindigkeit bestimmenden Größen sind zeitabhängig. So ändern sich z. B. Form, Oberflächeneigenschaften und geometrische Zuordnung der brennbaren Materialien im Verlauf des Brandes (Bersten und Auslaufen von Behältern, Einsturz von Stapeln usw.). Die Abbrenngeschwindigkeit ist also im allgemeinen eine Funktion der Zeit. Einzelheiten sind jedoch weitgehend unbekannt.

1.2.1.3. Abbrenngeschwindigkeit und Brenndauer

Ohne Eingriff in das Brandgeschehen durch eine Brandbekämpfung erlischt das Feuer erst dann, wenn die Brandlast Q bis auf den festen Ascheanteil Q_0 vollständig verbrannt ist. Die Brenndauer T ist mit der Brandlast und der Abbrenngeschwindigkeit \dot{Q} verknüpft in der Beziehung

$$Q - Q_0 = \int_0^T \dot{Q} dt \quad (2)$$

Die so definierte Brenndauer bestimmt nicht den Zeitpunkt des Maximums der Brandraumtemperatur. Dieses wird, wie experimentelle Brände zeigen, etwa dann erreicht, wenn ca. 80 % der Brandlast verbrannt sind.

1.2.2. Brandbelastung

Nach Gleichung (2) sind Brenndauer, Abbrenngeschwindigkeit und Brandlast miteinander verknüpft. Die Brandlast ergibt sich aus der Brandbelastung. Dieser Begriff ist bereits in einem Normentwurf definiert worden. DIN 18 230 E, Stand Juli 1968 [18], definiert: „Die Brandbelastung q entspricht der Wärmemenge sämtlicher brennbarer Stoffe in einem Brandabschnitt (Brandlast), bezogen auf die rechnerische Brandabschnittsfläche“. Sie wird ausgedrückt in Mcal/m² Brandabschnittsfläche. Aus den Massen G_i der einzelnen brennbaren Stoffe, ihren Heizwerten H_{ui} nach DIN 51 900 und der Grundfläche A des Brandabschnittes ergibt sich demnach die Brandbelastung nach der Formel

$$q = \sum_i \frac{G_i H_{ui}}{A} \quad (3)$$

Die weitere Diskussion in [14] zeigt, daß die Gleichung (3) keinesfalls ein allgemeines Maß für die im Brandraum freizusetzende Wärmemenge liefert. Sie deutet gleichfalls die große Vielschichtigkeit der bei der quantitativen Beschreibung eines Brandes auftretenden Begriffe an.

1.2.3. Brandraumtemperaturen

Aufgrund der Abbrenngeschwindigkeit wird pro Zeiteinheit im Brandraum ein gewisser Betrag an Wärmeenergie frei. Ein Teil dieser Energie dient zur Erwärmung der Luft im Brandraum und zur Erwärmung der von außen in den Brandraum einströmenden Kaltluft. Ein weiterer Teil wird durch Wärmestrahlung durch die Raumöffnungen nach außen und durch Wärmeübergang auf die inneren Oberflächen und von dort durch Wärmeleitung in das Innere der raumbegrenzenden Bauteile übertragen. Schließlich wird Wärmeenergie durch die den Brandraum verlassenen heißen Gase abgeführt. Die Brandraumtemperatur stellt sich so ein, daß zu jedem Zeitpunkt die aus Energiezufuhr und -verlust gebildete Bilanz ausgeglichen ist.

Für einen gegebenen Raum läßt sich bei bekannter Energiezufuhr die Brandraumtemperatur-Zeitkurve schrittweise berechnen. Ergebnisse solcher Rechnungen legten Kawagoe [19] und Ödeen [20] vor.

Die Brandraumtemperatur ist eine der bestimmenden Größen für den vom Brandraum auf die den Raum begrenzenden Bauteile übergehenden Wärmestrom. Dieser bestimmt die Temperaturänderungen in den Bauteilen während des Brandes und die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile. Daneben wird der Wärmestrom durch die Wärmestrahlungsbilanz der Bauteiloberflächen, also besonders durch das Emissionsvermögen des Brandraumes und der Flammen beeinflusst.

1.2.4. Feuerbeanspruchung

Der Begriff der Feuerbeanspruchung ist für beliebige Bau-

teile in beliebigen Brandraumtemperatur-Zeitkurven, also für beliebige Brandabläufe nicht definiert und möglicherweise überhaupt nicht definierbar. Die Feuerbeanspruchung ist nur mit Hilfe konkreter Bauteile oder Teilen davon meßbar. Durch Beobachtung der am vorgegebenen Bauteil spezifischen Veränderungen kann entschieden werden, welches von zwei Feuern eine größere Beanspruchung hervorgerufen hat. Die an einem Bauteil im Einzelfall im Brand entstehenden Veränderungen können dabei sein: Zerstörungen aufgrund von durch thermische Ausdehnung hervorgerufenen Spannungen, Verformung von einseitig beanspruchten Schalen, Schwinden in Verbindung mit Reißbildung beim Entweichen flüchtiger auch wäßriger Bestandteile eines Bauteiles, Formänderung durch Abbrand brennbarer Bauteile, Änderung der Materialeigenschaften (Streckgrenze, E-Modul) mit zunehmender Durchwärmung des Bauteils, Erweichen mit Abfließen von Teilen eines Bauteils usw. Grundsätzlich könnte jede der genannten Auswirkungen eines Brandes zur Einordnung eines Brandes hinsichtlich seiner Feuerbeanspruchung auf das gewählte Bauteil herangezogen werden.

Das Brandverhalten von Bauteilen wird in der Regel in Normbrandversuchen nach DIN 4102, Blatt 2 [1] bestimmt. Dieser Normbrandversuch hat den Charakter eines Modellversuches. Er simuliert naturgetreu lediglich den Verlauf eines Brandes, der nach der Einheitstemperaturkurve verläuft und dessen Wärmeübergangsbedingungen mit denen in den Prüfständen übereinstimmen. Die Versuchsergebnisse aus Normbrandversuchen erhalten erst dann eine größere Aussagefähigkeit, wenn es z. B. durch Vergleich der Feuerbeanspruchung gelingt, jedem natürlichen Brand eine „äquivalente Normbranddauer“ zuzuordnen.

Im Normentwurf DIN 18 230 E ist die Möglichkeit, jeden Brand hinsichtlich der Feuerbeanspruchung allgemeingültig und bauteilunabhängig einzuordnen bereits vorweg positiv beantwortet worden. Es verbleibt dann nur noch die Antwort auf die Frage: Welche Dauer muß ein Normbrand haben, damit er die gleichen Veränderungen am Bauteil hervorruft wie ein möglicher natürlicher Brand?

Das Vorgehen bei der Ausführung eines Vergleiches zweier Brände ist in *Bild 4* graphisch dargestellt.

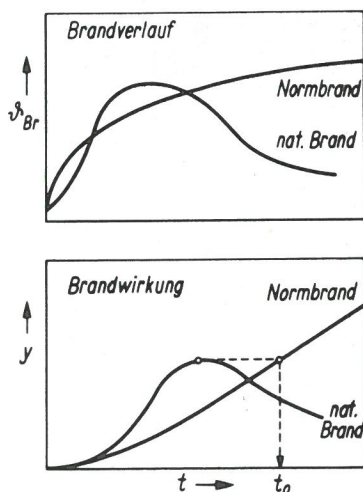


Bild 4
Bestimmung der Dauer t_0 eines Normbrandes (äquivalente Normbranddauer), der zur gleichen maximalen Veränderung (z. B. Abbrand, Gewichtsverlust, Temperaturerhöhung) in einem Indikatorbauteil führt, wie der zu bewertende natürliche Brand (vgl. auch [21])

Die Veränderung y im Brand wird an einem bestimmten, in beiden der zu vergleichenden Brände gleichen Punkt des Bauteils gemessen. y ist auf diese Weise lediglich eine Funktion der Zeit t .

Ist y speziell die Temperatur an einem Punkt x des Bauteiles, z. B. Temperatur eines Bewehrungsstahles im Beton, wird der Vergleich entsprechend Bild 4 nur auf die Zeitfunktion $y(x_{\text{const}}, t)$ gestützt. Im allgemeinen ist das Temperaturfeld $y(x, t)$ in seiner Ortsabhängigkeit in der Umgebung von x in den zu vergleichenden Bränden verschieden.

Natürlich ist die Wahl des Ortes x beliebig und wird durch meßtechnische Probleme mitbestimmt. Für jeden Ort x ergibt sich ein gesonderter Vergleich.

Der Verfasser ist in [22] ausführlich der Frage nachgegangen, in welcher Weise die jeweils ermittelte äquivalente Brenndauer von dem für die Bewertung notwendigen „Indikatorbauteil“ abhängt. Die Untersuchungen zeigten, daß die unterschiedlichen Bewertungsverfahren zu jeweils sehr ähnlichen Angaben über die äquivalente Brenndauer des zu beurteilenden Brandverlaufes führen. Sie zeigen vor allem, daß das zur Bewertung notwendige Indikatorbauteil nur einen geringen Einfluß auf die ermittelte äquivalente Brenndauer hat. Dies gilt für extrem unterschiedliche Bauteile aus Holz, Beton, unbedecktem und wassergekühltem Stahl, für Stahlbauteile mit Bekleidungen aus Asbestzement, Gips und anderen mineralischen Baustoffen sowie Dämmschichtbildnern.

1.3. Ergebnisse und Wertung bisheriger Untersuchungen

Die brandschutztechnischen Bauvorschriften gehen in der Regel von besonders ungünstigen Brandverläufen aus. Die Wertung der bisherigen Untersuchungen geht daher von der Frage aus, ob es jeweils gelungen ist, *den ungünstigsten Brandverlauf zu erfassen*.

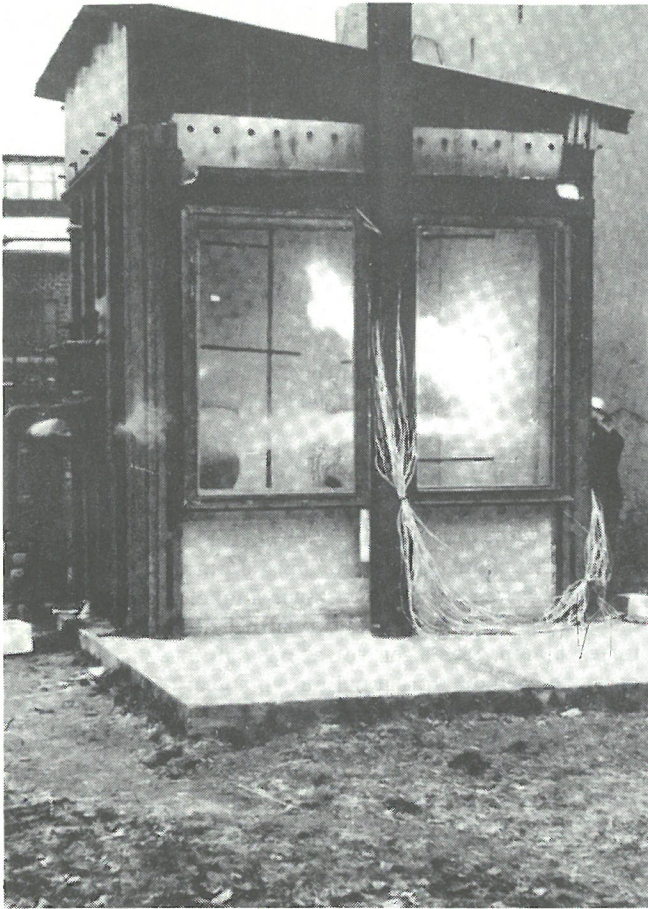
Der für den Brandverlauf vor der Fassade eines Gebäudes mit Sicherheit ungünstigste Fall ist durch ein Maximum an Energiefreisetzung (oder ein Maximum an Abbrenngeschwindigkeit) gegeben. Dies liegt vor, wenn der Abbrand durch die Lüftung des Brandraumes begrenzt wird (vgl. Gleichung (1)). In diesem Fall nämlich entweicht ein Teil der durch Pyrolyse im Innern des Gebäudes freigesetzten Gase noch unverbrannt durch die Raumöffnungen und verbrennt vor der Fassade.

Ein Maximum an Abbrenngeschwindigkeit kennzeichnet nach Gleichung (3) bei gegebener Brandlast Q gleichzeitig ein Minimum an Brenndauer. Dieser Aspekt muß vorerst außer Acht gelassen werden, weil die Brandlast Q (in kg Holz) zunächst nicht beschränkt ist (im Gegensatz zur Brandbelastung q (in kg Holz pro m^2), für die statistisches Material bereits vorliegt).

1.3.1. Brandversuche Hamburg [6]

Der $2,50 \times 2,65 \times 3,00 m^3$ große Brandraum besaß eine Fensteröffnung von 2,50 m Breite und 1,90 m Höhe. Er wurde mit 6 Ölbrennern für normales Heizöl mit einer Viskosität von etwa 30 Engler*) [6] beflammt. Der Ölverbrauch wird mit 6 bis 7 l Öl/min angegeben, wenn an einem ausgezeichneten

*) Diese Angabe wird vom Verfasser bezweifelt (entspricht schwerem Heizöl nach DIN 51 603)



*Bild 5
Ansicht des Außenstützenprüfstandes Hamburg beim Versuch nach [10], dort Bild 5*

*Bild 6
Versuchsbrandhaus Boreham Wood, England, während eines Brandversuches mit einer Brandbelastung von 30 kg Holz/m² und „1/4 ventilation“ nach [11], dort Plate 3 (b)*



neten Meßpunkt in Raummitte und außerhalb der Flammenkegel die Einheitstemperaturkurve eingehalten wird.

Nach Gleichung (1) kann aufgrund der Lüftung der Abbrand von ca. 40 kg Holz/min erwartet werden. Die Luftmenge reicht dann bei Vernachlässigung der an den Brennern zusätzlich eingeblasenen Verbrennungsluft zur Verbrennung von ca. 15 l Öl/min aus. Die Abbrenngeschwindigkeit betrug bei diesen Versuchen demnach weniger als die Hälfte der maximal möglichen. Das Brandgeschehen vor der Fassade war demnach nicht optimal. Dies zeigt auch *Bild 5*, eine Ansicht des Hamburger Versuchshauses beim Brandversuch im Vergleich zu *Bild 2* und *Bild 6*.

Es verwundert nicht, daß bei diesen Versuchen sich die Frage nach dem „Stockwerkeffekt“ nicht stellte. Oberhalb der Fensteröffnung gab es kein nennenswertes Brandgeschehen. Auch die Frage, was beim Abrücken der Stütze von der Fassade geschieht, konnte mindestens nicht vollständig beantwortet werden. *Bild 2* läßt nämlich vermuten, daß vor der Fassade und oberhalb der Brandraumöffnungen eine Stütze allseitig vom Feuer beansprucht werden könnte.

Boué berichtet über einen Zusatzversuch („Versuch 3.4“). Dabei sollte der „Stockwerkeffekt“ durch eine Zusatzheizung in Form brennender Holzstöße am Stützenfuß nachgebildet werden. Die Beheizung erzeugte in der Nähe der Stütze jedoch nur Lufttemperaturen von maximal 450°C. Der Verfasser hält diese Temperaturen in Kenntnis der später mitgeteilten eigenen Untersuchungen zur Nachbildung der in *Bild 2* erkennbaren Brandverläufe für zu niedrig.

Wenn schon die Frage, ob das Gesamtproblem des Brandgeschehens vor der Fassade bezüglich von Außenstützen richtig nachgebildet wurde, verneint werden muß, so zeigen die Versuche jedoch weitgehend richtig das Verhalten der Stützenabschnitte vor den Fenstern des Brandraumes. Die Untersuchungsergebnisse gelten damit für eingeschossige Gebäude.

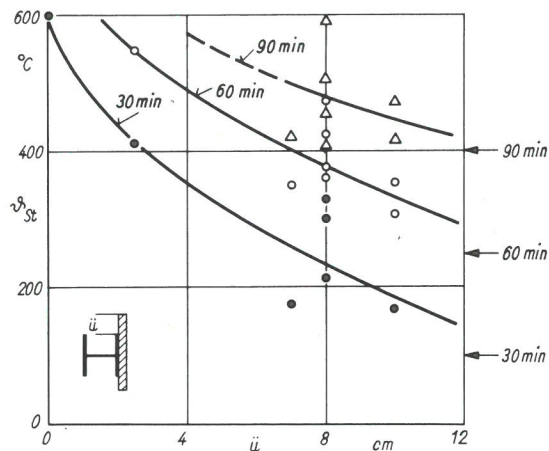


Bild 7
 Abhängigkeit der maximalen Stahltemperatur ϑ einer IPB 240-Außenstütze von dem seitlichen Überstand \ddot{u} einer feuerraumseitigen Vermitecta-Plattenbekleidung und von der Versuchszeit nach Boué [6] (Versuchsserie 1), auch Bongard [9] (Versuchsserie 4)
 Am rechten Bildrand sind die Stahltemperaturen einer allseitig mit 25 mm dicken Vermitecta-Platten bekleideten IPB 240-Innenstütze nach Versuchen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) [23] angegeben

Die Versuche zeigen im einzelnen:

1. Die Stützen werden überwiegend einseitig beansprucht. Diese Beanspruchung ist bei ungeschütztem Stahl zwar geringer als bei ungeschütztem Innenstützen, erlaubt jedoch nicht, bei Außenstützen auf Schutzmaßnahmen zu verzichten. Die ungeschützte IPB 240-Außenstütze erreichte beim Normversuch (im Innern des Brandhauses) kritische Temperaturwerte nach 22 min (Versuch „0“). Das gleiche Profil, geprüft als Innenstütze im Stützenprüfstand der Bundesanstalt für Materialprüfung, hätte gleiche Temperaturen nach ca. 14 min erreicht. Die Feuerwiderstandsdauern zwischen Innen- und Außenstützen bei gleichem Brandverlauf im Innern des Raumes verhalten sich also wie 14 min zu 22 min. Bei ungünstigerem Brandverlauf vor der Fassade kann die Feuerwiderstandsdauer der Außenstütze jedoch noch weiter sich dem Wert für die Innenstütze nähern.
2. Wegen der überwiegend einseitigen Beanspruchung des Stützenabschnitts vor den Brandraumöffnungen kann dort auf einen allseitigen Schutz der Stahlstützen verzichtet werden. Eine einseitige, mit einem seitlichen Überstand versehene Bekleidung senkt erheblich die Feuerbeanspruchung des Stahlbauteils. Die Wirksamkeit der Bekleidung hängt vor allem vom Überstand ab. Der Einfluß der Bekleidungsstärke scheint bei Einhaltung einer Mindeststärke von untergeordneter Bedeutung zu sein.

Dieses Ergebnis mag sich beim Übergang von den Hamburger Versuchen zu solchen, die den ungünstigsten Brandverlauf nachbilden, noch (geringfügig?) ändern, wenn die Strahlung aus der vor der Fassade sich ausbildenden Flammensäule vergleichbar mit der Strahlung aus dem Innenraum werden könnte.

Die Abhängigkeit der maximalen Stahltemperatur einer IPB 240-Außenstütze von dem Überstand \ddot{u} und von der Versuchszeit nach den Hamburger Versuchen, dargestellt in Bild 7, ist daher zunächst mit Vorsicht zu betrachten.

Am rechten Rand in Bild 7 sind zum Vergleich die Stahl-

temperaturen einer allseitig kastenförmig, mit 25 mm dicken Vermitecta-Platten bekleideten IPB 240-Innenstütze angegeben [23]. Man erkennt, daß nach den Hamburger Versuchen eine Außenstütze von 24 cm Steghöhe mit einem einseitigen Schirm erst dann vergleichbar gut geschützt wird wie eine Innenstütze mit allseitiger Bekleidung, wenn der Überstand deutlich mehr als 12 cm beträgt.

Bei Stützen mit größeren Profilabmessungen ist der Überstand zu vergrößern.

1.3.2. Brandversuche altes Schulhaus [8, 9]

In dem abrißreifen Schulhaus wurden die Versuche VI und VII in einem Brandraum von 45 m² Grundfläche ausgeführt. Das Fenster war auf Abmessungen von 1,6 m Breite und 3,8 m Höhe erweitert worden. Die Brandlast betrug ca. 4 000 kg Holz. Die aufgrund der Ventilation zu erwartende Abrennungsgeschwindigkeit wurde in beiden Versuchen – wie aus dem Verlauf der Brandraumtemperaturen zu ersehen ist – offensichtlich erreicht. Bei diesen Versuchen kann daher der bei der Fenstergeometrie mögliche „ungünstigste Brandverlauf“ im Sinne dieser Ausarbeitung angenommen werden. Ein zweiter gleichartiger Brandraum befand sich – nur durch eine 20 cm dicke Decke getrennt – unmittelbar über dem unteren Brandraum, so daß der Stockwerkeffekt hätte untersucht werden können.

Vor der Mitte der Fenster und unmittelbar vor der Fassade befand sich eine IPB 240-Außenstütze, einseitig geschützt durch eine 25 mm dicke Vermitecta-Platte mit beidseitigem Überstand von 10 cm. Diese Lage kennzeichnet den ungünstigen Stützenstandort im Bereich der Fenster. Für die Untersuchung des Stockwerkeffektes wäre jedoch ein Standort ca. 75 cm vor der Fassade günstiger gewesen. So mag ein Teil der Stütze zwischen Fassade und Achse der aus dem unteren Geschoß herausschlagenden Flammen gestanden haben und nicht in ungünstigster Weise beansprucht worden sein.

Die Temperaturen im unteren Brandraum stiegen bei beiden Versuchen nach der Zündung zunächst stärker an als die Einheitstemperaturkurve. Das Temperaturmaximum wurde nach ca. 15 bis 20 min erreicht. Nach ca. 25 min sank die Temperatur unter die der Einheitstemperaturkurve und unterschritt nach 50 bis 60 min einen Wert von ca. 600°C.

Ein Anschluß der Verhältnisse bei den Brandversuchen an die Bedingungen des Normbrandversuches ist sinnvoll nur über die Bestimmung der äquivalenten Normbranddauer (vgl. Abschnitt 1.2.4 und Bild 4) möglich. Leider sind uns Einwirkungen y auf Bauteile im Innern des Brandraumes zur Bestimmung der äquivalenten Brenndauer unbekannt. Man kann daher nur versuchen, durch Nachfahren der angegebenen Brandraumtemperaturen in einem Brandprüfstand eine Abschätzung für die äquivalente Brenndauer der Versuche VI und VII zu erhalten.

Eine derartige Abschätzung liefert $t_{\ddot{u}} \leq 40$ min. Der Brand hätte demnach ein Bauteil im Innern des Bauwerkes wie ein Normbrand von höchstens 40 min Dauer beansprucht.

Anmerkung:

Bongard ging von der Annahme aus, daß der Brand bei einer Brandbelastung von 90 kg/m² Beanspruchungen eines mindestens 90minütigen Normbrandes nachbildet. Diese An-

nahme ist durch neuere Untersuchungen überholt: Die Feuerbeanspruchung ist eine Folge der hohen Temperaturen und der Strahlungsintensitäten. Diese hängen von der Abrenngeschwindigkeit und der Geometrie des Brandraumes ab [14, 20]. Die Abrenngeschwindigkeit ist jedoch von der Brandbelastung zunächst unabhängig (vgl. Abschnitt 1.2.1.2).

Die Maximaltemperatur der Außenstütze während der Versuche VI und VII betrug ca. 500°C. Ein 40minütiger Normbrandversuch in der Hamburger Versuchsanlage hat bei gleicher Stützenkonstruktion (Versuche 1.2) eine Stahltemperatur von 250°C gebracht. Diese Aussage begründet die Auffassung des Verfassers, daß die im Abschnitt 1.3.1 beschriebenen Versuche (Bild 7) recht weit von der Nachbildung des brandschutztechnisch ungünstigsten Brandverlaufes entfernt sind.

1.3.3. Brandversuche Boreham Wood, England [11]

Die außerordentlich sorgfältig geplanten und ausgewerteten Brandversuche dienten der Untersuchung der Brandbedingungen und der Feuereinwirkung auf geschützte und ungeschützte Stahlstützen und -träger. Neben Innenstützen waren auch an die Fassade angelegte Außenstützen in unterschiedlicher Lage zu den Fenstern Gegenstand der Untersuchung.

In zwei je 7,7 m x 3,7 m x 2,9 m großen Brandräumen wurden bei zwei verschiedenen großen Ventilationsöffnungen die Brandbelastungen systematisch zwischen 7,5 kg Holz/m² und 60 kg Holz/m² variiert.

Der Stockwerkeffekt war nicht Gegenstand der Untersuchung. So gelten die Aussagen für eingeschossige Bauten und bei mehrgeschossigen Bauten für die Stützenabschnitte im Brandgeschoß.

Zusätzliche gezielte Auswertungen dieser Versuche von Heselden [24] lassen erkennen, ob und gegebenenfalls bei welchen Versuchen die Abrenngeschwindigkeit durch die Lüftung begrenzt wurde. Danach verliefen lediglich die Ver-

suche mit 30 bzw. 60 kg Holz/m² bei „1/4 ventilation“ bei beschränkter Lüftung.

Die veröffentlichten Versuchsergebnisse lassen recht gut eine Relation zwischen den Feuerbeanspruchungen von gleichartigen Außen- und Innenstützen beim Brand im Gebäudeinnern erkennen.

Bild 8 zeigt die bei den einzelnen Brandversuchen maximal erreichten Stahltemperaturen – dies sind maximale Brandwirkungen im Sinne von Abschnitt 1.2.4 – von ungeschützten Stahlstützen im Innern des Brandhauses. I-Breitflanschprofile haben Abmessungen von 20,6 cm x 20,6 cm bei einem Gewicht von 52 kg/m.

Bild 9 zeigt die maximalen Stahltemperaturen der ungeschützten Außenstützen gleichen Profils für verschiedene Standorte der Stütze bezüglich der Fensteröffnungen.

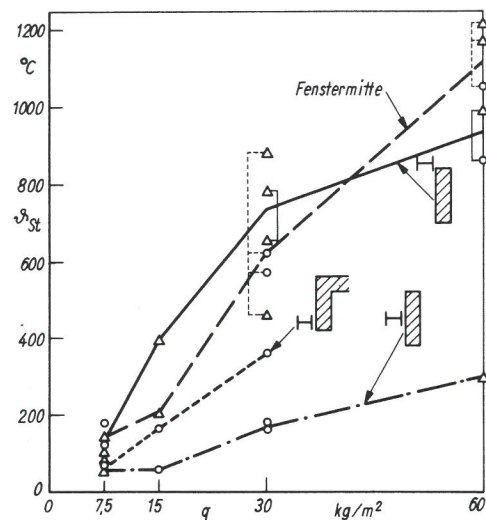


Bild 9
Maximale Stahltemperaturen ϑ_{St} unbekleideter Außen-Stahlstützen (I-Profil, 20,6 cm x 20,6 cm, 52 kg/m) bei den gleichen Bränden wie Bild 8 für verschiedene Stützenstandorte relativ zu den Fensteröffnungen

Die Stahltemperaturen gemäß Bild 8 zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Fensterfläche. Diese beeinflusst zunächst ganz wesentlich die Brandraumtemperatur, weil bei den nicht durch die Lüftung begrenzten Bränden jede Vergrößerung der Fenster einen zusätzlichen Überschuss an Kaltluft dem Brandraum zuführt und somit die Brandraumtemperaturen senkt. Eine Folge hiervon sind niedrigere Brandraumtemperaturen.

Im Gegensatz zu Bild 8 ist in Bild 9 eine Abhängigkeit der maximalen Stahltemperaturen der Außenstützen von der Lüftung im gewählten Bereich nicht sichtbar.

Dies läßt den bemerkenswerten Schluß zu, daß die Feuerbeanspruchung der Außenstützen möglicherweise nur wenig von den Brandraumtemperaturen im Gebäudeinnern abhängen könnten, daß vielmehr der Umfang der zum Fenster herauschlagenden Flammen oder heißen Gase eine überragende Bedeutung für die Feuerbeanspruchung der Außenstützen besitzt. Sollte möglicherweise die aus der Tiefe des Brandraumes herkommende Wärmestrahlung, die wie die Temperaturen in Bild 8 von der Lüftung abhängt, einen nur geringen Einfluß haben?

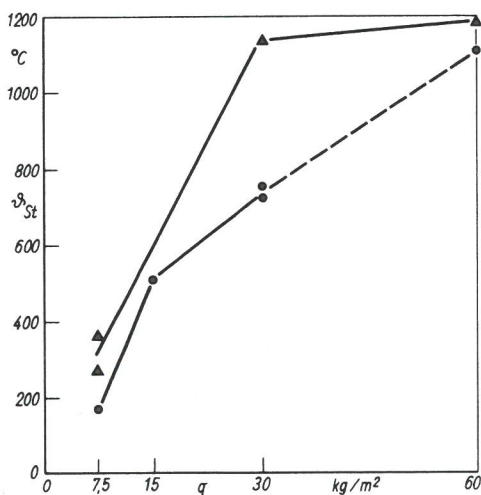


Bild 8
Maximale Stahltemperaturen ϑ_{St} bekleideter Innen-Stahlstützen (I-Profil, 20,6 cm x 20,6 cm, 52 kg/m) bei Bränden im Brandhaus Boreham Wood, England, als Funktion der Brandbelastung q bei zwei verschiedenen Fensterflächen nach [11]

- „1/2 ventilation“. Die Ventilationsöffnungen erstrecken sich über die Hälfte der Frontfläche
- ▲ „1/4 ventilation“. Die Ventilationsöffnungen nehmen ein Viertel der Frontfläche ein

Dem Verfasser erscheint weiterhin bemerkenswert, daß die Feuerbeanspruchung der Außenstützen in der Mitte oder am Rande des Fensters im Rahmen der Versuchungenauigkeiten quantitativ gleiche Feuerbeanspruchungen erlitten wie die Innenstützen bei „1/2 ventilation“. Dieses Ergebnis, übertragen auf die im Abschnitt 1.3.1 beschriebenen Hamburger Versuche, bedeutet, daß die ungeschützte IPB 240-Stütze nicht 22 min Feuerwiderstandsdauer wie im Hamburger Prüfstand, sondern tatsächlich nur 14 min wie die Innenstütze besäße. Lediglich bei den englischen Versuchen, bei denen durch Reduzierung des Luftüberschusses die Brandraumtemperatur erhöht wurde, erreichte die Feuerbeanspruchung der Innenstützen höhere Werte als die der Außenstützen.

Die in Bild 9 dargestellten Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der einseitigen, die brandraumseitige Schattensfläche vollständig überdeckenden Abschirmung. Der Mauerwerkspfeiler von ca. 35 cm Dicke und einem seitlichen Überstand von jeweils ca. 22 cm schützte die sonst ungeschützte Außenstütze vor kritischen Temperaturen. Dieser Schutz der Außenstütze ist in seiner Wirksamkeit relativ höher zu bewerten als eine Bekleidung für F 60-Innenstützen (vgl. hierzu auch die Randmarkierungen in Bild 7). (Derartige Innenstützen wurden ebenfalls in das englische Brandhaus eingebaut.)

Bei aller Vorsicht einer Extrapolation der vorliegenden Versuchsergebnisse nimmt der Verfasser an, daß die beidseitig um 22 cm überstehende Abschirmung auf die Außenstütze so wirkte, wie die allseitige Bekleidung einer Innenstütze mit einer Feuerwiderstandsdauer zwischen 90 und 120 min.

Die in den Hamburger Versuchen ermittelten Werte für einen notwendigen Überstand sind, wie auch die Brandversuche im alten Schulhaus zeigten, sicherlich zu klein. Schien bei einer Profiltiefe von 24 cm nach Hamburger Versuchen ein Überstand von ca. 12 bis 14 cm für die Feuerwiderstandsdauer F 90 ausreichend, so legen die englischen Versuche nahe, den Überstand bei nur ca. 20 cm Profiltiefe auf schätzungsweise 20 cm zu erhöhen.

Einige unveröffentlichte zusätzliche Messungen [25] sind zur Abschätzung des Brandgeschehens vor der Fassade des Brandhauses bei den Brandversuchen im Innern von besonderem Interesse.

Danach schlugen die Flammen bei den Versuchen mit bezüglich der Lüftung maximaler Abbrenngeschwindigkeit 3 m hoch – gemessen von der Fensteroberkante – aus den Brandraumöffnungen. Bei der Fensterhöhe von 1,8 m ergibt sich ein Verhältnis von Flammenhöhe zu Fensterhöhe von ca. 1,7.

Die Verbrennungsgase werden dann als (leuchtende) Flammen beobachtet, wenn die darin befindlichen Ruß-, also Kohlenstoffteilchen so hoch erwärmt sind, daß sie sichtbares Licht aussenden. Dazu sind Gastemperaturen von ca. 800°C oder mehr erforderlich.

Die Beobachtung von Flammen gibt damit gleichzeitig eine Vorstellung von der Temperaturverteilung der Gase vor der Fassade. Nach [25] waren also bis zu 3 m oberhalb der Fensteroberkante vor der Fassade noch Zonen mit Temperaturen von ca. 800°C vorhanden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß in diesen Bereichen auch Bauteile sich befinden könnten, bei denen ein

einseitiger, der Fassade zugewandter Strahlungsschirm dann möglicherweise wirkungslos bleiben würde.

Das Verhältnis 1,7 von Flammen- und Fensterhöhe soll probeweise auf den in Bild 1 dargestellten Brandfall angewendet werden. Man erkennt, daß dann die Flammenspitzen (mit Temperaturen von 800°C) die Fensterunterkante des 2. Obergeschosses hätten erreichen müssen. Temperaturen, wie sie zur Zündung normalentflammbarer Stoffe notwendig sind, treten dann noch in der Höhe des 3. Obergeschosses auf. Der von Schütze geschilderte Brandfall findet demnach in den englischen Versuchen seine Bestätigung.

Mit einem sehr einfachen Meßgerät wurde die Dichte des Wärmestroms von der vor der Fassade befindlichen Heißgas- oder Flammensäule her auf die Fassade gemessen. Es ergaben sich in 55 cm Höhe oberhalb der Fensteroberkante noch Werte in der Größenordnung maximal 36 000 kcal/(m²h) (Versuch 60 (1/4)). Derartige Wärmestromdichten treten nach Versuchserfahrungen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in den für Innenbauteile bestimmten Normprüfständen dann auf, wenn die Brandraumtemperaturen ca. 650°C betragen (z. B. [26]*)).

Die englischen Versuche bestätigen (oder begründen) im wesentlichen die Richtigkeit der Überlegungen, die zu den Prüfvorschriften für (nichttragende und nichtaussteifende) Außenwände in DIN 4102, Blatt 3, Ausgabe Febr. 1970 geführt haben. (Die im Wandprüfstand bei der Prüfung derartiger Wandelemente zu steuernde Temperaturkurve steigt nämlich gerade bis ca. 650°C über die Anfangstemperatur an.)

1.3.4. Brandversuche Underwriters Laboratories, Trenton [12]

Die Brandversuche wurden ausgeführt, um das Brandverhalten eines oberhalb eines Fensterbandes verlaufenden, auf der Außenseite ungeschützten Stahlbalkens mit I-Profil zu studieren, wenn es im Gebäudeinnern zu einem Brand kommt. Die Steghöhe des Balkens umfaßte die Höhen von Sturz und Fensterbrüstung und hatte einen Wert von ca. 1,75 m.

Aufgrund der sehr großen Fensterflächen war die Abbrenngeschwindigkeit nicht durch die Ventilation begrenzt. Die aus den Fenstern herausschlagenden Flammen hatten eine Höhe von weniger als ca. 1 m. Das Verhältnis von Flammen- und Fensterhöhe betrug demnach ca. 0,6. Der Brand besaß, wenn die in Abschnitt 1.3.2 angestellten Überlegungen wiederholt werden, eine äquivalente Normbranddauer für die Bauteile im Innern des Gebäudes von schätzungsweise 35 Minuten. Die mittlere Stahltemperatur des Steges erreichte einen Wert von maximal ca. 350°C. Die maximal erreichten Einzeltemperaturen sind nicht angegeben.

Es sei angemerkt, daß ein Träger der beschriebenen Art unter dem Einfluß der bei den englischen Versuchen maximal erreichten Wärmestromdichten eine Maximaltemperatur von 550 bis 600°C erreicht haben könnte.

*) Die Wärmestromdichten hängen stark von der Oberflächentemperatur der Empfängerfläche ab. Bei den Versuchen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) lag diese wegen einer Wasserkühlung unter 200°C. Über die Temperaturen der ungekühlten Empfänger in England liegen Angaben nicht vor. Damit sind die Angaben möglicherweise sehr beschränkt vergleichbar.

Unter den Bedingungen des Normbrandes – also der Beflammung nach der Einheitstemperaturkurve DIN 4102, Blatt 2 – hätte die Stegtemperatur nach 35 min bei ca. 650°C gelegen.

Die Underwriters Laboratories führten in einer gasbeheizten Kammer an einem gleichartigen Träger einen Zusatzversuch aus. Die Temperaturen am Stahl lagen deutlich unter den Werten des Ausbrennversuches unter Verwendung von Holzkrippen. Es war, trotz Einhaltung der Normkurve im Brandraum, nicht möglich, die optimalen Feuerbeanspruchungen vor der Fassade des Gebäudes zu simulieren. Hier ergibt sich eine Parallellität zu den Hamburger Versuchen (Abschnitt 1.3.1).

1.4. Zusammenfassung, Gegenstand eigener Untersuchungen

Folgende Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen können als gesichert gelten:

1. Die *Stützenabschnitte vor den Fenstern* eines Brandraumes werden – solange sie in der Fassadenebene stehen – kaum weniger beansprucht als Innenstützen. Die Beanspruchung wirkt jedoch nicht allseitig gleichmäßig. Es reicht daher in der Regel eine einseitige Abschirmung aus, bei der vor allem der seitliche Überstand von ausschlaggebender Bedeutung ist. Die englischen Versuche zeigten, daß ein ca. 20 cm breiter beidseitiger Überstand für ein 20 cm tiefes Stützenprofil den gleichen Schutzwert besitzt, wie eine allseitige Bekleidung von Innenstützen der Feuerwiderstandsklasse F 90. Die Hamburger Versuche, die den extrem ungünstigen Brandverlauf nur teilweise richtig nachbildeten, ließen einen Überstand von > 12 cm erwarten.
2. Die *Vergrößerung des Abstandes* von der Fensterebene des Brandraumes führt für die in Höhe des Brandgeschosses befindlichen Stützenabschnitte zu einer Abminderung der Feuerbeanspruchung, deren Maß nicht sicher aus den Hamburger Versuchen hergeleitet werden kann.

Andere Untersuchungen fehlen.

Außenstützen mit einem Abstand zur Fassade können jedoch vor der Brüstung des nächsthöheren Geschosses in den Flammenkegel der aus den Fenstern herausschlagenden Flammen geraten (vgl. Bild 1). Die Flammen können nach den englischen Versuchen eine Höhe von 1,7 h (h = Fensterhöhe) haben. Die Temperaturen dort müssen auf ca. 800°C, örtlich höher, geschätzt werden.

Der Flammenkegel hat keine so große horizontale Komponente. Es muß erwartet werden, daß eine Stütze hier mehr allseitig vom Feuer beansprucht wird und ein allseitiger Feuerschutz erforderlich wird. Detailuntersuchungen hierzu fehlen.

3. Das *seitliche Herausrücken* der Stütze aus dem Fensterbereich wirkt wie das Anbringen einer einseitigen Bekleidung (vgl. Bild 9). Der genaue Temperaturverlauf in der Umgebung der seitlichen Fensterränder ist jedoch nicht untersucht.
4. Die Feuerbeanspruchung der *Fassadenteile oberhalb der Fenster* des Brandraumes ist im ungünstigsten Fall vergleichbar mit der in DIN 4102, Blatt 3 genormten Prüfung. Die Fassade selbst liegt weitgehend außerhalb des

Flammenkegels. Die Temperaturen dort müssen noch untersucht werden.

Die bei den oben beschriebenen Untersuchungen offengebliebenen Fragen machen recht grundlegende und umfangreiche Untersuchungen notwendig. Die Größen, die in ihrer Summenwirkung, nämlich die Feuerbeanspruchung z. B. der Außenstützen ausmachen, lassen sich kaum theoretisch, sondern höchstens experimentell erarbeiten. Die dazu notwendigen Versuchs- und Meßeinrichtungen sind außerordentlich kostspielig. Allein die pro Versuch notwendige Holzmenge muß mit einigen tausend Kilogramm angenommen werden. In Zusatzversuchen müssen die Bedingungen des ungünstigsten Brandablaufes untersucht werden. Die Versuche werden durch eine Reihe unkontrollierbarer Parameter, wie Witterungsbedingungen, Windstärke und -richtung, Eigenschaften der Brandlast usw. bestimmt.

Angesichts der genannten Schwierigkeiten wird deshalb in der vorliegenden Arbeit der Versuch gemacht, mit Hilfe der Modelltechnik, die heute bei der Modellierung von Brandvorgängen noch in den Anfängen steckt und deshalb einer gesonderten Einarbeitung bedurfte, die wichtigsten der anstehenden Fragen zu beantworten.

2. Modellgesetze bei der Nachbildung des Brandgeschehens vor der Fassade eines Gebäudes beim Brand in dessen Innern

In dem folgenden Abschnitt soll der in dem Modell zu untersuchende Vorgang genauer physikalisch eingereiht und dazu die wichtigsten Modellgesetze hergeleitet werden.

Um das Ergebnis von Modellversuchen in verkleinertem Maßstab richtig auf das Original extrapolieren zu können, muß zwischen beiden eine Ähnlichkeit vorhanden sein. Bei Strömungssystemen – hierzu kann der vorliegende Fall gerechnet werden – werden fünf Arten der Ähnlichkeit anzunehmen sein:

- a) die geometrische Ähnlichkeit, d. h. daß die Formen von Modell und Original einander gleich sein müssen;
- b) die kinematische Ähnlichkeit, d. h. die einzelnen Teilchen müssen beim Modell und beim Original Bahnen von der gleichen Form beschreiben;
- c) die dynamische Ähnlichkeit, d. h. die relative Bedeutung der verschieden wirksamen Kräfte muß beim Modell und Original die gleiche sein;
- d) die thermische Ähnlichkeit, d. h. die Temperaturunterschiede in den verschiedenen Teilen des Systems müssen in beiden Fällen gleiche Bedeutung haben;
- e) die chemische Ähnlichkeit, d. h. die stoffliche Zusammensetzung in den verschiedenen Teilen des Systems muß beim Modell und Original gleiche Bedeutung haben.

Die für die Bestätigung dieser Ähnlichkeiten in jedem vorgegebenen System erforderlichen Kennzahlen oder Formeln können z. B. durch eine Dimensionaluntersuchung oder anhand von Differentialgleichungen ermittelt werden, die die Strömungsvorgänge, die Wärme- und Massenübertragung und die chemische Reaktion des Systems beschreiben.

Für den Fall von Feuerungsanlagen weist Spalding [27]

darauf hin, daß es unmöglich ist, diese durch Modelle erschöpfend darzustellen. Für jede Strömung in jeder Feuerung zählt er 120 Ähnlichkeitszahlen auf, von denen viele miteinander unvereinbar sind.

In solchen Fällen greift man in der Praxis zur Teilmodellierung, bei der nur die wichtigsten Prozesse nachgebildet werden.

2.1. Temperaturen und Geschwindigkeiten in Flammen

Das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes wird, wie Bild 1 zeigt, überwiegend durch die zum Fenster herausschlagenden Flammen bestimmt. Die bisherigen Untersuchungen legen den Schluß nahe, daß diese z. T. unabhängig von dem wirklichen Brandgeschehen, im Innern des Hauses vielleicht sogar unabhängig von der Temperaturverteilung dort, sein könnte. Man kann hieraus zunächst versuchsweise schließen, daß bei Anwendung der Modellgesetze für Flammen bereits wichtige Hinweise auf das Brandgeschehen vor einer Hausfassade im Modellversuch zu erkennen sein müßten.

Die Bewegungen der heißen Gase und deren Temperaturen werden durch die Auftriebskräfte, also einem Sonderfall der Schwerkraft, durch die Tragheitskräfte der zu bewegenden bzw. beschleunigenden Gasmassen, weiterhin durch die Energiefreisetzung der Heizquelle bestimmt. Die hier gültigen Ähnlichkeitsgesetze werden damit auf der Grundlage der Froudeschen Ähnlichkeit herzuleiten sein.

Im Innern einer Flamme befinden sich Gase höherer Temperatur mit einer gegenüber der Umgebung verminderten Dichte. Hieraus folgen *Auftriebskräfte* proportional zu

$$r_0^3 (\rho - \rho_0) g \quad (4)$$

Diesen Auftriebskräften stehen *Trägheitskräfte* proportional zu

$$r_0^2 \rho u^2 \quad (5)$$

gegenüber. Weitere Kräfte leiten sich aus den Turbulenzspannungen her und führen näherungsweise zu einem Ausdruck proportional (5). Weiterhin mögen Kräfte aufgrund der Zähigkeit des Gases wirken, die wir hier probeweise zunächst vernachlässigen. Wichtige Größen zur Beschreibung einer Flamme sind die Energien, einmal die in der Zeit Δt von der Heizquelle freigesetzte Wärme

$$\dot{q} \Delta t \quad (6)$$

und die durch eine Meßfläche proportional r_0^2 aufgrund der Gasgeschwindigkeit u und der erhöhten Temperatur $T - T_0$ transportierte Energie

$$r_0^2 u \rho \Delta t c_p (T - T_0) \quad (7)$$

Damit sind die wichtigsten Größen zur Beschreibung einer aufsteigenden Heißgassäule in der für jede Flamme spezifischen Einheit, etwa r_0 angegeben. Jeder der angegebenen Ausdrücke hat für Flammen verschiedener Größe, also unterschiedlichem r_0 im allgemeinen unterschiedliche Werte. Zwei Flammen, als Modell und Original bezeichnet, werden aber dann als physikalisch ähnlich angesehen werden können, wenn jeweils die Verhältnisse der Kräfte und Energien für geometrisch ähnliche Orte gleich sind, daß also einerseits

$$\frac{r_0^3 (\rho - \rho_0) g}{r_0^2 \rho u^2}$$

und andererseits

$$\frac{\dot{q}}{r_0^2 u \rho c_p (T - T_0)}$$

dimensionslose, reine Zahlenfunktionen der dimensionslosen Ortskoordinaten, also gleich $f_1 \left(\frac{z}{r_0}, \frac{r}{r_0} \right)$ bzw. $f_2 \left(\frac{z}{r_0}, \frac{r}{r_0} \right)$ sind. Die Größen T und ρ sind gekoppelt, z. B. aufgrund der idealen Gasgleichung in der Form

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}$$

Damit haben wir gemischte dimensionslose Darstellungen für die Temperaturen T und die Gasgeschwindigkeiten u erhalten, die sich wie folgt auflösen lassen:

$$(T - T_0)^3 \sqrt[3]{\frac{g c_p^2 \rho^2 r_0^5}{T_0 \dot{q}^2}} = \Delta T^* \left(\frac{z}{r_0}, \frac{r}{r_0} \right) \quad (8)$$

$$u \sqrt[3]{\frac{c_p \rho T_0 r_0}{\dot{q} g}} = u^* \left(\frac{z}{r_0}, \frac{r}{r_0} \right) \quad (9)$$

Die Ausdrücke der rechten Seiten der Gleichungen sollen generalisierte Temperaturen bzw. generalisierte Geschwindigkeiten genannt werden.

Die Gültigkeit der Gleichung (8) wurde von Yokoi [28] an Alkoholflammen verschiedener Abmessungen überprüft.

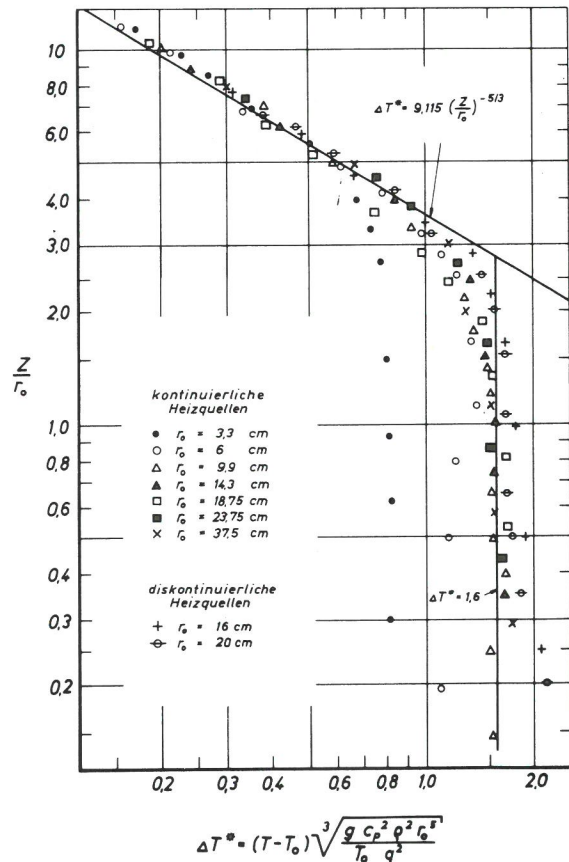


Bild 10
Dimensionslose Darstellung der Gastemperaturen auf der Achse einer runden Wärmequelle
Generalisierte Temperaturen als Funktion des Ortes (nach [28])
Alle Größen in cgs-Einheiten eingesetzt

Einmal brannten die Oberflächen von runden Tanks verschiedener Radien (kontinuierliche Heizquellen), zum anderen ein Bündel dicht stehender Dochte (diskontinuierliche Heizquellen). Die dort gewonnenen Ergebnisse zeigt Bild 10. Lediglich die beiden kleinsten Heizquellen weichen erheblich von dem Durchschnitt der übrigen Kurven ab. Hier muß ein laminarer Durchmischungsvorgang anstelle des sonst vorliegenden turbulenten angenommen werden. Bild 10 vermittelt gleichzeitig eine Vorstellung vom Verlauf der Funktion $\Delta T^* (\frac{z}{r_0}, O)$.

Im Falle einer rechteckigen Heizquelle werden die angegebenen Überlegungen zu modifizieren sein. Welcher Wert ist für r_0 einzusetzen, in welcher Form wird sich das Seitenverhältnis der Heizfläche bemerkbar machen? Yokoi setzte, wenn a die kürzere und $n \cdot a$ die größere der Seiten ist, $r_0^2 = n \cdot a / \pi$.

Eine Darstellung der Bild 10 entsprechenden Ergebnisse führt hier nicht zu einer einzigen Kurve, sondern zu einer Schar mit dem Parameter n . Yokoi glaubt aber feststellen zu können, daß für konstantes n die Gleichungen (8) und (9) ebenfalls unabhängig von den tatsächlichen Abmessungen des Flammenbettes sind. Bild 11 zeigt die Untersuchungsergebnisse von Yokoi [28].

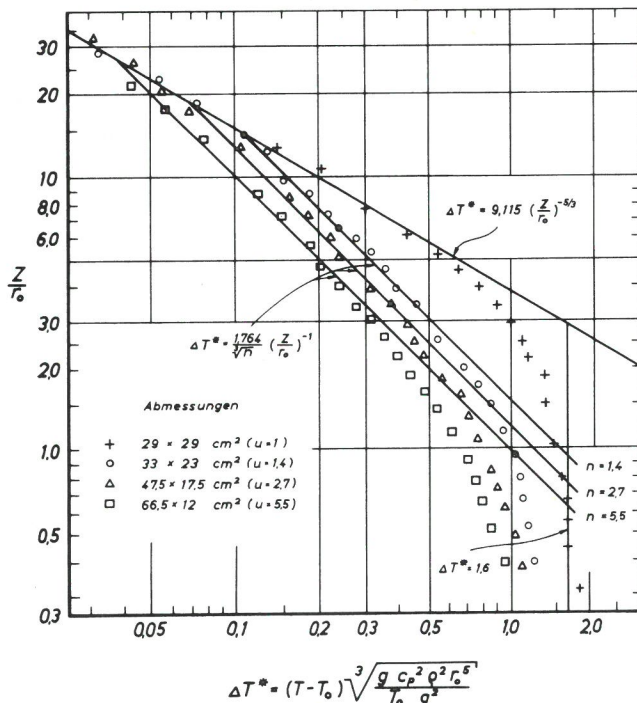


Bild 11
Wie Bild 10
Generalisierte Temperaturen als Funktion des Ortes (für rechteckige Wärmequellen unterschiedlichen Seitenverhältnisses (nach [28]))

Bild 10 und Bild 11 zeigen, daß für Flammen unterschiedlicher Größe eine dimensionslose Darstellung – hier beispielsweise für die Temperaturverteilung in der Flammenachse – möglich ist. Ist etwa die Funktion für eine bestimmte Flamme gemessen, so kann leicht auf andere Flammen mit bekanntem r_0 und bekanntem \dot{q} umgerechnet werden. Es folgt aus dieser Gleichung speziell, daß die Temperaturen an geometrisch ähnlichen Orten $(T - T_0)_M = (T - T_0)_O^*$ dann gleich sind, wenn gilt

*) M und O stehen für Modell und Original

$$\frac{\dot{q}_M}{\dot{q}_O} = \left(\frac{r_M}{r_O}\right)^{5/2} = M^{5/2} \quad (10)$$

d. h. wenn es gelingt, das Verhältnis der Abbrenngeschwindigkeiten zwischen Modell und Original wie die Potenz 5/2 des Maßstabes M einzurichten. In diesem Fall können also Temperaturen an geometrisch ähnlichen Orten ohne Umrechnung am Modell gemessen werden.

Was mit Bild 10 und 11 nur beispielhaft für die Flammenachse gezeigt ist, kann experimentell auch für andere Flammenbereiche gezeigt werden.

Die Auswertungen von Yokoi beziehen sich auf nicht leuchtende Flammen. Bei leuchtenden Flammen sind dem Verfasser ähnliche Meßergebnisse nicht bekannt geworden. Hier findet man lediglich häufiger Angaben über die Flammenhöhen bei verschiedenen Flammendurchmessern und Abbrenngeschwindigkeiten. Diese Angaben sollen im folgenden ausgewertet werden.

Eine leuchtende Flamme erscheint immer dann, wenn in der Umgebung der Heizquelle kleine Kohlenstoffpartikel sich auf hoher Temperatur befinden und deshalb im sichtbaren Spektralbereich strahlen. Die Grenzen einer Flamme werden somit durch folgende Fälle zu charakterisieren sein:

1. Die aus der Heizquelle aufsteigenden Kohlenstoffteilchen werden auf ihrem Weg innerhalb der Flamme vollständig verbrennen, außerhalb der Flamme gibt es also keine zur Strahlung fähige Partikel.
2. Die Temperatur von Gas und Partikel sinkt unter einen Mindestwert. Der Strahlungsanteil im sichtbaren Bereich wird dadurch so klein, daß er sich gegen die hell strahlenden Gebiete im Innern der Flamme nicht mehr abhebt.

Beim Verbrennen von Holz und Ölen wird die Flammengrenze überwiegend durch den zweiten Fall gegeben. Diese Flammen sind auch mit dem Begriff rußend verknüpft, der bereits die Anwesenheit von überschüssigen, also unverbrannten Kohlenstoffteilchen außerhalb der Flamme nachweist. Die durch den zweiten Punkt gegebene Grenztemperatur sei $T_1 = \text{const}$. Dann ergibt Gleichung (8) für die Flammenhöhe l_F (die Spitze der Flamme liegt auf der Achse)

$$\Delta T^* \left(\frac{l_F}{r_0}, O\right) = (T_1 - T_0) \sqrt[3]{\frac{g c_p^2 \rho^2 r_0^5}{T_0 \cdot \dot{q}^2}}, \quad (11)$$

wobei ΔT^* nach Bild 10 abschnittsweise in grober Näherung geschrieben werden kann als

$$\Delta T^* \left(\frac{l_F}{r_0}, O\right) = C \cdot \left(\frac{l_F}{r_0}\right)^{-\frac{1}{3\beta}}, \quad \beta > 0 \quad (12)$$

Zur bequemen experimentellen Prüfung des durch Kombination von (11) und (12) zu erhaltenden Ausdruckes und Bestimmung von β führen wir anstelle von \dot{q} die Abbrenngeschwindigkeit pro Flächeneinheit m' ein gemäß

$$m' = \frac{\dot{q}}{\pi r_0^2 H_u} \quad (13)$$

Hierbei ist H_u der Heizwert des Brennmaterials. Unter Zusammenfassung von Konstanten des Versuchs ergibt sich

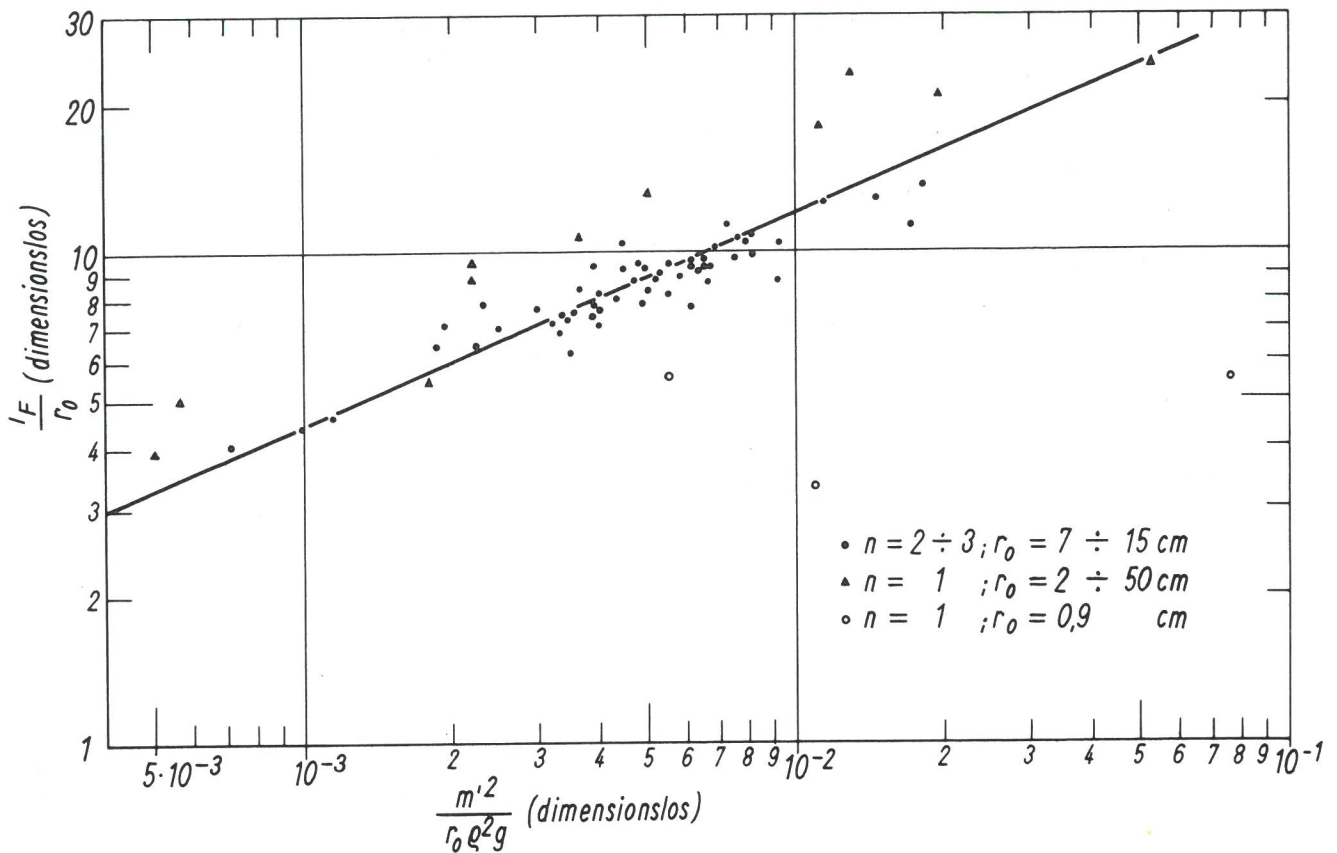


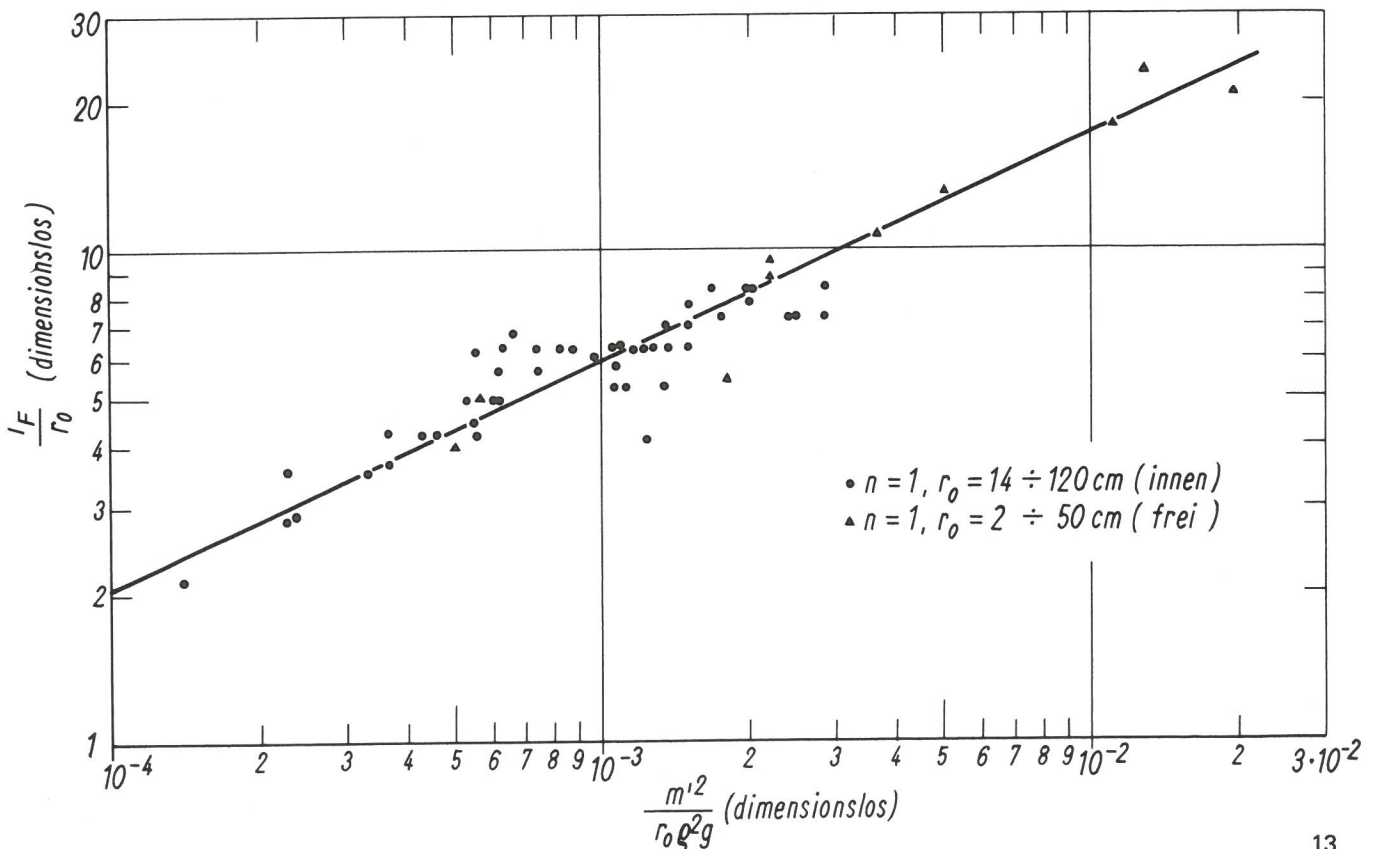
Bild 12
 Flammenhöhen von Krippenfeuern in dimensionsloser Darstellung
 Alles in cgs-Einheiten

$$\frac{l_F}{r_0} = B \left(\frac{m^2}{r_0 g \rho^2} \right)^\beta \quad (14)$$

Es gilt stets $\beta > 0,2$. C, B, β sind dimensionslose Konstanten.
 Für ρ wird der Wert $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ gesetzt ($T_1 \approx 900^\circ\text{C}$).

Bild 13
 Höhe von aus Modellbrandräumen herausschlagenden Flammen in dimensionsloser Darstellung

Die Gültigkeit von Gleichung (14) wird aufgrund von Mes-



sungen aus [31, 32] bei im Freien brennenden Krippen überprüft. Die Ergebnisse sind in *Bild 12* zusammengestellt. Man findet Gleichung (14) bei Krippen mit unterschiedlichem n und „Radien“, die um mehr als eine Größenordnung auseinanderliegen, gut bestätigt. Man findet $\beta \approx 0,4$ und $B \approx 450$. Beide Werte, besonders jedoch B , hängen etwas von n ab. Auffällig ist das starke Abweichen der Kleinstkrippen von nur 1,6 cm Kantenlänge. Hier wiederholt sich die Beobachtung in *Bild 10*. Die Flamme brennt in diesem Fall laminar, nicht turbulent.

Die bisher dargestellten Untersuchungen beziehen sich auf im Freien brennende Flammen, bei denen die Ausbildung des Heißgaskegels durch Bauteile, wie z. B. durch Decken oder Dächer, nicht behindert wird.

Die sehr einfachen, zunächst angesetzten Gesetzmäßigkeiten gelten auch für heiße Gase, die z. B. aus der seitlichen (Fenster-) Öffnung eines Brandraumes herausströmen.

Inwieweit sich dann die Flammenhöhen – als Spezialfall der Temperaturen – mit Gleichung (14) beschreiben lassen, ist in *Bild 13* untersucht. Dazu wurden Modellbrandversuche mit Krippenabmessungen r_0 zwischen 14 und 120 cm (Krippe mit 2,0 m Kantenlänge!) bei $n = 1$ ausgewertet. Die Versuchsergebnisse dazu sind [33 . . . 35] entnommen. *Bild 13* enthält zum Vergleich zusätzlich Punkte aus *Bild 12*.

Es fällt auf, wie gut die Werte für Innenräume und im Freien auf *einer* Kurve liegen. Die Höhe der Flamme scheint also nur sehr wenig von der Lage eines evtl. Daches abzuhängen.

Man wird versuchen zu folgern, daß die Säule der aufsteigenden Heißgase durch das Dach eines voll belüfteten Innenraumes nur seitlich verschoben wird und die Temperaturverteilung in ihr im Vergleich zu einem freien Feuer kaum verändert wird.

Allgemein läßt sich als Zusammenfassung des Abschnittes 2.1 sagen, daß die aufgrund sehr einfacher Annahmen und zunächst erheblich erscheinender Vernachlässigungen gefundene dimensionslose, also von den tatsächlichen Abmessungen der Heizquelle, speziell eines Brandherdes, unabhängige Darstellung der Temperaturen in einer Heißgassäule experimentell weitgehend gesichert ist. Die Gültigkeit der Gleichung (8) ist damit bestätigt. Bei leuchtenden Flammen beschränkt sich der Nachweis allerdings überwiegend auf Bereiche in der Nähe der Flammenachse.

Der Nachweis über die Gültigkeit der Gleichung (9), die Gasgeschwindigkeiten betreffend, konnte mangels Versuchsergebnisse nicht geführt werden. Die Bedeutung eines derartigen Nachweises tritt jedoch im Rahmen der vorliegenden Fragestellung zurück.

2.2. Wärmestrahlung von Flammen

Die von der Heizquelle freigesetzte Wärmemenge \dot{q} wird nicht nur zur Beschleunigung der aufsteigenden Gassäule und zu deren Erwärmung verbraucht. Ein nicht unerheblicher Teil (nach [31] bei freien Krippen im Mittel 17 %) wird als Wärmestrahlung frei. Ausgangspunkt dieser Strahlung ist dabei die Heizquelle, die leuchtenden Teile der Gassäule – also die Flamme – und andere heiße Teile der Gassäule.

Bei Feuern in Innenräumen treten weiter Wechselwirkungen

durch Strahlung zwischen den Wänden und der Flamme auf. Diese Wechselwirkung wird durch die geometrische Lage der strahlenden Flächen zueinander (Configurationsfaktor! [36 . . . 39]), deren charakteristische Strahlungsgrößen, wie Emissions-, Absorptionsvermögen oder Durchlässigkeit sowie durch deren Temperaturen bestimmt. Diese Gesetzmäßigkeiten sind hinlänglich bekannt und sollen hier nicht wiederholt werden.

Der nicht leuchtende Teil der heißen Gassäule strahlt. Diese Wärmestrahlung liegt ausschließlich im Infraroten und besteht im wesentlichen aus der charakteristischen Molekülstrahlung von CO_2 und H_2O . Diese Strahlung besteht aus diskreten Banden und ist also auch nicht angenähert schwarz. Näheres hierzu mit einer ausgezeichneten Literaturübersicht in [41]. (Eine aus vollständig verbranntem Dieselöl entstandene (nicht leuchtende) Gassäule von 1 273°K und 60 cm Dicke strahlt etwa 16 % der Energie einer schwarzen Fläche gleicher Temperaturen aus.)

Die optischen Eigenschaften von leuchtenden Flammen werden bestimmt durch die Eigenschaften der in feinsten Verteilung in der Flamme vorliegenden Kohlenstoffteilchen. Diese zeigen ein gegenüber dem massiven Kohlenstoff völlig abweichendes Verhalten. Während Kohlenstoff im gesamten sichtbaren Spektrum „grau“ strahlt, ist an feinsten Rußsystemen eine starke Wellenlängenabhängigkeit des Absorptionsvermögens festzustellen. Wegen der Einzelheiten hierzu wird auf die Literatur verwiesen [40, 41, 42].

Die Dichte der Wärmestrahlung in der Umgebung leuchtender Holzfeuer ist von Fons [31] untersucht worden. Durch Integration über den gesamten Halbraum oberhalb der Flamme stellte er fest, daß im Mittel 17 % der gesamten freigesetzten Energie als Strahlung frei wird. Diese Angabe stimmt mit den Meßergebnissen an nicht leuchtenden Flammen fast überein. Die Untersuchungen [31] wurden an unterschiedlichen Holzarten ausgeführt und führten zu jeweils sehr ähnlichen Versuchsergebnissen.

Der Strahlungsanteil an der Gesamtenergie hängt also speziell nicht wesentlich von der Größe $m^2/r_0 \rho^2 g$ ab. Der Strahlungsanteil ist unabhängig von der absoluten Größe von r_0 , er behält damit seinen Wert, gleichgültig ob an kleinen Modellen oder an größeren Flammen gemessen wird.

2.3. Bemerkungen zur Zahl $m^2/r_0 \rho^2 g$

Es zeigt sich als Ergebnis der Abschnitte 2.1 und 2.2, daß alle wichtigen Eigenschaften einer Flamme, gleichgültig ob frei oder in einem Innenraum brennend, durch die dimensionslose Größe $m^2/r_0 \rho^2 g$ beschrieben werden können. Diese Zahl wurde im Abschnitt 2.1 aus dem Verhältnis der Auftriebskräfte und Trägheitskräfte der Gassäule gebildet und verknüpft die beiden charakteristischen unabhängigen Variablen einer Heizquelle, nämlich die linearen Abmessungen und die Energiefreisetzung pro Zeiteinheit. Aufgrund ihrer Bildungsweise entspricht die Zahl $m^2/r_0 \rho^2 g$ der aus der Modelltechnik bekannten Froudeschen Zahl.

Wie die *Bilder 10 bis 13* zeigen, führt ein Modellansatz unter ausschließlicher Benutzung der Froudeschen Ähnlichkeit bereits zu sehr guten Ergebnissen bei der Untersuchung von Flammen oder Heißgaskegeln in veränderten Maßstäben. Offensichtlich treten andere Vorgänge, wie die Einflüsse der Zähigkeit der Gase auf die Strömung oder die mit dem Ausdruck (5) nur unvollkommen wiedergegebenen Turbulenzeinflüsse, in ihrer Bedeutung zurück.

Besonders einfach wird die Untersuchung von strömenden Heißgasen dann, wenn die oben angegebene „Froudesche Zahl“ im Modell und Original gleich wird. Dann nämlich werden die Temperaturen in der Flamme und damit speziell die Flammenhöhen geometrisch ähnlich.

Bei gleicher „Froudescher Zahl“ wird auch der Anteil der als Strahlung freiwerdenden Energie an der insgesamt freigesetzten im Modell und Original die gleiche Konstante.

Eine gleiche „Froudesche Zahl“ wird im Modell und Original dann erhalten, wenn die Energiefreisetzung \dot{q}_M und \dot{q}_O im Modell und Original sich transformieren gemäß

$$\frac{\dot{q}_M}{\dot{q}_O} = \left(\frac{r_M}{r_O}\right)^{5/2} = M^{5/2} \quad (15)$$

r_O, r_M seien dabei Längen, die im Original und Modell die gleiche Bedeutung haben (z. B. der Radius r_O der Heizquelle).

2.4. Zusammenfassung der Modellgesetze

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung interessiert vor allem der ungünstigste Brandverlauf, dies ist der heftigste aller bei gegebenem Raum und gegebenen Fenstern mögliche Brandverlauf. Der heftigste Brandverlauf ist, wie bereits erläutert, durch ein Maximum an Abbrenngeschwindigkeit \dot{Q} gegeben.

Der ungünstigste Brandverlauf ist in Abschnitt 1.2.1.2 dann gegeben, wenn die Abbrenngeschwindigkeit allein durch die Lüftungsbedingungen, also die Geometrie der Fenster gegeben wird.

Die Abbrenngeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fenstergeometrie ist mit Gleichung (1) berechenbar

$$\dot{Q} = \text{const. } A_F \sqrt{h}$$

Bei der Veränderung der Abmessungen l mit dem Maßstab

$$M = \frac{l_M}{l_O}$$

(M – Modell, O – Original) verändert sich die Abbrenngeschwindigkeit \dot{Q} und damit die dazu proportionale Energiefreisetzung \dot{q} mit $M^{5/2}$, weil A_F mit M^2 und \sqrt{h} mit $M^{1/2}$ sich verändert, d. h. es gilt

$$\frac{\dot{q}_M}{\dot{q}_O} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_O} = M^{5/2}$$

Die sich aus der Konstanzhaltung der „Froudeschen Zahl“ im Abschnitt 2.3 ergebende Modellierungsbedingung (15) wird also für den im Rahmen dieser Arbeit zu betrachtenden besonders ungünstigen Brandverlauf automatisch erfüllt. Dies bedeutet speziell:

Wenn die Modellversuche im verkleinerten Maßstab nur so ausgeführt werden, daß die Abbrenngeschwindigkeit durch die Lüftung gegeben wird, dann können alle Ergebnisse die *Temperaturverteilung* in der zum Fenster herausschlagenden Flamme und deren Höhe betreffend direkt auf andere Maßstäbe, speziell also auf die Abmessungen des Originals, ohne Umrechnung übertragen werden.

Über die Wärmestrahlungsintensitäten und deren Transformation mit dem Modellmaßstab kann folgendes gesagt werden:

Nach Abschnitt 2.2 kann das Verhältnis von durch Strahlung freigesetzter Energie \dot{q}_S zur Gesamtenergie \dot{q} als konstant angesehen werden. Bei Maßstabtransformation transformiert \dot{q} und damit \dot{q}_S in dem hier betrachteten Fall mit $l^{5/2}$. Da die Größe der strahlenden Fläche wegen der geometrischen Ähnlichkeit der Flammenform mit l^2 zu transformieren ist, folgt hieraus für die Wärmestrahlungsintensitäten ein Transformationsgesetz

$$\frac{I_M}{I_O} = M^{1/2} = \left(\frac{l_M}{l_O}\right)^{1/2}$$

Aus der Literatur [42, 43] sind Untersuchungen über die Abhängigkeit der Emissionszahlen leuchtender Flammen von der Dicke der Flammensäule bekannt. Diese zeigen, daß das oben qualitativ hergeleitete Modellgesetz für die Strahlungsintensitäten in dem hier in Frage kommenden Bereich, also für Flammendicken von ca. 0,2 m bis 2 m eine ausreichend genaue Näherung darstellt.

Die für den gegebenen Fragenkomplex wichtigen Modellgesetze sind in *Tafel 1* zusammengefaßt. Sie gelten ausdrücklich nur für den Fall konstanter Froudescher Zahl.

Tafel 1

Einige Modellgesetze bei der Untersuchung des Brandgeschehens vor der Fassade eines Gebäudes

Größe	Modell	Original
Längen	l_M	$l_O = M l_M$
Energie	\dot{q}_M	$\dot{q}_O = M^{5/2} \dot{q}_M$
Gastemperaturen	T_M	$T_O = T_M$
Flammenhöhen	l_M	$l_O = M l_M$
Gasgeschwindigkeiten	u_M	$u_O = M^{1/2} u_M$
Strahlungsintensitäten	I_M	$I_O = M^{1/2} I_M$

3. Modellversuche zum Studium natürlichen Brandgeschehens vor der Fassade eines Gebäudes

Die Notwendigkeit, das Brandgeschehen vor der Fassade eines Gebäudes in *verkleinertem* Maßstab zu untersuchen, ergab sich am Ende des ersten Abschnittes. Die Möglichkeit, derartige Versuche im Modellmaßstab auszuführen, zeigte sich durch gezielte Auswertung von früher von anderen Forschern ausgeführten Modellbrandversuchen. Danach ist es möglich, die wichtigsten Parameter für das Brandgeschehen, speziell die Frage der Feuerbeanspruchung von Außenstützen, nach den Gesetzen der Froudeschen Ähnlichkeit aus Modellversuchen herzuleiten.

Der Verfasser berichtet in diesem Abschnitt über zwei zeitlich auseinanderliegende Serien von Modellbrandversuchen zur Untersuchung der Abhängigkeit des Brandgeschehens vor der Fassade von den Parametern Brandraumgeometrie, Brandbelastung, Fenstergeometrie und Fensteranordnung.

Die Untersuchungen im Modellmaßstab beschränken sich dabei bewußt auf die Nachbildung des brandschutztech-

nisch ungünstigsten Brandverlaufes im Innern des Gebäudes, also auf den durch Lüftung begrenzten Brand.

3.1. Erste Versuchsreihe

3.1.1. Versuchsanordnung

3.1.1.1. Brandhaus

Eine Ansicht des Modellbrandhauses zeigt *Bild 14*. Zwei übereinanderliegende Brandräume, von denen in der Mehrzahl der Versuche nur der untere brennbare Material enthielt, wurden von 2 cm dicken Platten aus Asbestzement begrenzt. Die vordere Fläche war offen und stellt das Fenster des Brandraumes dar. Die Rückwand des Brandraumes konnte zur Variierung der Raumtiefe versetzt werden. Der 0,4 m hohe und 0,4 m breite Brandraum hatte Tiefen von 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m und 1,2 m. Das Brandhaus war zur Abführung der Verbrennungsgase unter einer Esse aufgestellt.

3.1.1.2. Meßeinrichtungen

Die Temperatur in den Modellräumen (Brandraumtemperaturen) wurde an jeweils 5 Stellen in der Mittelebene senkrecht zu den Fenstern mit Nickelchrom-Nickel-Thermoelementen gemessen. Die Thermoelemente wurden aus 0,5 mm dicken Thermodrähten in keramischen Isolierstäben von 3 mm Dicke verlegt. Die Lage der Meßstellen geht aus *Bild 15* hervor.

Es wurden 0,5 mm dicke Thermodrähte in Rahmen vor der unteren und oberen Fensterfläche horizontal und vertikal ausgespannt und jeweils Kreuzungspunkte verschweißt. Die Lage der so entstehenden Thermoelemente zur Messung der Temperaturen in den Fensterflächen des Modellhauses zeigt *Bild 15*. Mit einem ähnlich gebauten

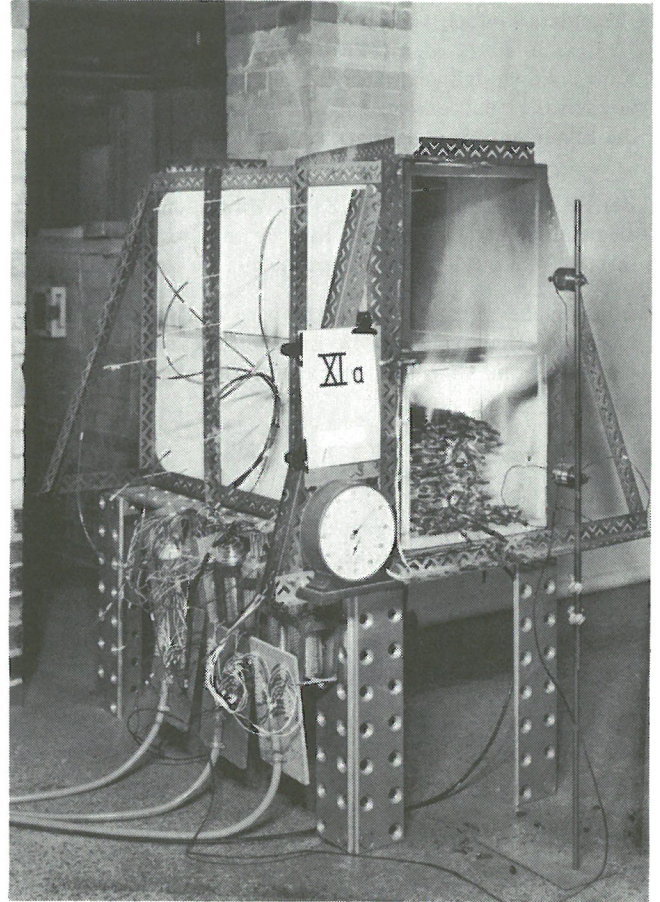
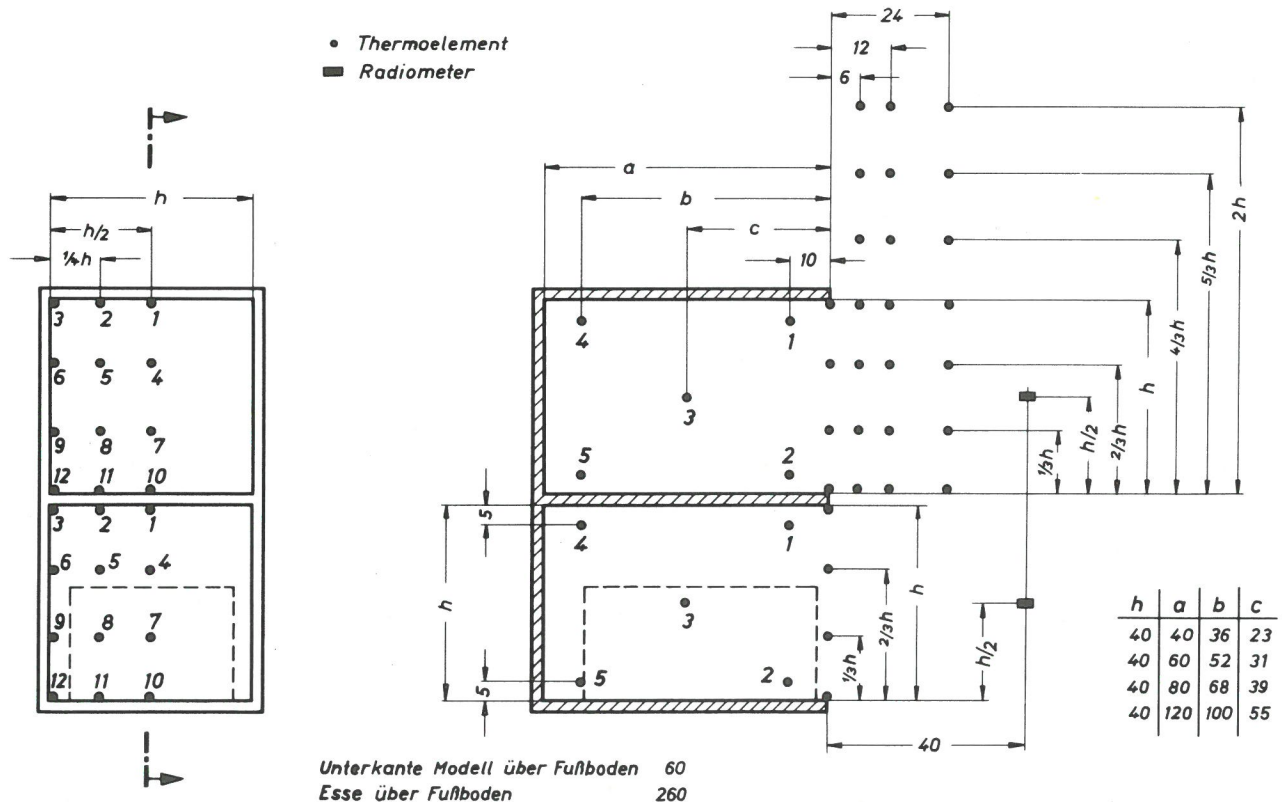


Bild 14
Ansicht des Modellbrandhauses der ersten Versuchsreihe

Bild 15
Anordnung der Meßstellen für die erste Versuchsreihe



Maße in cm

Rahmen wurden zusätzlich bei einigen Versuchen die Temperaturverteilung in der Mittelebene vor bzw. oberhalb des unteren Fensters gemessen. Die so erhaltenen Meßstellen sind ebenfalls in Bild 15 eingetragen.

Die Nebenlötstellen aller verwendeten Thermoelemente wurden in Eiswasserflaschen auf 0°C gehalten.

Alle Thermospannungs-Meßwerte wurden mit Hilfe von Mehrfarben-Punktdruckern mit jeweils 12 Meßstellen und einer Punktfolge von 2 s registriert. Aus den 5 Temperaturwerten des unteren Brandraumes wurde elektrisch der Mittelwert gebildet und zusammen mit den Einzelwerten aufgezeichnet.

Neben der Registrierung aller Temperaturen wurde in regelmäßigen Abständen (i. a. 30 s) das Brandhaus fotografiert. Verwendung fand eine Robot-Kamera mit Elektronenblitz, die von einem Zeitmarkengerät mit Magnetauslöser betätigt wurde.

3.1.1.3. Brandlast, Aufbau der Krippen

Das brennbare Material wurde in Form von Krippen aus Fichtenholz im Brandraum aufgeschichtet. Die auf die Grundfläche bezogenen Brandlasten (also die Brandbelastungen) betragen jeweils 4, 12 und 24 kg/m². Die Abmessungen der Krippen und die Stärke der Hölzer wurden so gewählt, daß die im Freien zu erwartende Abbrenngeschwindigkeit der Krippen größer ist als die im Brandraum aufgrund der Lüftung mögliche. Zur Dimensionierung wurden die Untersuchungsergebnisse von Gross [32] und O'Dogherly [44] herangezogen. Es wurde daher erwartet, daß die maximale Abbrenngeschwindigkeit allein durch die Lüftung, also überwiegend durch die Geometrie des Fensters bestimmt wird. Auf eine Wiegeeinrichtung zur Bestimmung des Abbrandes wurde daher verzichtet.

Krippen wurden überwiegend aus Hölzern mit der Querschnittsfläche 1 cm x 1 cm und einer Grundfläche von 0,8 x Fensterbreite und 0,8 x Brandraumtiefe hergestellt. Einzelheiten s. *Tafel 2*.

Für die Zündung der Krippen wurden mit Brennspritus getränkte 10 mm breite Streifen aus 12 mm dicken Holzfaserdämmplatten verwendet. Ihre Länge entsprach der Krippe. Die Tränkung erfolgte mit 0,8 cm³ Brennspritus je Zentimeter Länge. In jedem Zwischenraum der untersten Lage der Holzstäbe wurde ein getränkter Streifen so eingelegt, daß ihre Zündung nahezu gleichzeitig erfolgen konnte. Eine

eingebaute Krippe mit den Zündstäben ist z. B. in *Bild 16 a* zu erkennen.

3.1.2. Versuchsergebnisse

Der Ablauf eines Modellbrandes soll beispielhaft in *Bild 16* dargestellt werden. Die Brandbelastung des 0,6 m tiefen Brandraumes betrug dabei 12 kg/m². Bild 16 zeigt in einer von der automatischen Kamera registrierten Bildfolge alle wichtigen Brandphasen: 15 s nach der Zündung (*Bild 16 b*) greift das Feuer von dem Zündstreifen auf die Hölzer der Krippe über, in der 35. s (*Bild 16 c*) steigen bereits vom Holz ausgehende Flammen in den senkrechten Schloten der Krippe auf. Nach ca. 2 min ist der Brand voll entwickelt. Die Höhe der aus dem Fenster Herausschlagenden Flamme bleibt von jetzt ab, bis zum Ablauf der 5. Versuchsminute praktisch konstant, sinkt dann jedoch bis zum Verlöschen des Brandes rasch ab.

Die Länge der Zündphase der Krippen – dies ist die Versuchsdauer bis zum Erreichen der maximalen Abbrenngeschwindigkeit und kenntlich an der nicht länger wachsenden Flammenhöhe – ist zusammen mit der Brenndauer – definiert als Zeit bis zum Erreichen der maximalen mittleren Brandraumtemperatur – in der *Tafel 3* angegeben. Es zeigt sich, daß die Zündphase bei den hier gegebenen Lüftungsbedingungen nur von der Geometrie der Krippe abhängt. Ein Einfluß der Raumtiefe oder der Masse der Krippe wird nicht deutlich.

Tafel 3

Zündphase und Brenndauer, jeweils gemittelt und aus mindestens zwei Versuchen

Versuch	Zündphase min	Brenndauer min
I	2,0	4,0
II	2,0	4,2
III	4,2	11
IV	1,5	3,0
V	2,0	6,2
VI	4,5	20
VII	1,5	4,0
VIII	2,0	9,5
IX	4,8	34
X	1,6	8,5
XI	2,0	27
XII	5,0	78

Tafel 2
Aufbau der Krippen

Versuchsgruppe	Krippengrundfläche		Holzquerschnitt Kantenlänge cm	Zahl der Holzlagen	Zahl der Stäbe		Krippen- gewicht ca. kg	Brand- belastung ca. kg · m ⁻²	Tiefe des Brandraumes cm
	Länge cm	Breite cm			1.3..Lage	2.4..Lage			
I	32	32	0,5	18	10	10	0,76	4	40
II	32	32	1	23	6	6	2,42	12	40
III	32	32	1	28	10	10	5,22	24	40
IV	48	32	0,5	18	10	15	1,20	4	60
V	48	32	1	23	6	9	3,75	12	60
VI	48	32	1	28	10	15	7,50	24	60
VII	64	32	0,5	18	10	20	1,68	4	80
VIII	64	32	1	23	6	12	4,86	12	80
IX	64	32	1	28	10	20	10,0	24	80
X	96	32	1	8	6	18	2,5	4	120
XI	96	32	1	23	6	18	7,43	12	120
XII	96	32	1	28	10	30	15,75	24	120

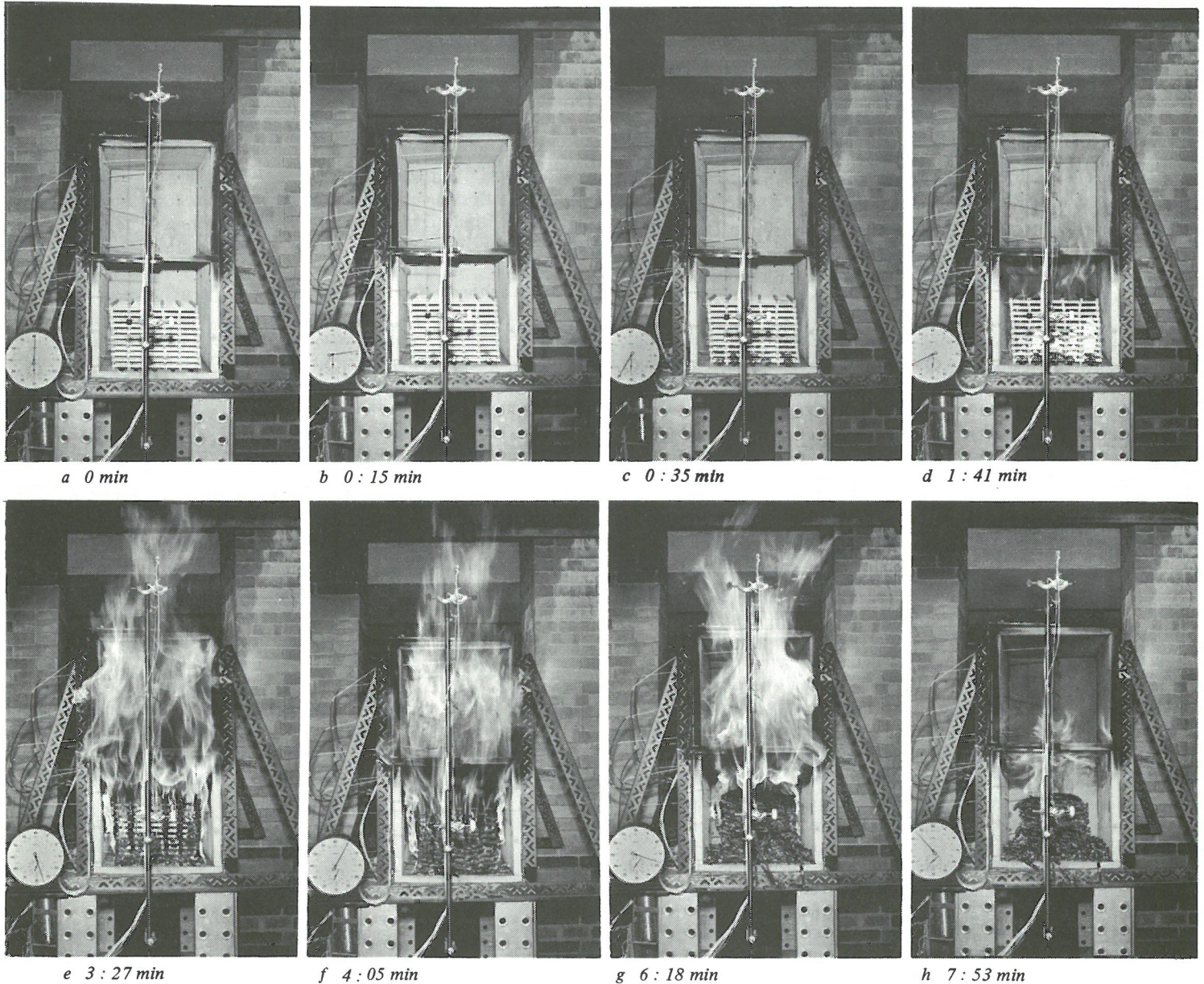


Bild 16
Verlauf des Brandversuches V a

Der Abbrand der Krippen und damit die Brenndauer nach dem Erreichen maximaler Abbrandgeschwindigkeit wird dagegen sowohl durch die Geometrie der Krippe als auch durch die Raumtiefe bestimmt. Die sehr „porösen“ Krippen bei den beiden niedrigen Brandbelastungen von 4 und 12 kg/m² brannten, mit zunehmender Raumtiefe ausgeprägter werdend, vom Fenster aus nach hinten ab.

Die relativ dichten Krippen, zu der größten Brandbelastung gehörend, brannten dagegen deutlich von ihrer Oberfläche her ins Krippeninnere fortschreitend ab. Erst beim Versuch XII überwiegt auch hier der Abbrand vom Fenster her.

3.1.2.1. Brandraumtemperaturen

Die örtliche Temperaturverteilung im Brandraum wird durch den Abbrand der Krippen bestimmt. Allgemein kann folgendes festgestellt werden: Die Temperatur der Meßstelle 4 (vgl. Bild 15) lag nahe dem Mittelwert aller 5 Meßstellen.

Die Deckentemperaturen nahe dem Fenster waren in der

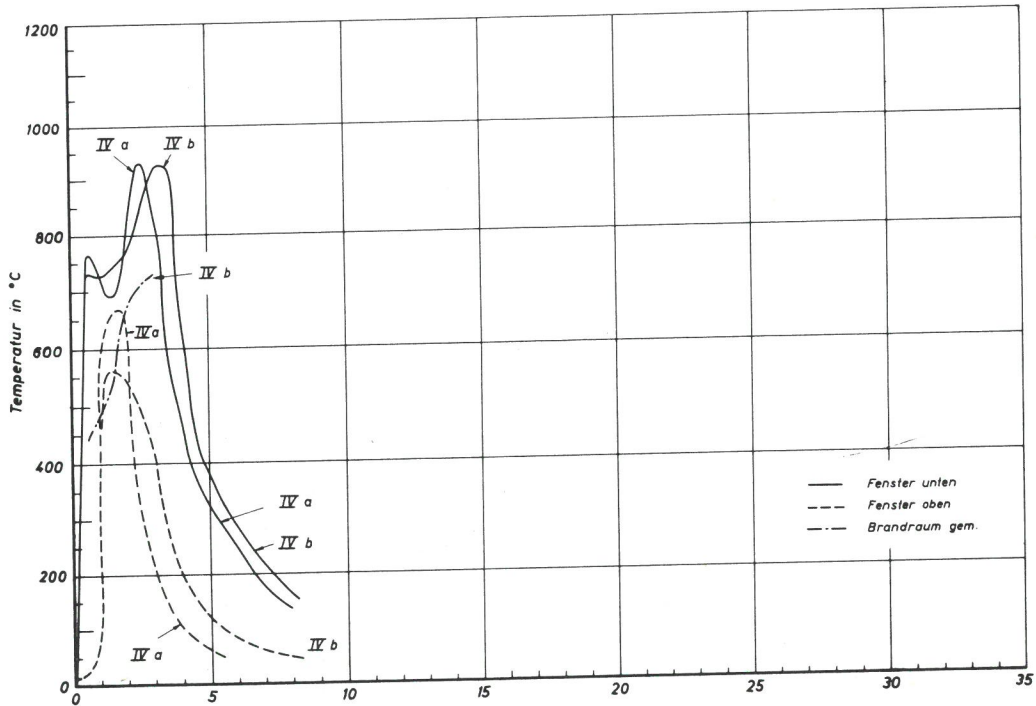
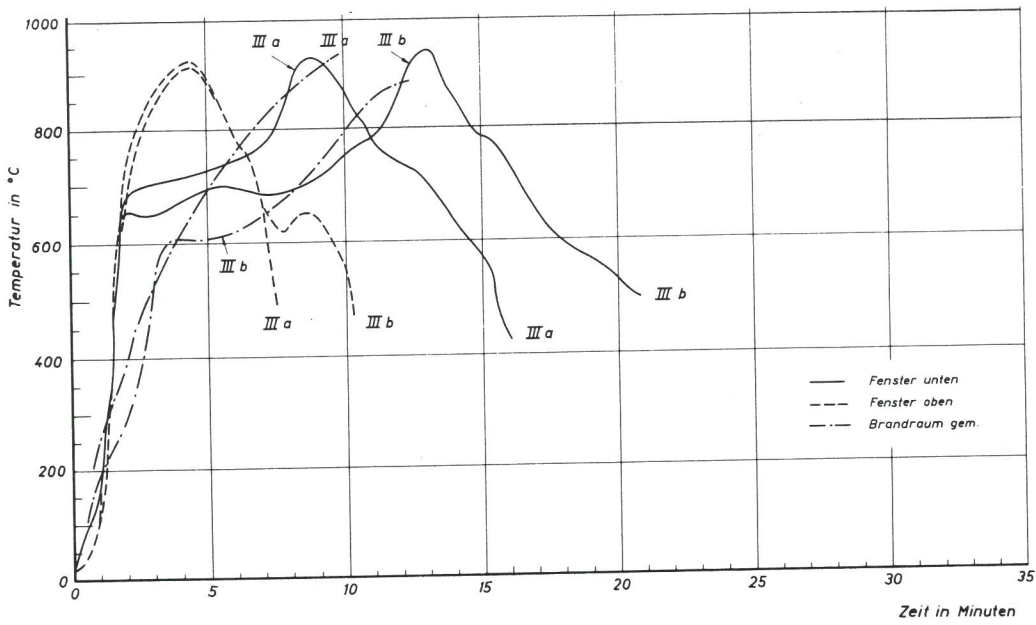
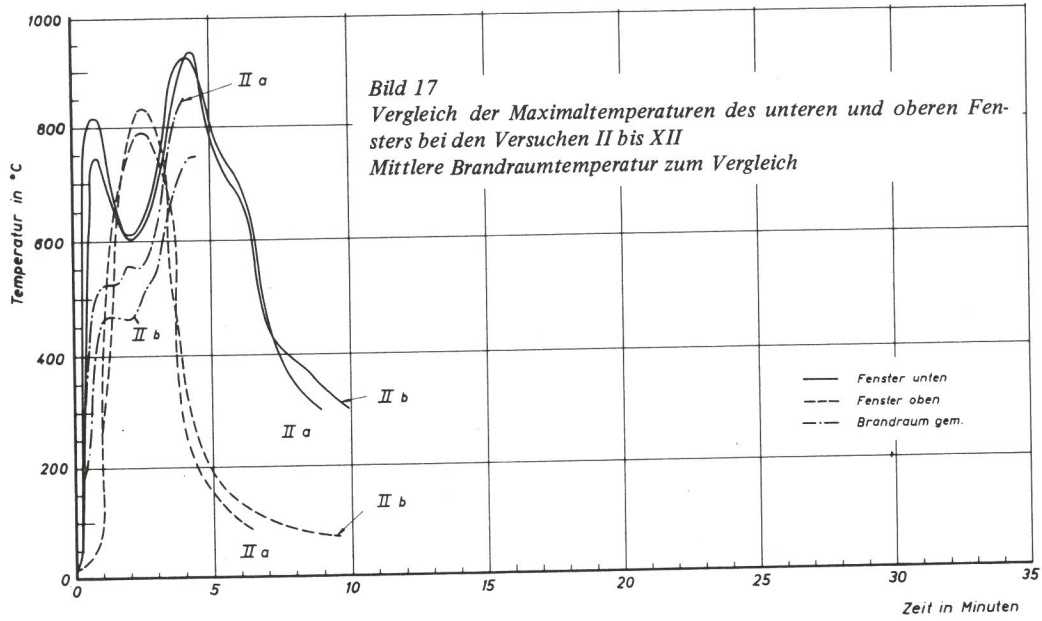
Anfangsphase des Versuches höher als die hinterer Brandraumbereiche. (Die örtliche Temperaturverteilung ist für den Versuch V u. a. in Bild 18 beispielhaft dargestellt.)

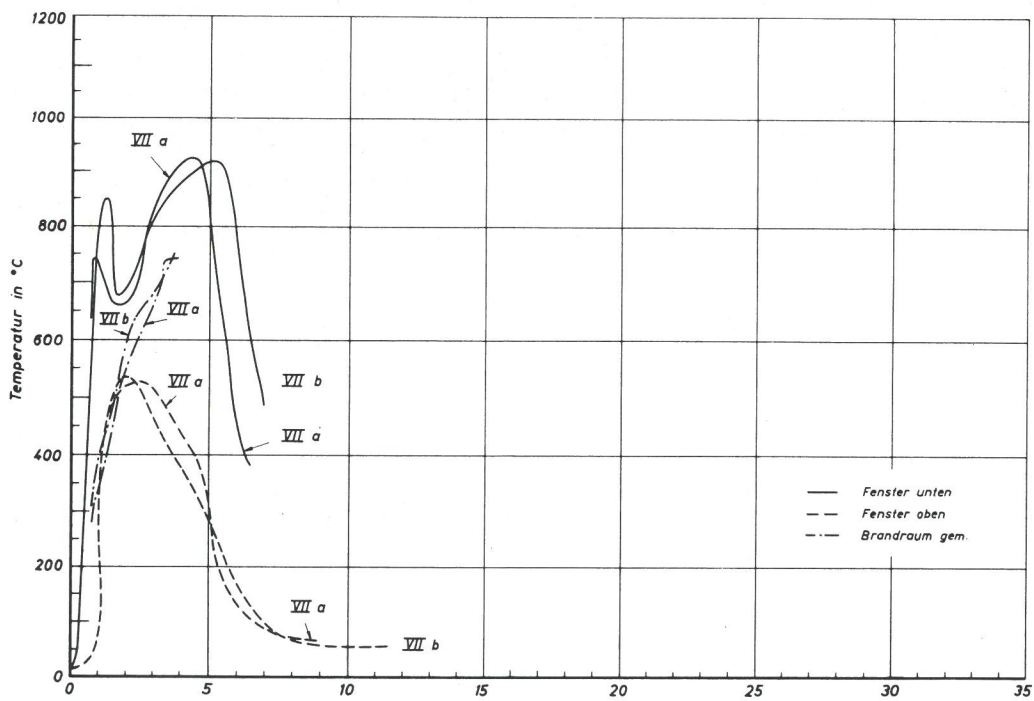
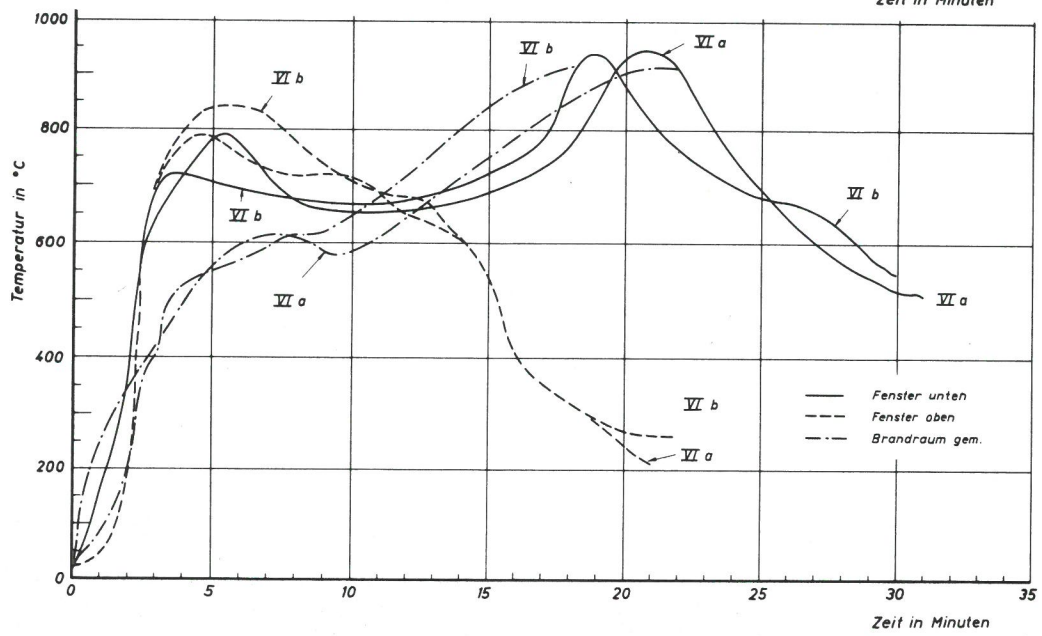
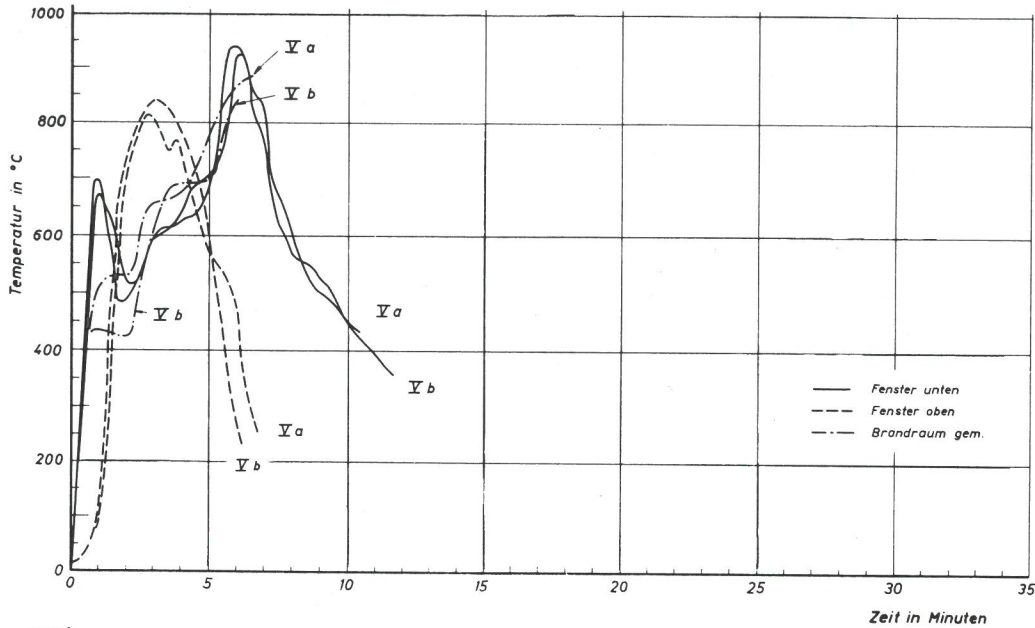
Die aus den 5 Brandraum-Thermoelementen gemittelten Temperaturen sind als Funktion der Zeit jeweils bis zum Temperaturmaximum in Bild 17 dargestellt. Die Brandraumtemperatur hängt – wie ersichtlich – von der Tiefe des Brandraumes, aber auch von der Oberfläche der eingelegten Krippen ab. Die Brenndauer wird durch die Brandbelastung bestimmt. Im zeitlichen Verlauf der Temperatur-Zeit-Kurven markiert sich i. a. das Ende der Zündphase als deutlicher Knick.

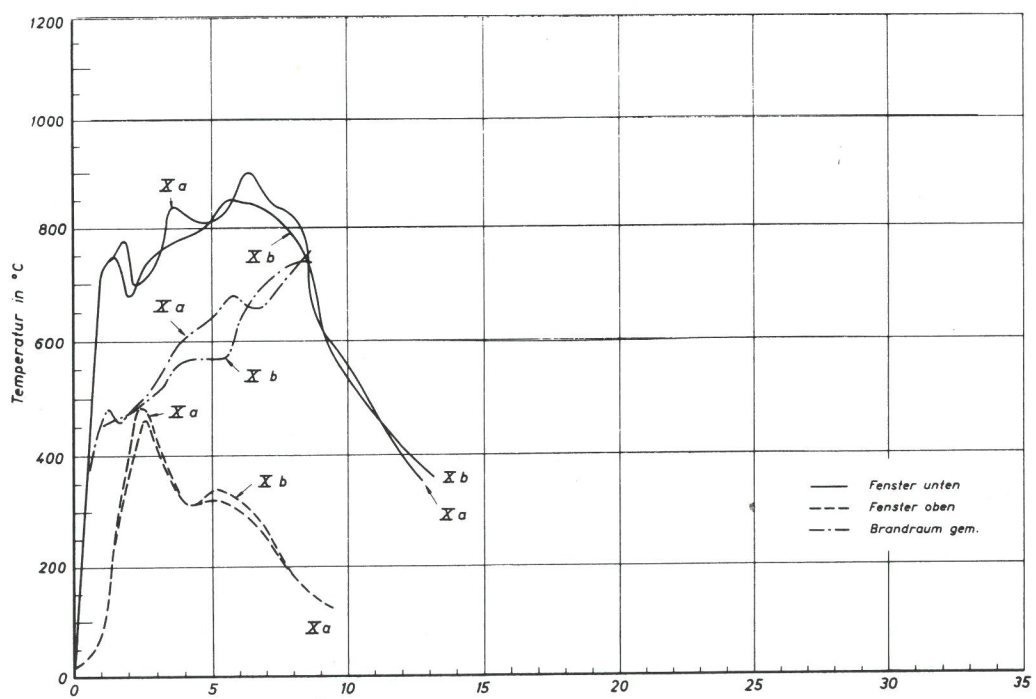
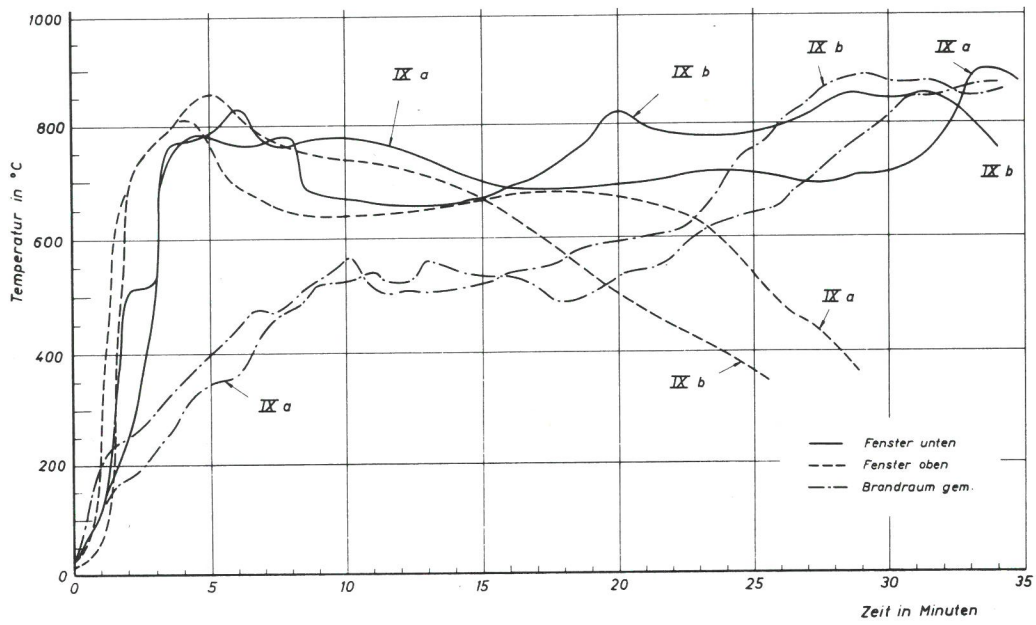
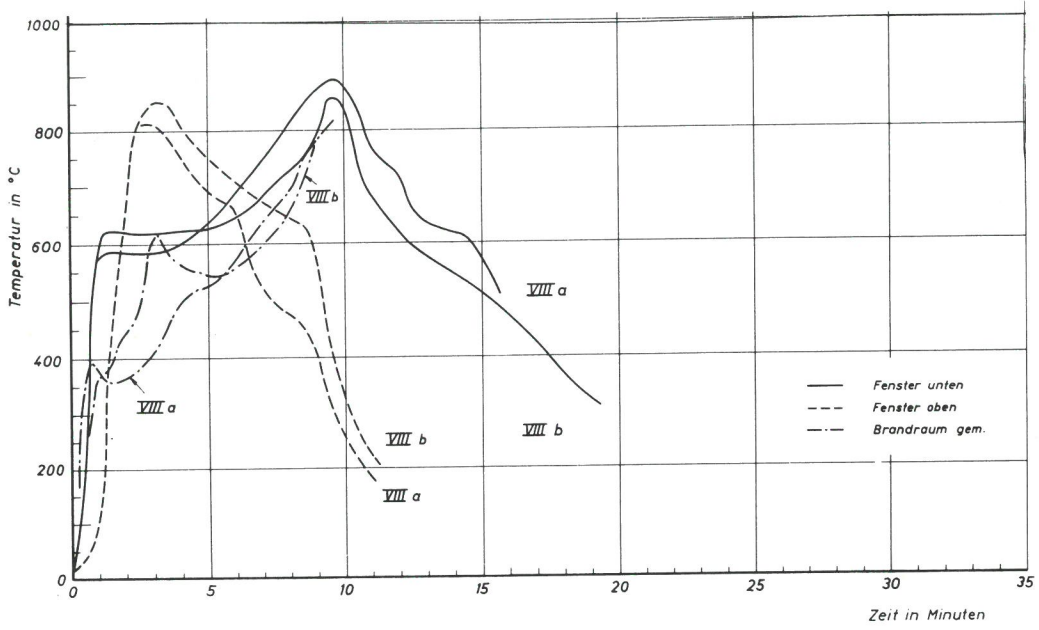
Die Brandraumtemperaturen sind nach Abschnitt 1.2.3 außerordentlich komplizierte Funktionen der verschiedensten Parameter. Sie sollen hier keiner zusätzlichen Untersuchung unterzogen werden.

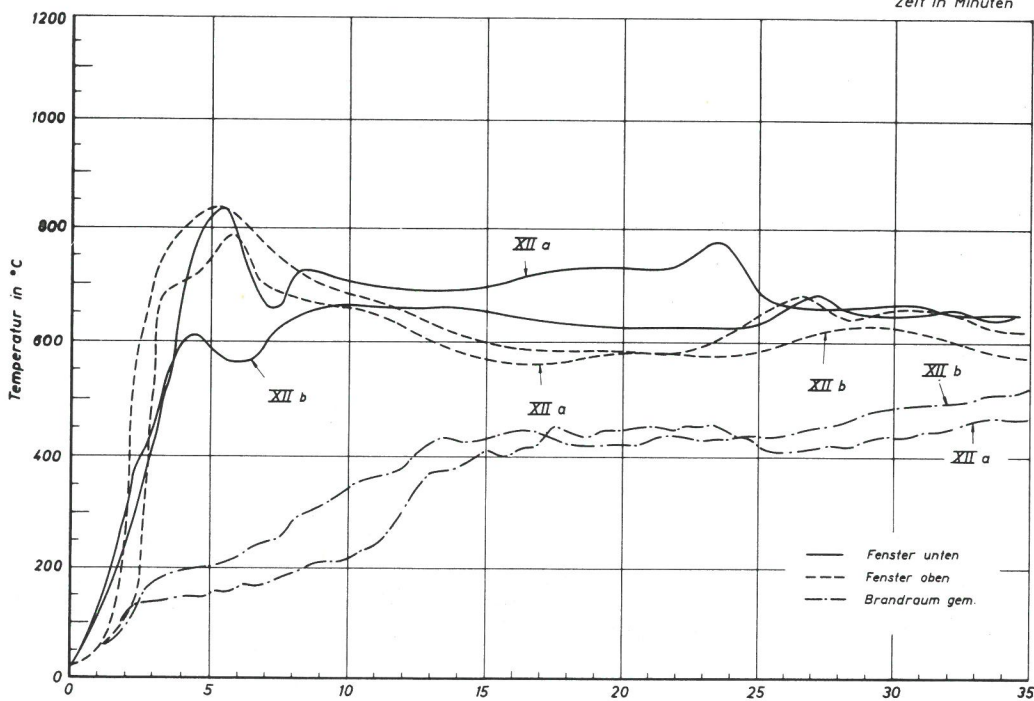
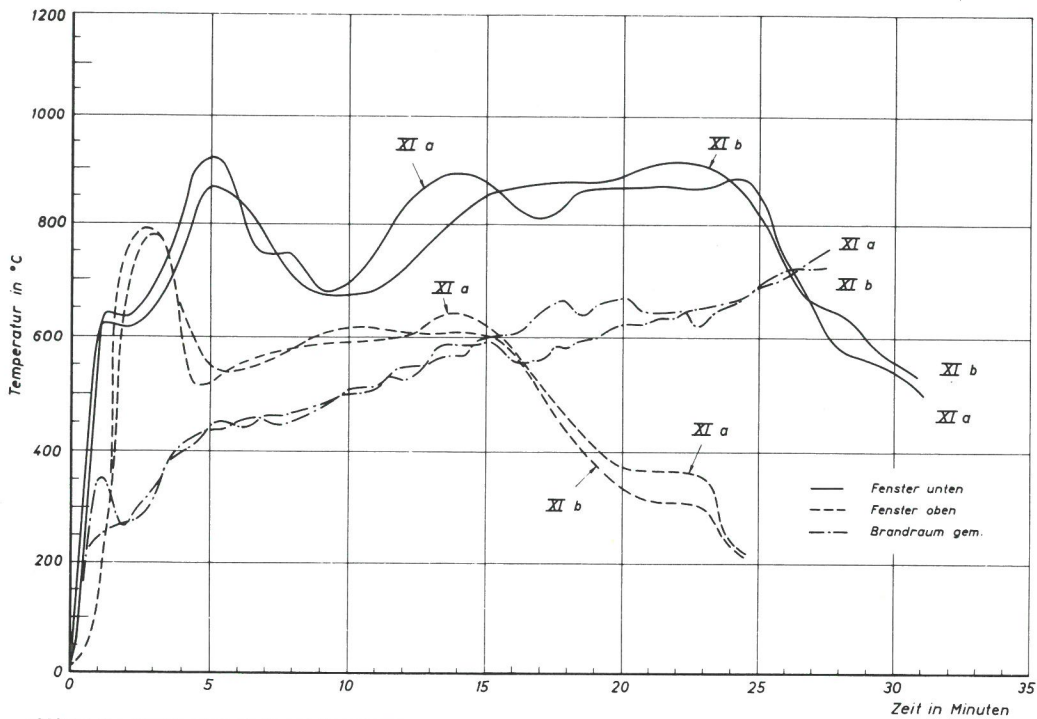
3.1.2.2. Temperaturen in den Fensterflächen der Brandräume

Die höchste Temperatur bei allen Versuchen wurde bei der









Meßstelle 1 (vgl. Bild 15) gemessen. Nur geringfügig niedriger lagen die Meßstellen 2 und 3, es folgten in weitem Abstand 4 und 5 und dann alle weiteren. Die zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums von Meßstelle 1 gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen 1 und 4 betragen im Mittel aller Versuche $500 \pm 50^\circ\text{C}$, die zwischen 1 und 7 gemessenen $750 \pm 50^\circ\text{C}$.

Es wurde beobachtet, daß die örtliche Temperaturverteilung weitgehend von der Raumtiefe und der Brandbelastung unabhängig ist.

Die höchsten Temperaturen während der Brandversuche im Bereich des oberen Fensters wurden i. a. von Meßstelle 2 angezeigt.

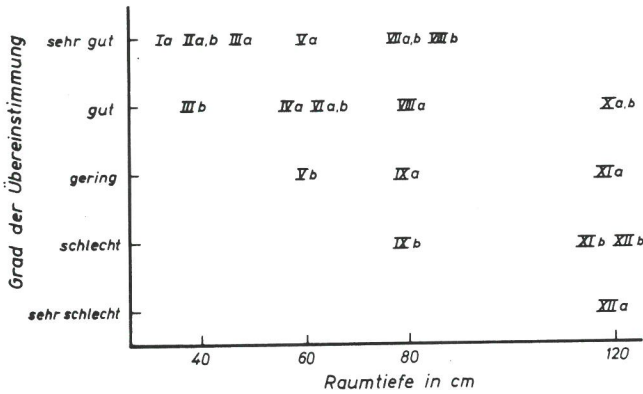
Die Temperaturzeitkurven der Meßstelle 1 des unteren Fen-

sters (dies ist die Maximaltemperatur der ausströmenden Gase) bei den Versuchen II bis XII sind ebenfalls in Bild 17 dargestellt. Wesentlich deutlicher als bei der gemittelten Brandraumtemperatur markiert sich hier die Temperaturspitze bei der Zündung als Folge des Abbrandes des Spiritus.

Ein Vergleich der mittleren Brandraumtemperaturen und der Temperaturen der Meßstelle 1 zeigt folgendes Ergebnis: Für alle Versuche gilt, daß die Ausströmtemperatur der Heißgase größer ist als die mittlere Brandraumtemperatur. Vergleicht man bei jedem Versuch die Temperaturen des Brandraumes mit denen der Meßstelle 1 in der Fensterfläche, so findet man als Funktion der Zeit das qualitativ in *Tafel 4* eingetragene Ergebnis. Die in *Tafel 4* erkennbare Tendenz wird deutlich, wenn man die Ausströmtemperaturen zu gleichen Zeiten bei den verschiedenen Versuchen mit-

einander vergleicht. So zeigt es sich, daß der Temperaturanstieg bei den Versuchen in den mindestens 60 cm tiefen Brandräumen (Versuche VI, IX und XII bzw. VII, VIII, X und XI) recht ähnlich ist. Die Ausströmtemperatur erscheint hier also weitgehend von der Raumtiefe unabhängig. Da andererseits die Brandraumtemperatur aber gerade sehr stark von der Raumtiefe abhängt, wird das in Tafel 4 dargestellte Ergebnis verständlich.

Tafel 4
Vergleich der Ausströmtemperaturen in Fensterebene mit dem Mittelwert der Brandraumtemperaturen

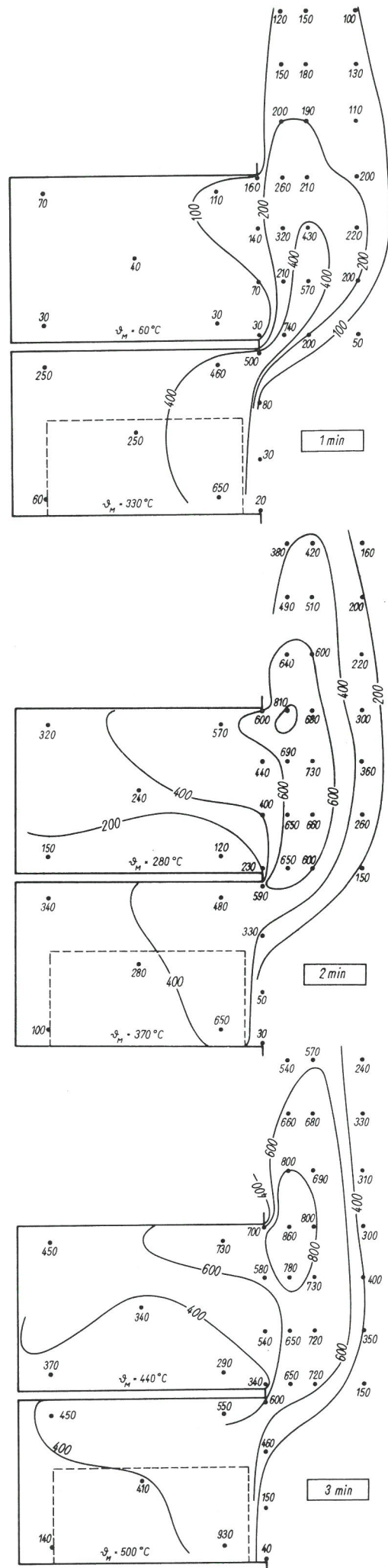


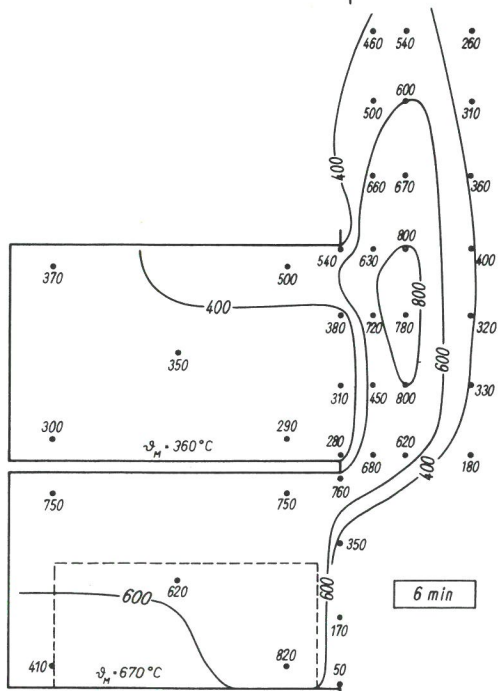
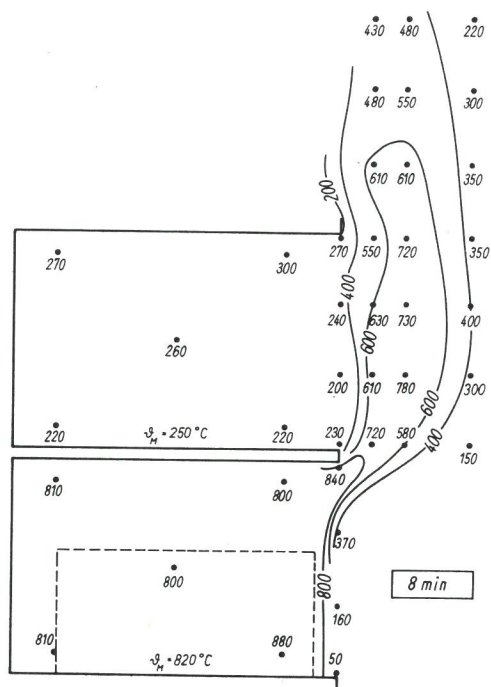
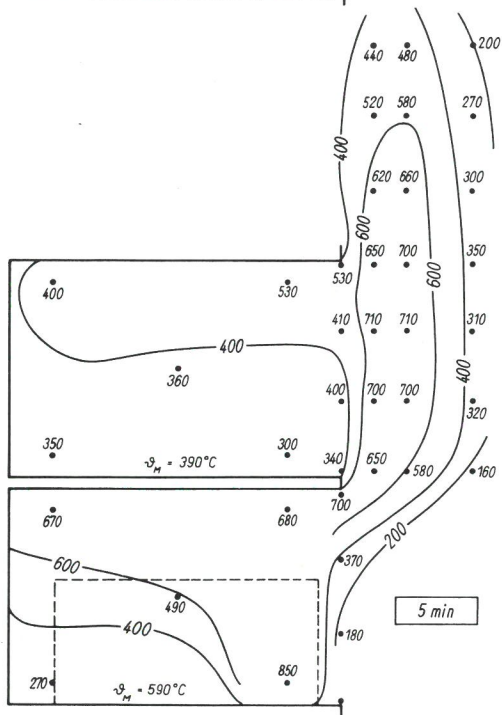
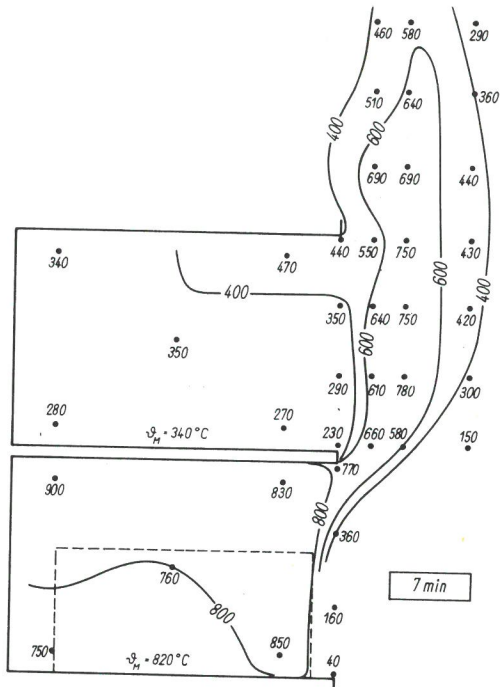
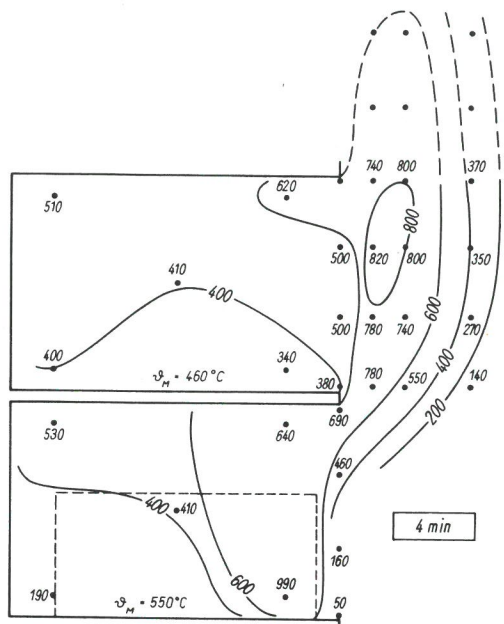
3.1.2.3. Temperaturen außerhalb des Brandraumes

Die Temperaturen außerhalb des Brandraumes werden durch die Flammen und die Heißgasströmungen bestimmt. Im oberen Brandraum zeigt die Meßstelle 1 (vgl. Bild 15) die höchste Temperatur an, die nahe der Temperatur der Meßstelle 1 im oberen Fenster liegt. Die maximalen Temperaturen im oberen Fenster sind als Funktion der Zeit für jeden Versuch ebenfalls in Bild 17 eingetragen. Der zeitliche Verlauf dieser Temperatur geht nicht mit den Temperaturen im unteren Brandraum parallel. So wird das Temperaturmaximum häufig erheblich früher als im Brandraum erreicht. Wir beobachten die Tatsache, daß die Brandraumtemperatur weiter ansteigt, während sie in der oberen Fensterebene bereits fällt. Das Temperaturmaximum im oberen Fenster fällt mit einer mittleren Brandraumtemperatur von ca. 600°C bei den Modellbrandversuchen zusammen. Dieser zunächst überraschende Effekt wurde in einigen Sonderversuchen vom Typ V näher untersucht. Dabei wurden zusätzlich Temperaturen in der Mittelebene vor und oberhalb der unteren Fensterfläche gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 18 zusammengefaßt. Die Bilder zeigen maßstäblich die Lage der Meßstellen und die zum jeweils angegebenen Zeitpunkt gemessene Temperatur. Die eingezeichneten Isothermen sind interpoliert.

Aus dieser Bildserie geht der gerade skizzierte Effekt deutlich hervor: Bis zur 3. Versuchsminute steigt die Temperatur im oberen Brandraum und seiner Fensterfläche ständig an (deutlich erkennbar an dem schrittweisen „Eindringen“ der Isothermen in den Brandraum). Von der 4. Versuchsminute an kühlt jedoch der obere Brandraum allmählich wieder ab. Es soll hierfür eine erste anschauliche Erklärung für diese Beobachtung versucht werden.

Bild 18 ▷▷▷
Temperaturen in der Mittelebene des Brandhauses beim Versuch V zu unterschiedlichen Zeiten nach der Zündung





Der Öffnungswinkel des von einer Wärmequelle nach oben steigenden Heißgaskegels wird überwiegend durch die Vertikalgeschwindigkeit der Heißgase bestimmt. Er ist um so kleiner, je größer diese ist, also je höher die Gastemperatur ist. Für den hier betrachteten Fall bedeutet dies, daß bei den niedrigen Brandraumtemperaturen der ersten Versuchsminuten der Öffnungswinkel des Heißgaskegels so groß ist, daß sich ein Teil dieser heißen Gase unter der Decke des oberen Brandraumes fängt und dort zur Erwärmung der Luft führt. Mit dann allmählich schlanker werdendem Kegel sinkt der in den oberen Raum gelangende Energieanteil solange, bis der Energieverlust in die Brandraumwände zu einer Abnahme der Brandraumtemperatur führt. Bei gegebenen Abmessungen des Raumes wird dieser Umkehrpunkt immer bei der gleichen Brandraumtemperatur im unteren Raum (hier also nahe bei 600°C) auftreten. Die hier so einfach dargestellten Verhältnisse werden verwickelter, weil der Heißgaskegel durch Teile des Brandhauses und durch die Turbulenzen ge-

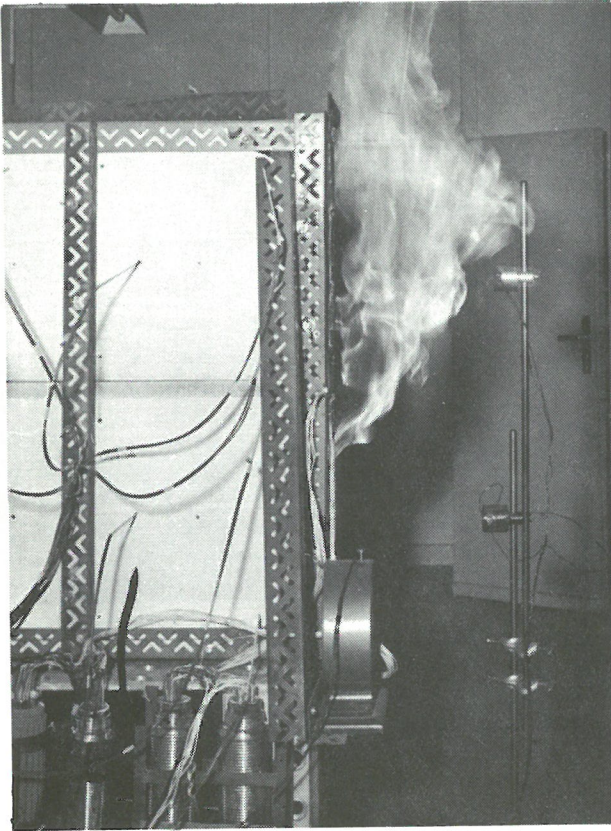


Bild 19
Seitenansicht der aus dem Modellbrandhaus herausschlagenden Flammen (Versuchstyp V, 4. Versuchsminute)

stört wird. Die Verbrennungsgase haben darüber hinaus eine mehr oder weniger große Horizontalkomponente der Geschwindigkeit.

(Vgl. Bild 19, das eine Seitenansicht der Flammen (Versuchstyp V, 4. Versuchsminute) zeigt.)

3.1.2.4. Wärmestrahlung

Die auf zwei Empfängerflächen vor den Fenstern des Brandhauses auftreffende Wärmestrahlung wurde mit den in Bild 14 erkennbaren Radiometern gemessen. Diese nahmen Strahlung aus einem Raumwinkel entsprechend einem Kegel mit 90° Öffnungswinkel auf. Der Konfigurationsfaktor Φ zwischen den Fensterflächen und dem dazugehörigen Radiometer betrug ca. $\Phi = 0,5$.

Die Strahlungsempfänger wurden von Strahlung getroffen, die ihren Ausgangspunkt in den Wänden der Modellbrandräume, in der Glut der brennenden Krippe, in den leuchtenden und auch nicht leuchtenden Teilen der heißen Gase usw. hatten. Gemessen wird also eine außerordentlich komplizierte Strahlungssumme. Eine einfache Zuordnung der Bestrahlungsstärke zu der Temperatur an einem Punkt ist daher nicht zu erwarten. Als typisches Ergebnis einer Strahlungsmessung ist deshalb nur das des Versuches VIII in Bild 20 dargestellt. Zum Vergleich ist die mittlere Raumtemperatur des unteren Brandraumes und die Maximaltemperatur in der oberen Fensterfläche angegeben. Man erkennt einen gewissen Gleichlauf der Kurven für die mittlere Temperatur des Brandraumes mit der Bestrahlungsstärke eines Empfängers vor dessen Fenster. Eine weitergehende Interpretation der Ergebnisse soll hier nicht versucht werden.

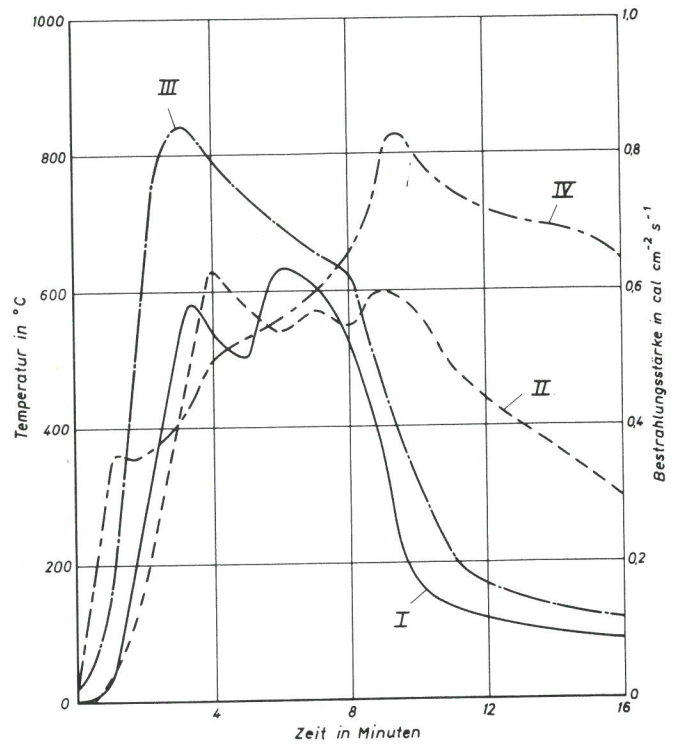


Bild 20
Strahlungsmessung beim Versuch VIII b
I Bestrahlungsstärke Radiometer oben
II Bestrahlungsstärke Radiometer unten
III max. Temperatur Fenster oben
IV mittl. Temperatur Brandraum unten

3.1.3. Versuchsergebnisse bei Versuchen mit Brandlasten in beiden Brandräumen

Es wurden 4 Versuche mit Krippen und Brandraumabmessungen entsprechend Typ V ausgeführt, um den „Stockwerkeffekt“ beim Abbrennen von Holz in zwei übereinanderliegenden Stockwerken eines Modellhauses zu untersuchen (Versuchsbezeichnungen S V a bis d).

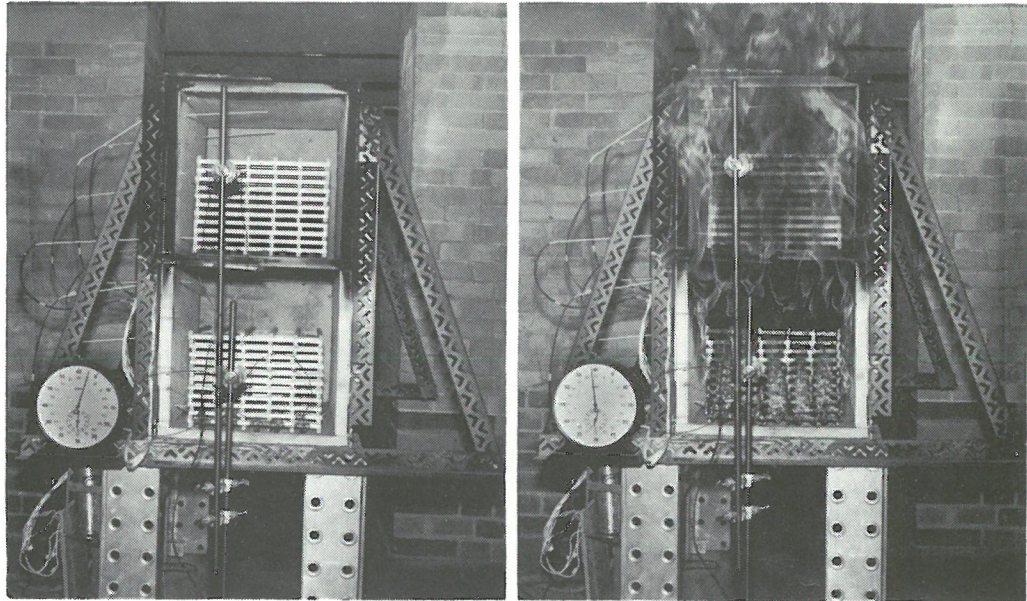
Verschiedene Phasen eines solchen Versuches zeigt Bild 21. Die gleichzeitig gemessenen Temperaturen in der Mittelebene des Modellhauses sind in Bild 22 zusammengefaßt.

Eine Analyse der Meßergebnisse zeigt, daß das Brandgeschehen im unteren Brandraum und in dessen Fensterfläche durch den Brand im oberen Stockwerk überhaupt nicht beeinflusst wird. Es gelten also alle Angaben des Abschnittes 3.1.2.

Die Temperaturen im oberen Brandraum und dessen Fensterfläche wurden durch die auffällige Zeitabhängigkeit der Abbrenngeschwindigkeit der oberen Krippe bestimmt. In den ersten 10 Versuchsminuten war diese außerordentlich klein, weil die nötige Verbrennungsluft fehlte (beim Versuch S V a wurden beide Krippen gleichzeitig gezündet, die obere verlösch jedoch bereits nach ca. 20 s wieder). Die Temperatur des oberen Brandraumes stimmte deshalb bis ca. zur 7. Minute mit der des Versuches V (vgl. Bild 17) praktisch überein.

Erst nach weitgehendem Verlöschen des Feuers im unteren Raum stieg die Abbrenngeschwindigkeit oben erheblich an (Bild 22). Es bildeten sich dadurch allmählich die Verhältnisse eines Brandes in nur einem Geschoß heraus. Dies ist gut an der Temperaturverteilung vor dem oberen Fenster in Bild 22 e zu erkennen.

Bild 21
Ablauf des Brandversuches S V b



a nach 1 : 03 min

b nach 2 : 59 min

Bild 22
Temperaturen in der Mittelebene
des Brandhauses beim Versuch

S V b

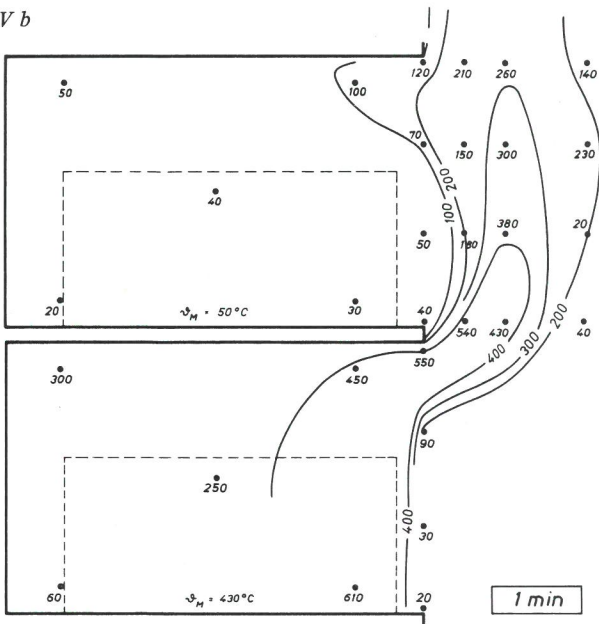


Bild 22 d

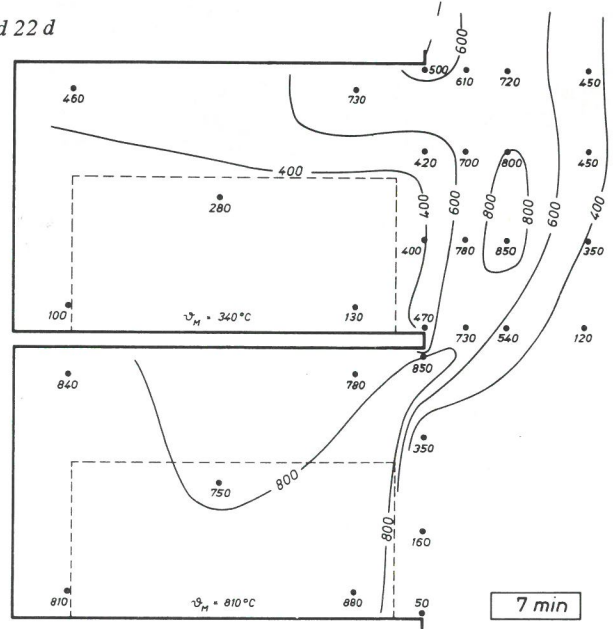


Bild 22 c

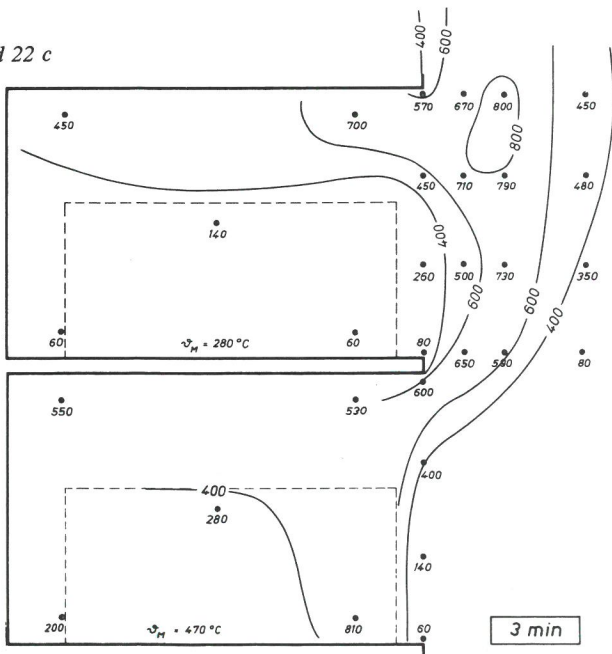
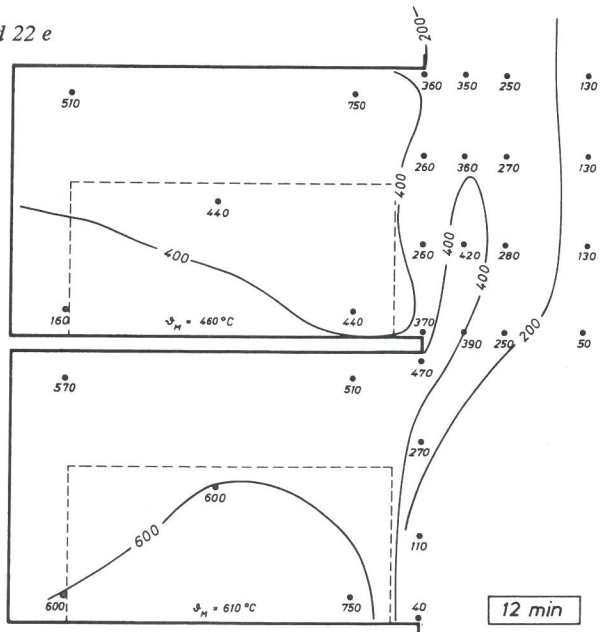
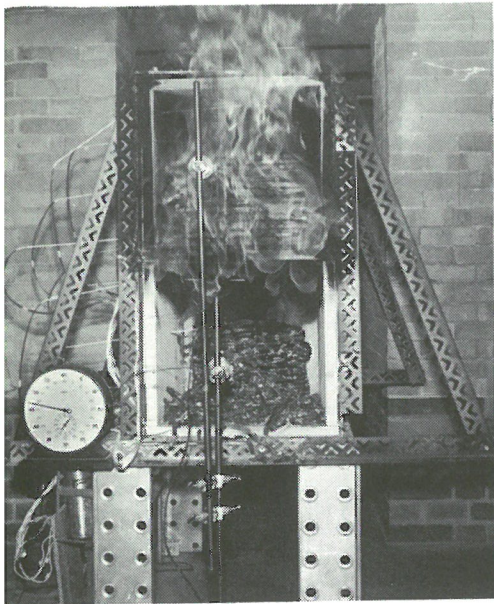
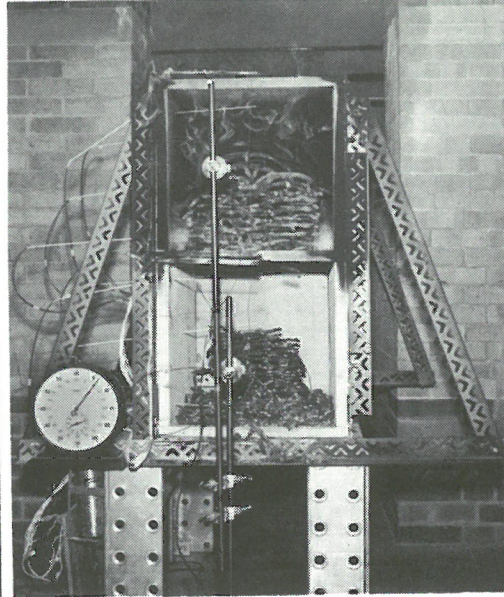


Bild 22 e

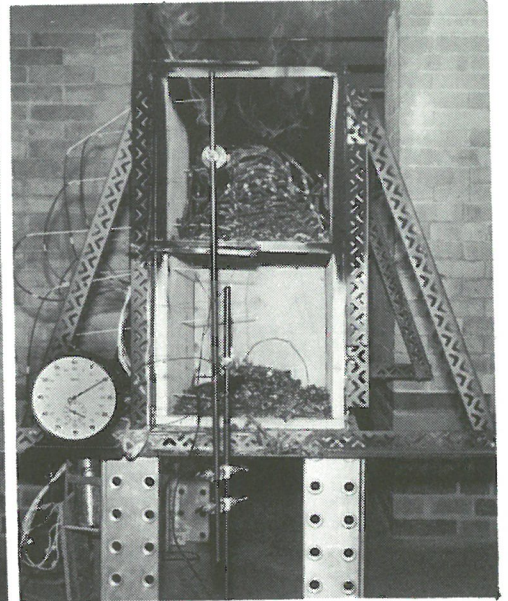




c nach 6 : 47 min



d nach 12 : 06 min



e nach 19 : 10 min

Bild 22 f

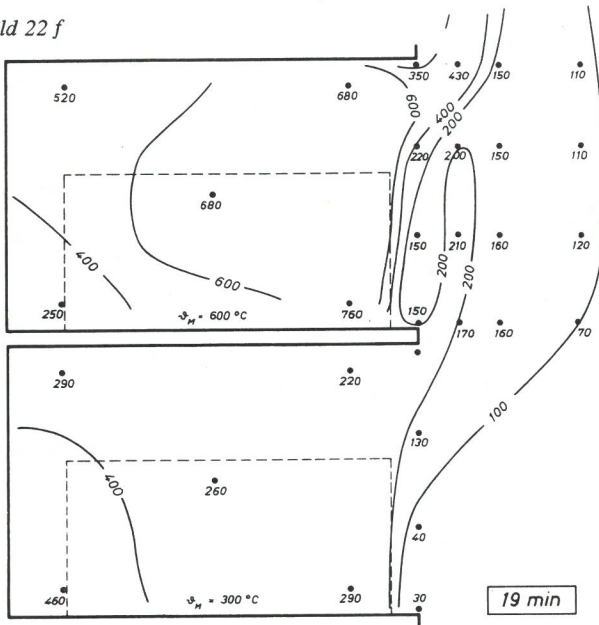
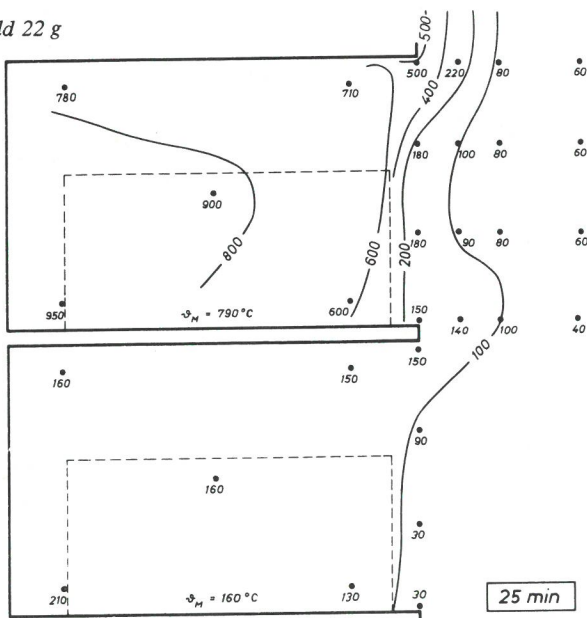


Bild 22 g



Die hierbei zum Ausdruck kommende zeitliche Trennung zweier Brandabschnitte demonstriert auch *Bild 23*. Die Temperatur in der oberen Fensterfläche verhält sich zunächst wie in Abschnitt 3.1.2.3 beschrieben. Um die 10. Versuchsminute herum bildet sich ein deutlicher Übergang aus. Erst nach weitgehendem Verlöschen des Feuers im unteren Brandraum steigt die Temperatur in der oberen Fensterfläche wieder an.

Bild 24 zeigt das Brandgeschehen in der 7. Versuchsminute in einer Schrägansicht.

3.2. Zweite Versuchsreihe

Die erste Versuchsreihe, über die im Abschnitt 3.1 berichtet wurde, sieht eine Reihe von Fragen offen:

- In welcher Weise werden Flammenform und -höhe vor der Fassade des Modellhauses durch die Geometrie, d. h. durch das Verhältnis von Fensterbreite und -höhe beeinflusst?
- In welchem Umfang ist die Annahme berechtigt, daß die Abbrenngeschwindigkeit der Krippe allein durch die Lüftung beschränkt wird? (In der ersten Versuchsreihe wurde beobachtet, daß Flammenhöhe und Brenndauer auch von der Konstruktion der eingelegten Krippe abhängig waren.)
- Welche Temperaturen treten vor der Fassade am Rand bzw. außerhalb der Fensteröffnungen auf? Wie wirken zwei nebeneinanderliegende Fenster? (In der ersten Versuchsreihe wurden vor allen Dingen die Temperaturen in der Mittelebene des Fensters beobachtet.)

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine zweite Versuchsreihe ausgeführt.

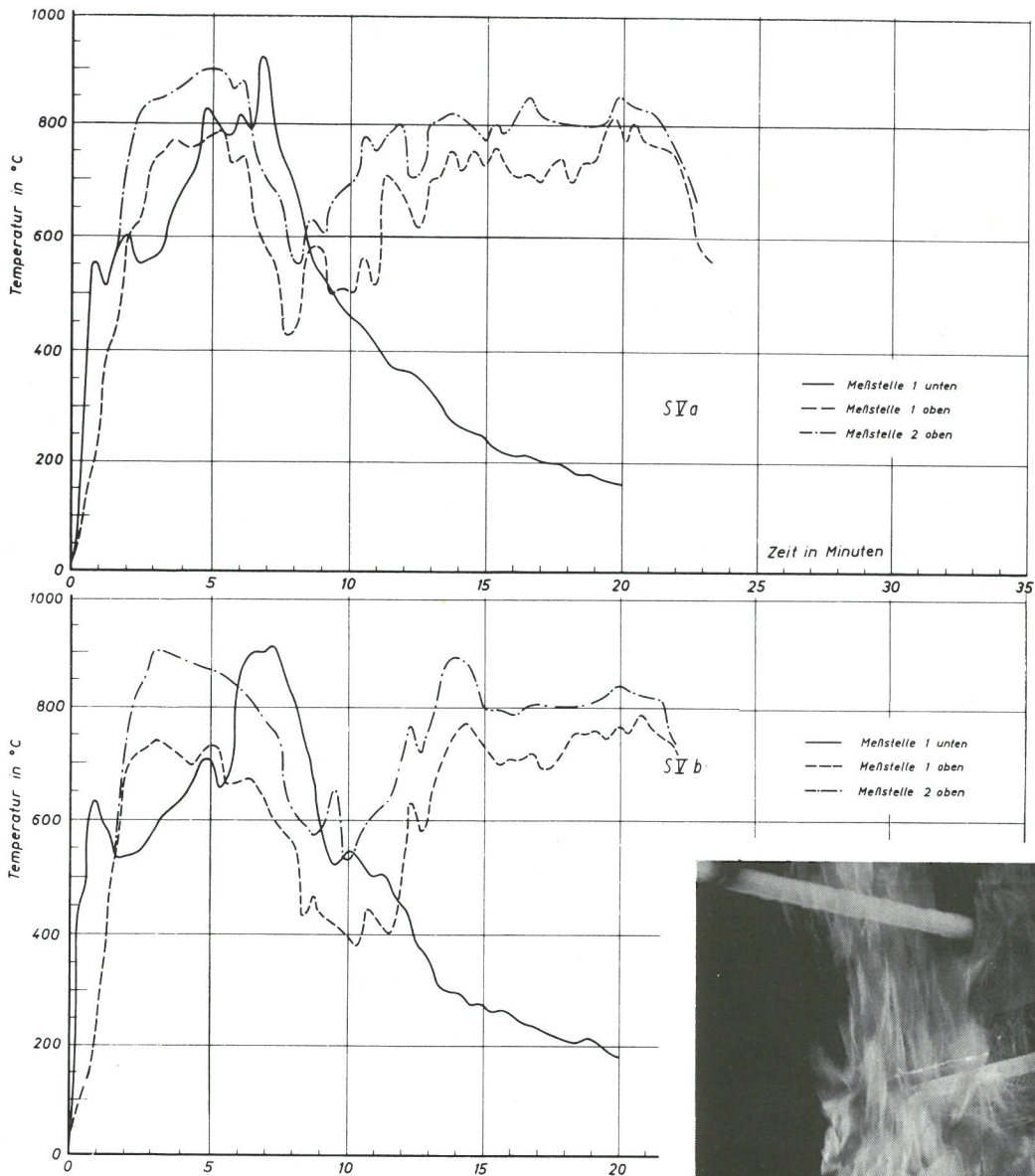


Bild 23
Vergleich der Temperaturen des unteren und oberen Fensters bei Versuch S V

3.2.1. Versuchsanordnung

3.2.1.1. Brandhaus

Die bei der zweiten Versuchsreihe benutzte Versuchsanordnung ist in den Bildern 25 und 26 in Front- und Seitenansicht dargestellt. Der Brandraum (1) wird von 15 mm dicken Asbestzementplatten begrenzt. Die Breite der Fensterfläche kann durch seitliche Asbestzementstreifen (nicht dargestellt) verändert werden. Das Modellbrandhaus hängt an einem Ende eines Waagebalkens (5), so daß Gewichtsveränderungen als Folge des Krippenabbrandes mit Hilfe einer Kraftmeßdose (6) gemessen werden können. Jeweils 24 Mantelthermoelemente mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm sind zu einer Meßebeine senkrecht zu der Fensterfläche zusammengefaßt. 4 derartiger Meßebenen sind mit Hilfe einer teleskopartigen Halterung (3) seitlich verschiebbar. Der in den Bildern 25 und 26 erkennbare Brandraum mit Abmessungen von 0,6 m Tiefe, 0,6 m Breite und 0,4 m Höhe konnte gegen zwei gleiche gegenseitig verschiebbare Brandräume mit Abmessungen von 0,6 m Tiefe, 0,3 m Breite,

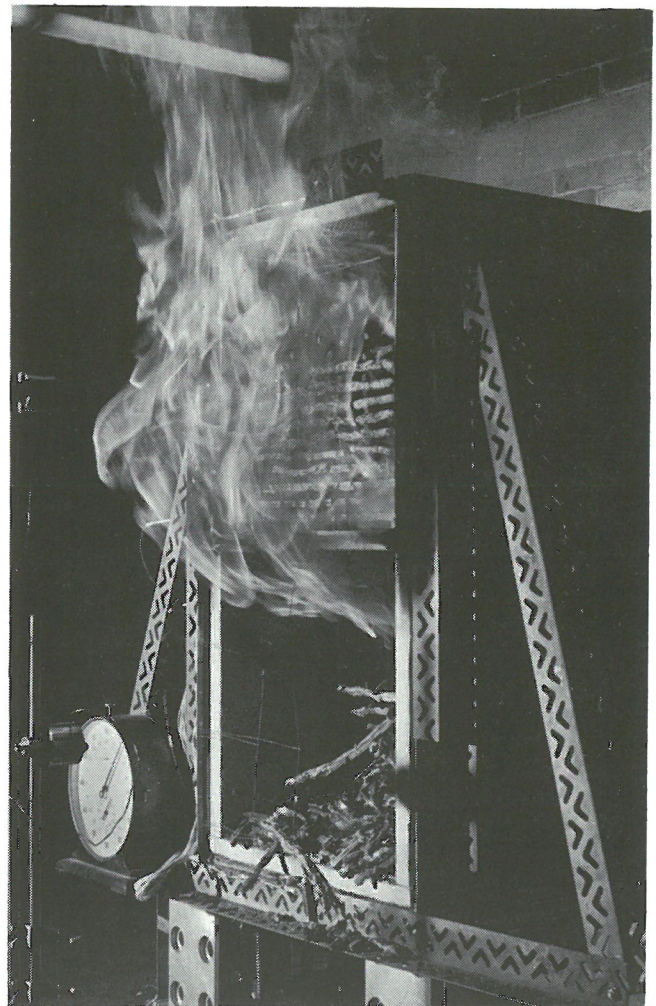


Bild 24
Brandversuch S V b in der 7. Versuchsminute

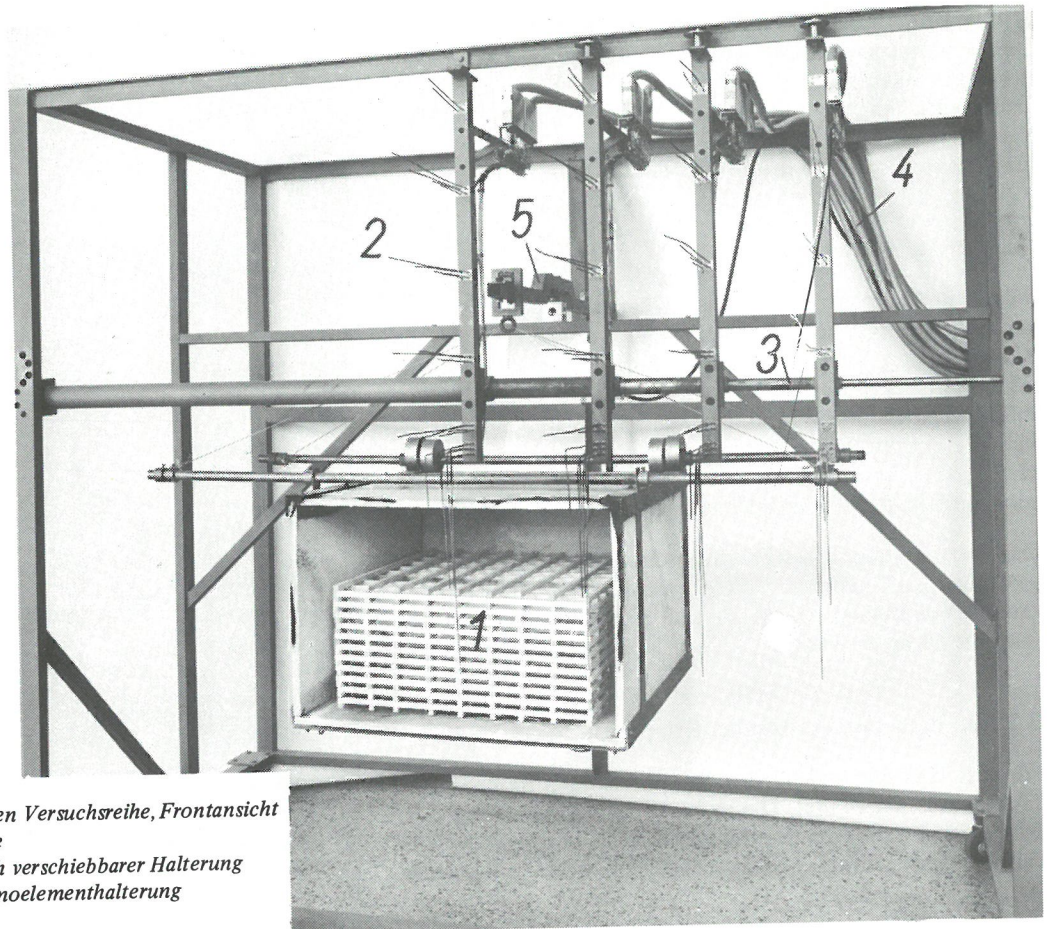


Bild 25
 Versuchsanordnung der zweiten Versuchsreihe, Frontansicht
 1 Brandraum mit Holzkrippe
 2 Thermoelemente in seitlich verschiebbarer Halterung
 3 Teleskopführung für Thermoelementhalterung
 4 Meßleitungen
 5 Waagebalken

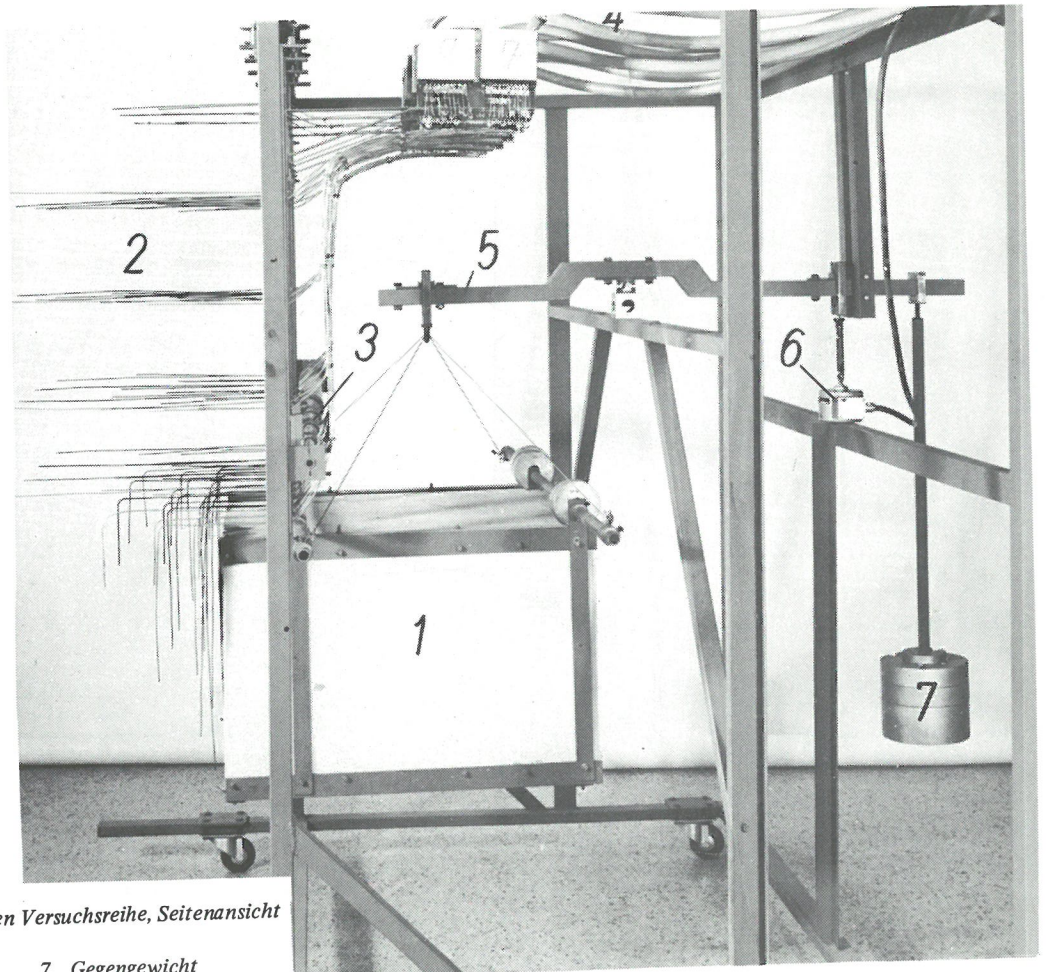


Bild 26
 Versuchsanordnung der zweiten Versuchsreihe, Seitenansicht
 1 bis 5 vgl. Bild 25
 6 Kraftmeßdose
 7 Gegengewicht

0,4 m Höhe ausgetauscht werden. Auf diese Weise konnte das Brandgeschehen vor zwei nebeneinanderliegenden Fenstern (nebeneinanderliegenden Brandräumen) unterschiedlichen seitlichen Abstandes studiert werden. Die Versuchseinrichtung war an der gleichen Stelle, an der die erste Versuchsreihe ausgeführt wurde, aufgestellt.

3.2.1.2. Meßeinrichtungen

Wegen der beschränkten Registrierkapazität der verwendeten Schreibgeräte, Kompensationspunktdrucker für jeweils 12 Meßstellen, wurden lediglich Temperaturen vor dem Modellbrandhaus gemessen. Verwendet wurden Chromell-Alumel-Thermoelemente in einem Mantel aus Inconell mit einem Gesamtdurchmesser von 1,6 mm. Sie erwiesen sich als ausreichend steif, um von der in Bild 26 erkennbaren Thermoelementhalterung ausreichend geführt zu werden.

Zur Bestimmung der Abbrenngeschwindigkeit wurde eine Hottinger-Kraftmeßdose (diese enthält Dehnungmeßstreifen in Vollbrückenschaltung) mit einem Meßbereich von 0 kp bis 10 kp verwendet.

3.2.1.3. Brandlast, Aufbau der Krippen

Wie schon in der ersten Versuchsreihe wurden Krippen aus Fichtenholz verwendet. Die auf die Grundfläche bezogenen Brandlasten (also die Brandbelastungen) betragen jeweils ca. 15 kg/m^2 . Einige Angaben über die Brandlast enthält Tafel 5.

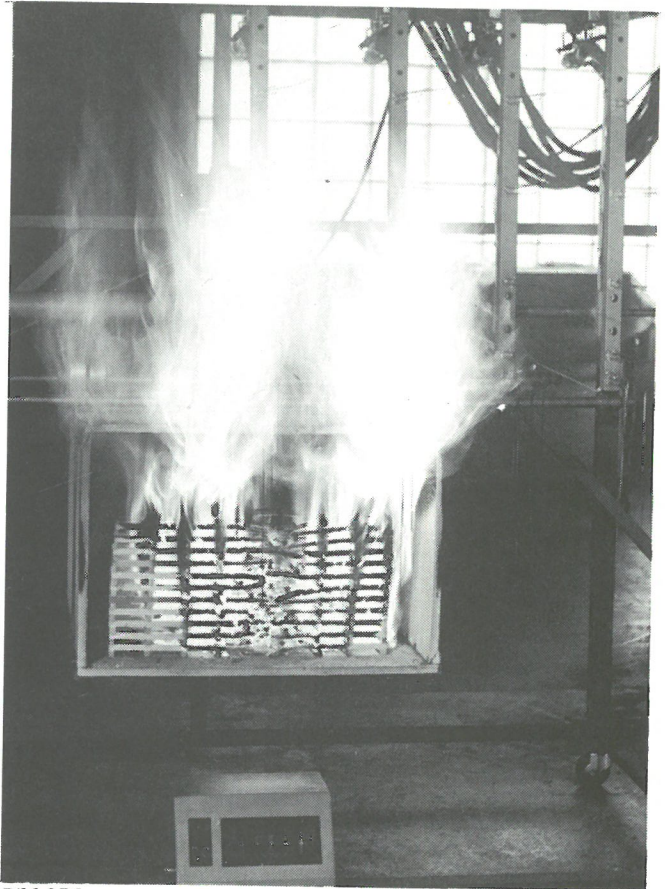


Bild 27 b
Versuch im größeren Brandraum der zweiten Versuchsreihe ($0,6 \times 0,6 \times 0,4 \text{ m}^3$)
4 : 05 min nach der Zündung

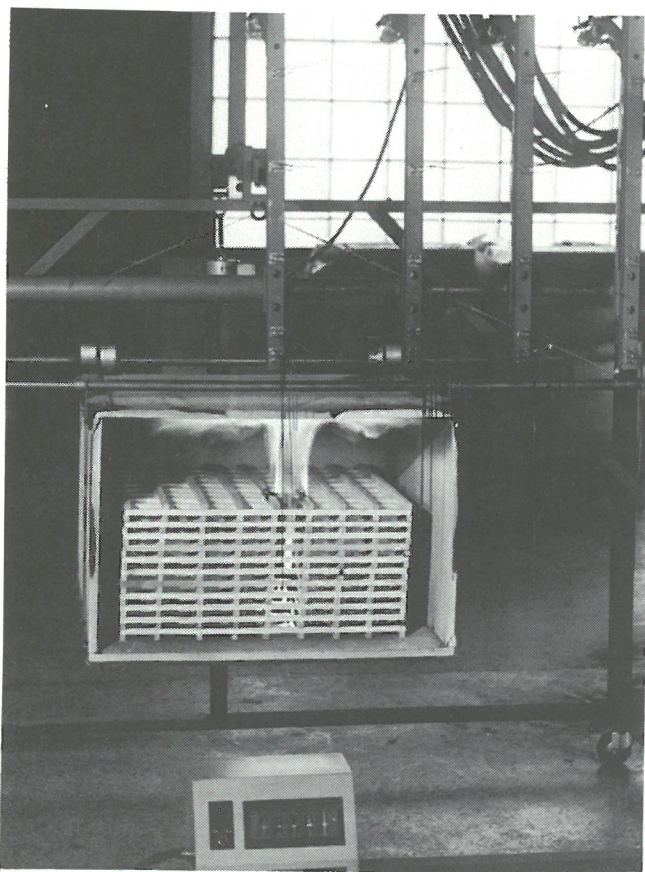


Bild 27 a
Versuch im größeren Brandraum der zweiten Versuchsreihe ($0,6 \times 0,6 \times 0,4 \text{ m}^3$)
1 : 18 min nach der Zündung

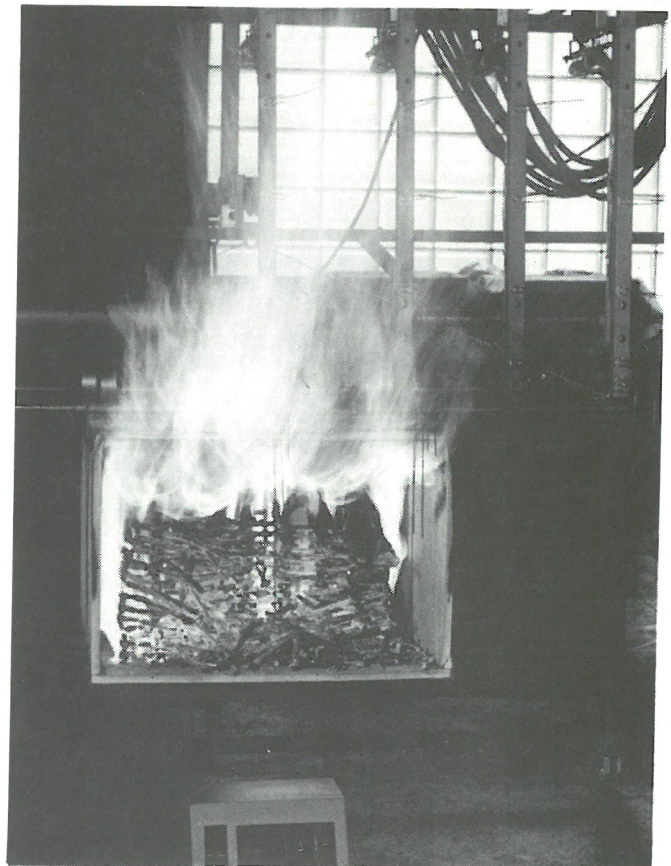


Bild 27 c
Versuch im größeren Brandraum der zweiten Versuchsreihe ($0,6 \times 0,6 \times 0,4 \text{ m}^3$)
6 : 18 min nach der Zündung

Tafel 5
Aufbau der Krippen

	Brandraum 60 x 60 x 40 cm ³	2 Brandräume je 60 x 30 x 40 cm ³
Krippengrundfläche	50 x 50 cm ²	50 x 25 cm ²
Holzquerschnitt	1 x 1 cm ²	1 x 1 cm ²
Zahl der Holzlagen	23	20
Anzahl der Stäbe in der		
1, 3, 5 ... Lage	9	5
2, 4, 6 ... Lage	9	9
Krippengewicht Mittelwert	5,4 kg	2,5 kg

Die Krippen wurden mit Hilfe einer kleinen Gasflamme (Brenndauer 30 Sekunden), die nahe dem Mittelpunkt der Krippengrundfläche einwirkte, gezündet. Auf diese Weise konnte die als Folge des Abbrandes der mit Brennspritus getränkten Streifen beobachtete Temperaturspitze vermieden werden.

3.2.2. Versuchsergebnisse im 0,6 x 0,6 x 0,4 m³-Brandraum

3.2.2.1. Visuelle Beobachtungen über den Brandverlauf

In Bild 27 sind drei Phasen eines Brandversuches in dem 0,6 m x 0,6 m x 0,4 m großen Brandraum beispielhaft dargestellt. 78 Sekunden nach Beginn der Zündung (Bild 27 a) hatte sich ein deutlicher „Flammenpilz“ unter der Brandraumdecke gebildet, der durch Wärmestrahlung die oberen Bereiche der Holzkrippe vorwärmte. Vom Zündkegel seitlich und als Folge der Wärmestrahlung von oben fortschreitend wurde die Krippe innerhalb von 4 Minuten vollständig gezündet (Bild 27 b). Das Brandgeschehen vor der Fassade blieb dann anschließend für die Dauer von ca. 4 Minuten stationär.

3.2.2.2. Abbrenngeschwindigkeit

Die relative Abnahme der Brandbelastung des Modellbrandraumes – dies ist gleichzeitig der relative Masseverlust – ist als Funktion der Zeit in Bild 28 dargestellt. Parameter dieser Darstellung ist die Art der Luftzufuhr. Wie die Darstellung zeigt, ist die Abbrenngeschwindigkeit – das ist der Anstieg der Kurve – zwischen den Brandbelastungen 0,8 q und 0,2 q nahezu konstant. Die stationären Werte für die Abbrenngeschwindigkeit sind in Tafel 6 angegeben und mit den aus Bild 3 berechenbaren theoretischen Werten verglichen.

Tafel 6

Zwischen $q(t)/q = 0,8$ und $q(t)/q = 0,2$ gemessene mittlere Abbrenngeschwindigkeit \dot{Q} bei den Modellbrandversuchen im 0,6 x 0,6 x 0,4 m³-Brandraum (vgl. Bild 28 und Tafel 5)
Zum Vergleich: theoretische Werte gemäß Bild 3

Fenstergeometrie	\dot{Q} kg/min	$6 A_F \sqrt{h}$ kg/min
0,6 x 0,4	0,72	0,90
0,4 x 0,4	0,64	0,60
0,2 x 0,4	0,43	0,30
im Freien	1,50 ^{*)}	—

*) Nach [44] berechnete Schätzwerte ergeben sich noch höhere Werte

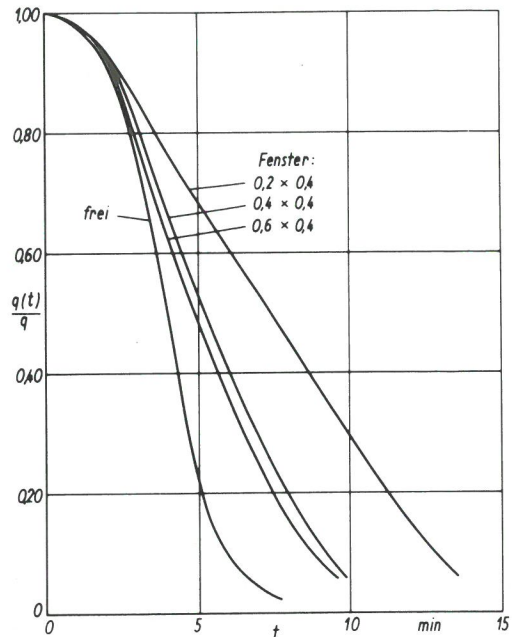


Bild 28

Auf den Anfangswert bezogene Restbrandbelastung $q(t)$ als Funktion der Zeit t für Versuche bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen im 0,6 x 0,6 x 0,4 m³-Brandraum

Die Tafel zeigt:

1. Trotz ausreichend großer Abbrenngeschwindigkeit der Krippe im Freien wird bei dem größten Fenster die theoretisch mögliche Abbrenngeschwindigkeit nicht erreicht. Es muß angenommen werden, daß die im Verhältnis zur Fensterfläche große Krippe der einströmenden Luft teilweise den Weg verstellt.
2. Die Versuche mit kleineren Fenstern zeigen größere als theoretisch zu erwartende Abbrenngeschwindigkeiten. Durch den sehr intensiven Wärmestau im Brandraum dürfte hier ein besonders großer Anteil der durch Pyrolyse freigesetzten brennbaren Gase unverbrannt entweichen.

3.2.2.3. Temperaturen außerhalb des Brandraumes

Durch Wiederholung der Brandversuche mit jeweils unterschiedlichen Stellungen der Meßebenen konnte das Temperaturfeld vor, neben und oberhalb des bzw. der Fenster des Brandraumes schrittweise vermessen werden. Die Untersuchungen hatten auszugsweise folgende Ergebnisse:

Die örtliche Temperaturverteilung in der Mittelebene des Brandraumfensters ist analog Bild 18 in Bild 29 a dargestellt. Ein Vergleich beider Darstellungen zeigt zunächst der Höhe nach ähnliche Temperaturwerte. Die örtliche Temperaturverteilung weist jedoch charakteristische Unterschiede auf. Bild 29 a zeigt einen deutlich geneigten Bereich mit Temperaturen oberhalb von 600°C. Die Flammen besitzen damit – und dies wird durch alle Beobachtungen bestätigt – eine deutliche Horizontalkomponente. Die Versuche an dem zweigeschossigen Modellbrandhaus der ersten Versuchsreihe ließen dagegen eine überwiegend vertikal vor der Fassade aufsteigende Flammensäule erkennen. Hier liegt also ein deutlicher Einfluß des offenen Fensters des Obergeschosses vor. Dieses Fenster sorgte aufgrund der örtlichen Strömungsbedingungen offensichtlich gleichfalls für einen Wärmestau, so daß gerade vor dem oberen Fenster überraschend hohe Temperaturen beobachtet wurden.

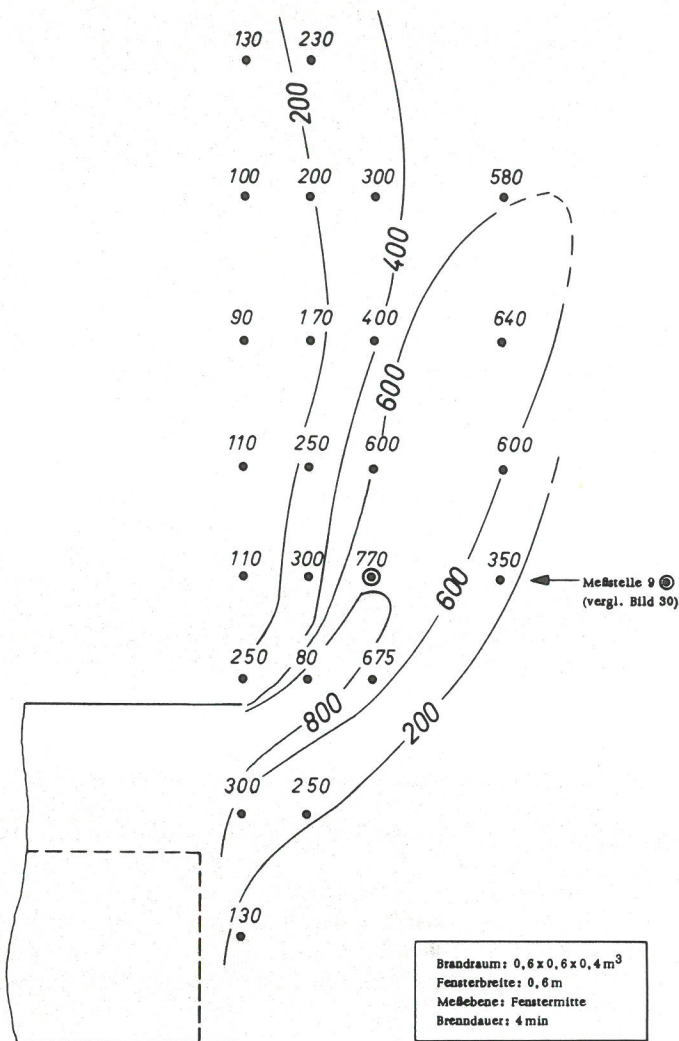


Bild 29 a
 Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$ in einer vertikalen Ebene senkrecht zur Fensterfläche

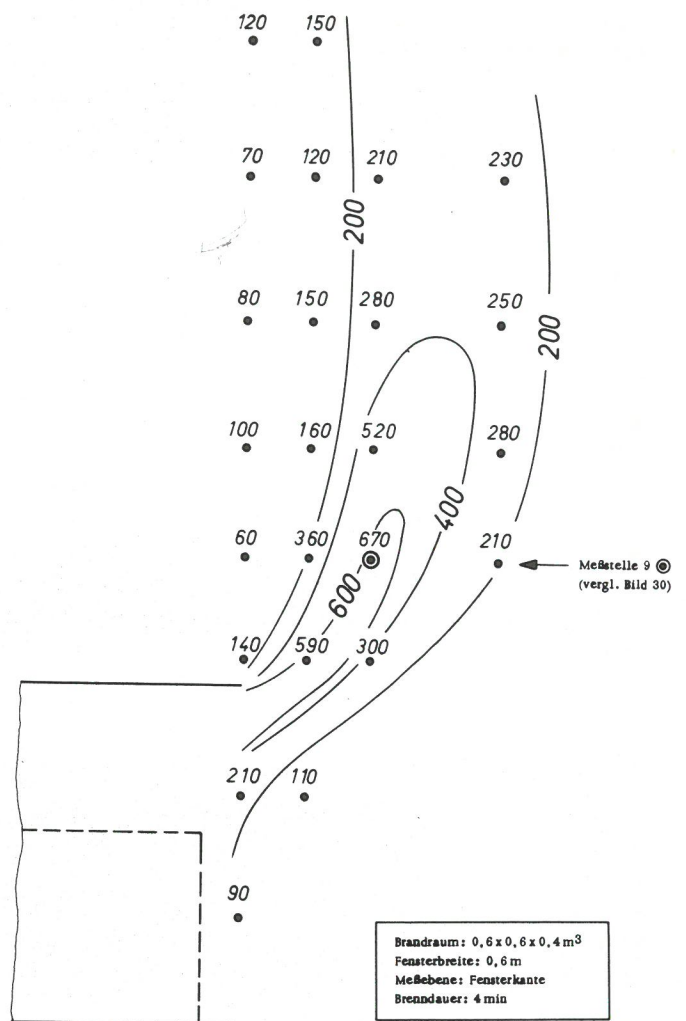


Bild 29 b
 Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$ in einer vertikalen Ebene senkrecht zur Fensterfläche

Die Temperaturen in der Mittelebene der 40 cm bzw. 20 cm breiten Fenster entsprachen dem in Bild 29 a Gezeigten. Aufgrund der, gemessen an der Fensterfläche, größeren Abrenngeschwindigkeit hatte der durch die 600°C -Isotherme eingeschlossene Bereich eine etwas größere Ausdehnung. Dies wird durch Beobachtungen der aus dem Brandraumfenster herausschlagenden Flammen bestätigt.

Die Meßebenen ließen sich, wie im Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben, senkrecht zu der in Bild 29 a dargestellten Ebene verschieben. Auf diese Weise konnte bei wiederholten Versuchen das Temperaturfeld lückenlos vermessen werden. Bild 29 b zeigt beispielhaft die örtliche Temperaturverteilung vor der Fensterkante. Die eingezeichneten Isothermen haben gleiche Form wie die in Bild 29 a dargestellten. Die Temperaturen im Kern der Heißgassäule liegen jedoch teilweise mehr als 200°C niedriger.

Bei den Brandversuchen mit verkleinertem Fenster wurde beobachtet, daß die Unterschiede zwischen den Temperaturen in der Mittelebene des Fensters gegenüber denen nahe der Fensterkante größere Zahlenwerte aufwiesen. Während die Flammen bei voller Fensteröffnung (Fensterbreite 60 cm) eine Horizontalkomponente lediglich senkrecht zur Fensterfläche erhielten, muß bei teilweise verschlossener Frontfläche des Brandraumes zusätzlich eine Horizontal-

komponente in Richtung des Fensters angenommen werden. Die Heißgase konzentrieren sich daher nahe der Mittelebene des Fensters. Der Heißgaskegel erhält auf diese Weise eine Form wie derjenige aus einem scheinbar schmaleren Brandraum.

Die Ortsabhängigkeiten der Temperaturen senkrecht zu der in Bild 29 dargestellten Ebene werden beispielhaft für diejenige Gerade, die durch die in Bild 29 gesondert gekennzeichnete Meßstelle 9 läuft, in Bild 30 untersucht. Das Diagramm enthält Meßwerte für die mit unterschiedlicher Fensterbreite ausgeführten Versuche zum Zeitpunkt $t = 4,0 \text{ min}$. Man erkennt, daß bei Versuchen mit voller Fensterbreite (60 cm , Symbol (x)) die Flammen bis unmittelbar an die Seitenwand des Brandraumes heranreichen. Erst außerhalb der Wand fallen die Temperaturen stark ab. In einer ca. 15 cm außerhalb der Fensterkante gelegenen Ebene sind die Temperaturen unter die Zündtemperaturen normalentflammbarer Baustoffe gesunken.

Die durch seitliche Fassadenteile verkleinerten Fenster wirken auf der durch die Meßstelle 9 gekennzeichneten Linie wie gegenüber ihrer wahren Geometrie zusätzlich verkleinerte Fenster. Dies ist eine Folge der oben beschriebenen zusätzlichen Horizontalkomponente der ausströmenden heißen Gase. Dieser Effekt wird besonders deutlich für die Versu-

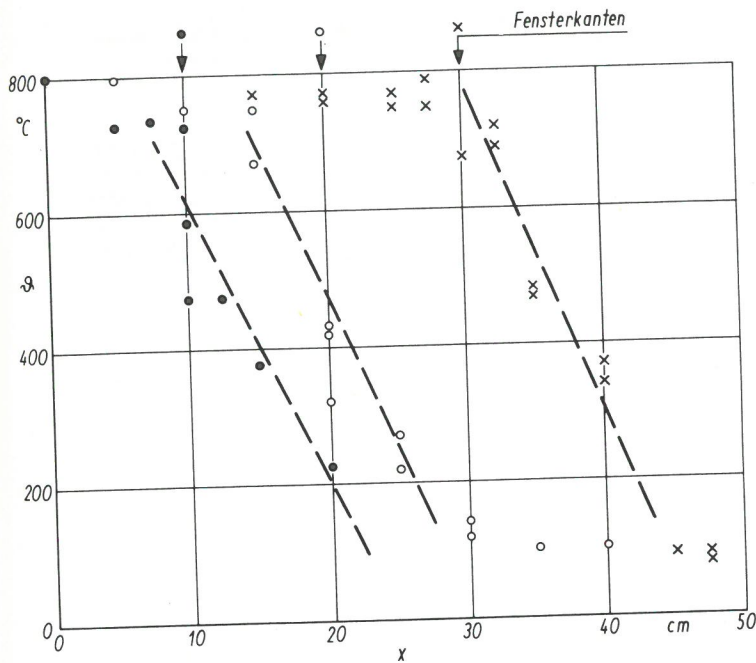


Bild 30
 Temperaturen ϑ der in Bild 29 gekennzeichneten Meßstellen 9 als Funktion des Ortes x (Abstand von der Mittelebene der Fenster) nach einer Versuchsdauer von 4,0 min
 Brandraum: $0,6 \times 0,6 \times 0,4 \text{ m}^3$

Fenster	Fensterkante	Symbol
$0,6 \times 0,4 \text{ m}^2$	$x = 30$	x
$0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$	$x = 20$	o
$0,2 \times 0,4 \text{ m}^2$	$x = 10$	•

Eine Meßebeane verblieb jeweils bei $x = 0$. Alle anderen Meßwerte wurden bei mehrfach mit unterschiedlichen Stellungen der Meßebenen wiederholten Brandversuchen gewonnen.

che bei einer Fensterbreite von 40 cm (Symbol (o)). Bei diesen Versuchen werden nach 4 min, dem Zeitpunkt der Darstellung, im Brandraum bereits höhere Temperaturen erreicht als bei den anderen Versuchen.

Deshalb besitzen zu diesem Zeitpunkt die ausströmenden Gase bereits eine größere Horizontalkomponente der Geschwindigkeit als bei den Versuchen mit nur 20 cm breitem Fenster. Die in Bild 30 zusätzlich eingezeichneten Kurven sind also in ihrer relativen Lage nicht vergleichbar.

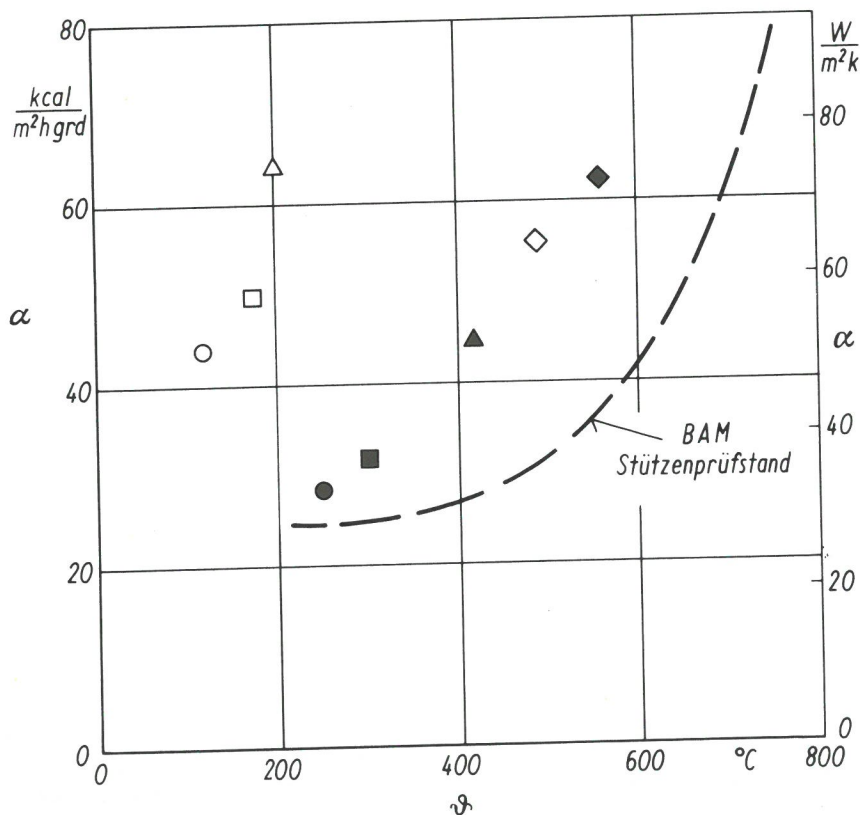
Bemerkenswert erscheint die Tatsache, daß der Temperaturgradient in Richtung der durch die Meßstelle 9 festgelegten Geraden nahezu unabhängig von der Breite des Brandraums zu sein scheint. Die in Bild 30 dargestellten Kurven haben näherungsweise den gleichen Anstieg.

3.2.2.4. Wärmeübergang außerhalb des Brandraumes

Die Temperaturänderung in einem Bauteil, z. B. einer Außenstütze während des Brandes wird durch den aus den heißen Gasen auf die Oberflächen des Bauteils übergehenden Wärmestrom bestimmt. Dieser ist proportional der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der heißen Gase und der Oberflächentemperatur des Bauteils. Proportionalitätsfaktor ist die Wärmeübergangszahl α . Sie kennzeichnet die Wärmeübertragung zwischen der Oberfläche eines Bauteils und der angrenzenden Luft unter der Wirkung von Wärmeleitung, Wärmemitführung und Wärmestrahlung.

Bild 31

Als Rechengröße nach [45] berechnete Wärmeübergangszahl α als Funktion der Gastemperatur ϑ
 Zum Vergleich: Wärmeübergangszahl im Stützenprüfstand der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin Dahlem
 Die Lage der Meßstellen in der Mittelebene des Fensters und die verwendeten Symbole sind aus dem rechten Teilbild ersichtlich



Lage der Meßstellen, maßstäblich, Punktsymbole

- • • • •
- o • • • • •
- □ • • • • •
- △ • • • • •
- ◇ • • • • •
- • • • •

Brandraum m. Krippe

Nach dem Ausmessen des Temperaturfeldes vor dem bzw. den Brandraumfenstern besteht die Aufgabe – wenigstens näherungsweise – die Wärmeübergangszahl zu messen. Aus Mangel an geeigneten Meßgeräten wurde ein bei unbedeckten Stahlstützen erprobtes Meß- und Auswerteverfahren hier eingesetzt [45]: Kennzeichnend für dieses Verfahren ist, daß es nicht auf die weitgehend unbekanntenen Kennwerte des Stahls sowie des Brandraumes und der Beflammung angewiesen ist, sondern eine Rechengröße α' in einer sogenannten Hinrechnung aus einem vorliegenden Brandversuch ermittelt. Mit Hilfe der so ermittelten Rechengröße kann die Erwärmung und damit die Feuerwiderstandsdauer unbedeckter Stahlstützen in auch von der Normkurve abweichenden Feuerbeanspruchungen in einer mit Extrapolation bezeichneten Rechnung bestimmt werden. Sowohl Hinrechnung als auch Extrapolation gehen dabei von der Gleichung aus

$$\frac{d\vartheta_{St}}{dt} = \alpha' \frac{1}{c_{St}\rho_{St}} \cdot \frac{U}{F} (\vartheta - \vartheta_{St}) \quad (16)$$

Die Verfasser hatten in [45] festgestellt, daß die bei der Auswertung von Stützenversuchen zu erhaltende Rechengröße α' mit der Wärmeübergangszahl α gut übereinstimmt.

Die Wärmeübergangszahl vor den Fenstern des Modellbrandhauses wurde hier durch Auswertung von Erwärmungskurven einer Modellstütze, hier ein Vierkantstahl von 30 mm Kantenlänge, mit Hilfe des Rechenverfahrens bestimmt. Die Ergebnisse sind für einige ausgewählte Orte für den Zeitpunkt $t = 4,0$ min in *Bild 31* dargestellt und mit der Wärmeübergangszahl, gemessen im Stützenprüfstand der Bundesanstalt für Materialprüfung, verglichen.

Trotz der nur näherungsweise zu bestimmenden Wärmeübergangszahlen kann aus *Bild 31* gefolgert werden, daß die Wärmeübergangszahl in dem untersuchten räumlichen Bereich größer als die im Innern eines allseitig geschlossenen Bauteilprüfstandes nach DIN 4102 mit gleicher Brandraumtemperatur ist. Offensichtlich wird ein wesentlich größerer Anteil durch Wärmestrahlung vom Brandraumfenster her oder aus den Flammen übertragen. Dies gilt vor allem für diejenigen Stützenbereiche, die außerhalb der Flammensäule im Bereich bereits abgekühlter Gase sich befinden.

Wie bereits in anderem Zusammenhang in Abschn. 1.3.3 angegeben, kann auch ein Vergleich zwischen der Bauteilbeanspruchung vor der Fassade beim Schadenfeuer und beim Brandversuch nach DIN 4102 in einem der üblichen Bauteilprüfstände vorgenommen werden. (Ein derartiger Vergleich hat vor allem seine Bedeutung für den Entwurf geeigneter Prüfverfahren für Außenstützen (vgl. Abschn. 4.3).)

Es soll daher sehr grob diejenige Brandraumtemperatur eines Stützenprüfstandes für Innenstützen abgeschätzt werden, die (auf alle Oberflächen der Stütze gleichmäßig einwirkend) die gleiche Stützerwärmung liefern würde, wie sie vor der Fassade unter dem Einfluß von heißen Gasen und der Wärmestrahlung beobachtet wird.

In *Tafel 7* sind die Ergebnisse der Abschätzung für die in *Bild 31* angegebenen Orte zusammengefaßt. Sie läßt erkennen, daß der Wärmestrahlungsanteil, der von der Flammensäule und/oder dem Brandraumfenster ausgeht, im Stützenprüfstand durch eine gegenüber der am Modell gemessenen Gastemperatur erhöhten Brandraumtemperatur ausgeglichen werden muß. Die Differenz $\vartheta_{Br} - \vartheta$ zwischen Brandraumtemperatur ϑ_{Br} und im Modell gemessener Gastemperatur ϑ

wird örtlich in dem Maße kleiner wie die Strahlung – ausgehend von Brandraumfenster und Flamme – abnimmt.

Tafel 7

*Näherungsweise Bestimmung der Brandraumtemperatur ϑ_{Br} in einem Innenstützenprüfstand, die zur gleichen Feuerbeanspruchung (hier Stahltemperaturänderungsgeschwindigkeit) führt, wie der Modellbrandversuch (Brenndauer $t = 4$ min); zum Vergleich örtliche Gastemperatur ϑ (Diese wurde durch die eingebaute Modellstütze teilweise gegenüber *Bild 29 a* verändert)*

Meßort nach <i>Bild 31</i>	ϑ_{Br} °C	ϑ °C
◇ *)	700	500
△	350	200
□	200	160
◆	800	580
▲	650	420
■	350	300
●	300	250

*) vgl. auch Angaben in Abschn. 1.3.3 für einen näherungsweise maßstäblichen Ort

Es sei angemerkt, daß diese quantitativen Angaben über die Ortsabhängigkeit nur richtig sind, wenn die aus dem Brandraumfenster herausschlagenden Flammen eine derart große horizontale Geschwindigkeitskomponente besitzen wie bei den Brandversuchen der zweiten Versuchsreihe.

Die Ergebnisse dieses Abschnittes deuten an, daß Bauteile, deren Oberflächen sich in Bereichen relativ niedriger Gastemperaturen befinden, trotzdem eine beachtliche Feuerbeanspruchung erleiden können.

3.2.3. Ergebnisse von Versuchen mit zwei nebeneinanderliegenden $0,3 \times 0,6 \times 0,4$ m³-Brandräumen

Vor allem mit dem Ziel, die Temperaturen zwischen zwei Fenstern näher zu untersuchen, wurden Versuche mit zwei nebeneinanderliegenden Brandräumen mit Abmessungen von jeweils $0,3$ m x $0,6$ m x $0,4$ m und einer Fensterfläche von $0,3 \times 0,4$ m² ausgeführt. Durch Verschieben der beiden Brandräume konnte bei gleichzeitiger Zündung beider Krippen der Abstand der Brandraumfenster systematisch variiert werden.

Die Gastemperaturen außerhalb der Brandräume erreichen auf der Symmetrie-Ebene zwischen beiden Fenstern ihr Minimum. Die dabei gemessenen Temperaturen sind in *Bild 32* für einige ausgezeichnete Fensterabstände zusammengefaßt. In Verbindung mit *Bild 33* erkennt man, daß die aus den Brandraumfenstern herausschlagenden Flammen bei nur geringem Fensterabstand (≤ 10 cm) deutlich miteinander verschmelzen. Bei größerem Abstand berühren sich zunächst die Flammen. Mit zunehmender Versuchsdauer, also zunehmenden Brandraumtemperaturen, also zunehmenden Heißgasgeschwindigkeiten, rücken die Flammenkegel beider Fenster jedoch auseinander. Beispielsweise erreicht die Abrennungsgeschwindigkeit im Innern der Brandräume nach ca. 4 Minuten ihren Maximalwert. Die Temperaturen in der Mittelebene der 30 cm auseinanderliegenden Fenster (*Bild 32 c*) überschreiten dagegen bereits nach 3 Minuten ihren Maximalwert.

Wie mit Blick auf *Bild 33* zu erwarten, werden die Maximaltemperaturen oberhalb der Verbindungslinie der Fensterstürze beobachtet. Bei Fenstern mit nur geringem Abstand

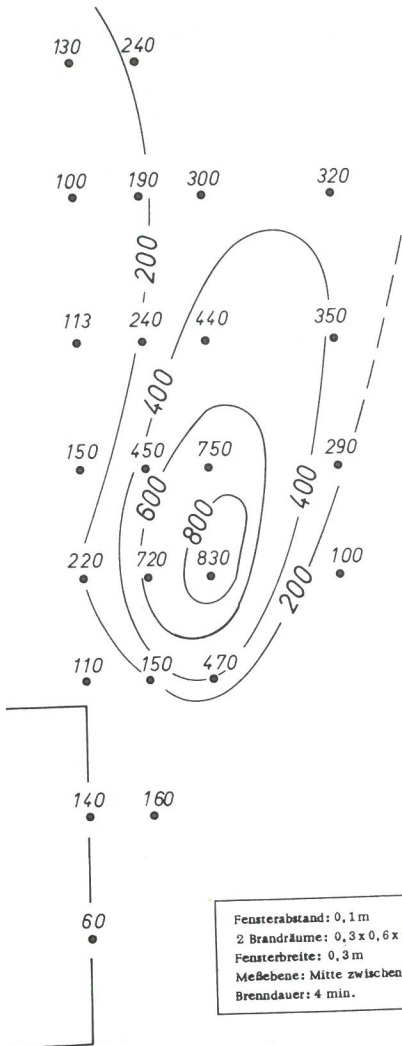


Bild 32 a
Temperaturen in der Mittelebene zwischen zwei Fenstern

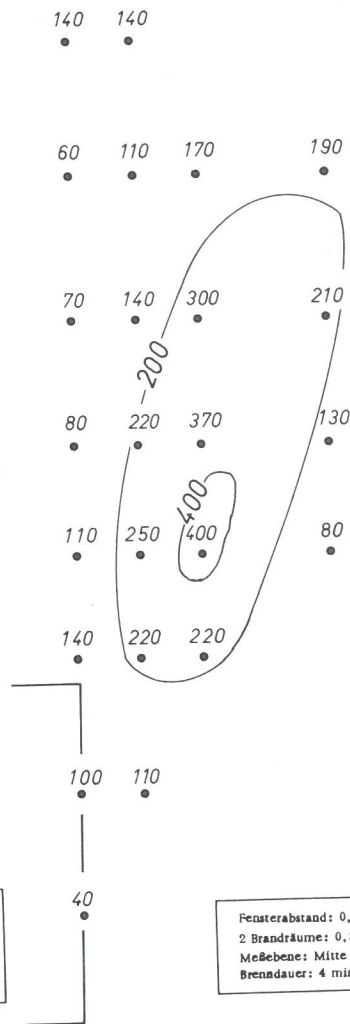


Bild 32 b
Temperaturen in der Mittelebene zwischen zwei Fenstern

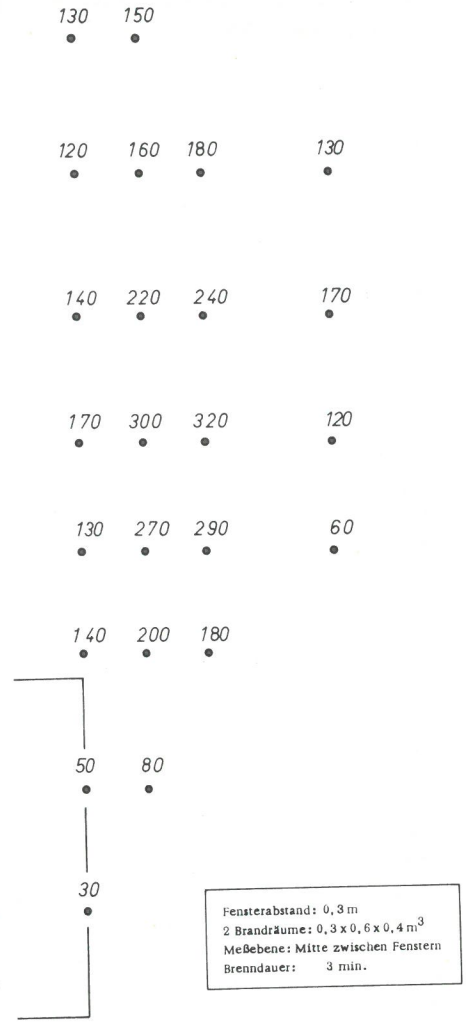


Bild 32 c
Temperaturen in der Mittelebene zwischen zwei Fenstern

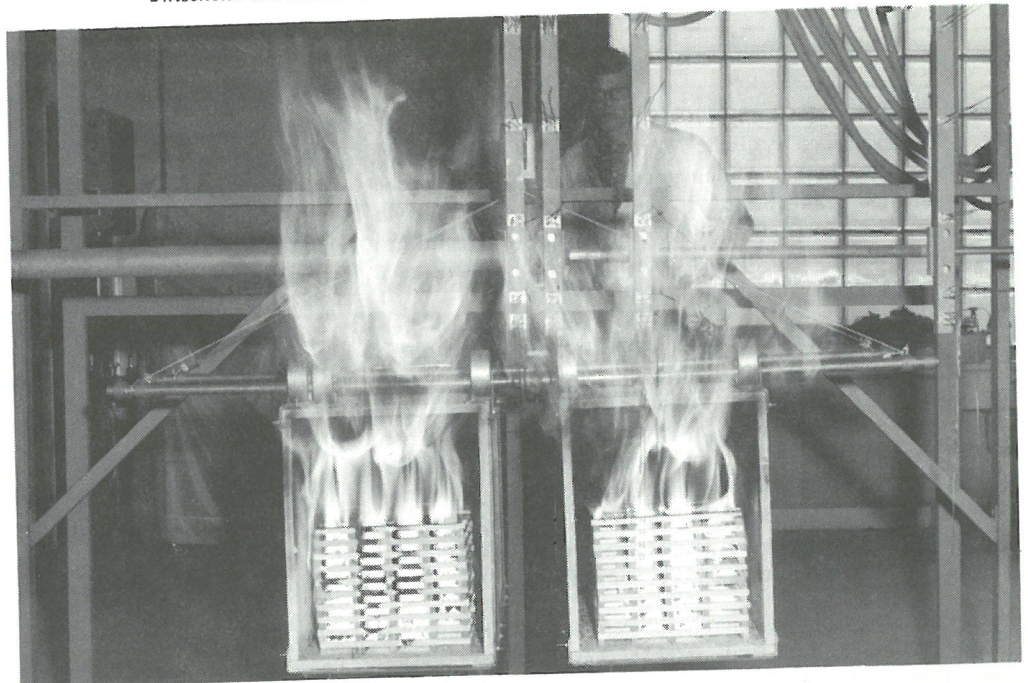


Bild 33
Modellbrandversuch mit nebeneinanderliegenden 0,3 x 0,6 x 0,4 m³-Brandräumen
Fensterabstand D = 15 cm Versuchszeit t = 3 : 30 min

(≤ 10 cm) werden zwischen den Fenstern sogar höhere Temperaturen beobachtet als in der Mittelebene der Fenster (vgl. Bild 29 a).

4. Zusammenfassung und Wertung der Untersuchungsergebnisse

Eine Reihe von Autoren haben Brandversuche unter natürlichen Bedingungen beschrieben, die vor allem hinsichtlich des Brandgeschehens vor der Fassade eines in Brand geratenen Gebäudes einige Aussagen machen konnten. Diese Versuche sollten vor allem das Problem der Feuerbeanspruchung von Außenstützen klären helfen. Der Verfasser hat nun im Abschnitt 1.3 diese Versuche im Lichte neuerer Erkenntnisse erneut analysiert und konnte daraus im Abschn. 1.3 eine Reihe von Aussagen über das Brandverhalten von Außenstützen bzw. deren Feuerbeanspruchung sichern. Diese Auswertungen zeigten jedoch, daß eine Reihe von Fragen über das Brandgeschehen noch nicht genügend geklärt sind.

Die überwiegend in Brandhäusern mit recht kleiner Grundfläche ausgeführten Versuche verwirklichten nur in Ausnahmefällen den ungünstigsten Brandverlauf, der üblicherweise Ausgangspunkt der brandschutztechnischen Bauvorschriften ist. Die bisherigen Versuche vermochten daher keine Aussagen, vor allem über den sogenannten Stockwerkeffekt – dies ist das Brandgeschehen in Bereichen oberhalb des Fenstersturzes – und über die maximale räumliche Ausdehnung hochoberer Gase machen.

Im vorliegenden Fall ist ein Abbrand, der unter beschränkter Ventilation des Brandherdes erfolgt, als besonders ungünstig anzusehen, weil dabei ein Teil der im Brandraum gebildeten brennbaren Gase unverbrannt die Brandraumöffnungen verlassen und erst außerhalb des Brandraumes, also vor der Fassade, verbrennen. Dieser ungünstigste Brandverlauf hat eine ausreichende Wahrscheinlichkeit in der Baupraxis. Der Verfasser hält es daher für gerechtfertigt, diesen Brandverlauf zur Grundlage der weiteren Aussagen zu machen. Folgt man den Untersuchungsergebnissen von Heselden [24], so kann erwartet werden, daß ein Brand dann unter beschränkter Ventilation verläuft, wenn zwischen der Brandbelastung q , der Fensterfläche A_F und der Grundfläche des Brandraumes A die Ungleichung

$$\frac{A_F}{qA} < 6 \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

besteht. Die Ungleichung (17) wird z. B. erfüllt, wenn für den Wohnungsbau typische Werte ($q = 30 \text{ kg Holz/m}^2$, $A_F = 2,5 \text{ m}^2$, $A = 20 \text{ m}^2$) eingesetzt werden. Der angegebene ungünstige Brandverlauf ist vor allem jedoch für Gewerbebauten mit hohen Brandbelastungen und (aufgrund großer Geschoßflächen) kleinen Lüftungsverhältnissen, z. B. $A_F/A < 0,1$, zu erwarten.

Eine Reihe wichtiger Fragen kann, wie im Abschnitt 2 nachgewiesen, mit Hilfe von Modellversuchen im verkleinerten Maßstab beantwortet werden. Wie im Abschnitt 2.4 angegeben, gehören dazu Gastemperaturen und Flammhöhen. Die nach Messungen im Modellmaßstab gezeichneten Bilder 18, 29 und 32 stellen maßstäblich die Temperaturverteilung vor der Fassade eines Brandhauses unabhängig von seiner absoluten Größe dar. Der Maßstab der Darstellung ergibt sich aus der eingetragenen Fensterhöhe.

Mit geringerer Genauigkeit lassen sich nach Abschnitt 2.4 Gasgeschwindigkeiten und Strahlungsintensitäten bestimmen. Diese Messungen wurden daher in vorliegendem Fall weitgehend zurückgestellt. So wurde vor allem auf die Beantwortung der folgenden Teilfragen durch die Modellbrandversuche in verkleinertem Maßstab verzichtet:

1. In welcher Weise werden vor der Fassade befindliche Außenstützen von den Flammen umströmt? (Diese Frage hätte die notwendige Größe des seitlichen Überstandes einer einseitig bekleideten Stütze ermitteln helfen.)
2. Wie werden die Temperaturen vor der Fassade unter der Einwirkung von Wind senkrecht bzw. in Richtung der Fassadenfläche verändert?

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der wenigstens näherungsweise bestimmten Wärmeübergangszahlen auf beliebige Maßstäbe kann folgendes bemerkt werden: Die Wärmeübergangszahl steigt mit zunehmender Gasgeschwindigkeit und zunehmender Strahlungsintensität leicht an. Beim Übergang vom Modellmaßstab auf das vergrößerte Original müssen daher die Wärmeübergangszahlen etwas größer als am Modell gemessen angenommen werden.

4.1. Feuerbeanspruchung von Außenstützen

Verantwortlich für die Feuerbeanspruchung von Außenstützen (vgl. Abschnitt 1.2.4) sind die mit dem Brand verbundenen hohen Gastemperaturen und die jeweiligen Wärmeübergangsbedingungen. Im Falle eines Brandes in einem mehrgeschossigen Gebäude treten je nach Orientierung der Außenstütze relativ zum Brandraum sehr unterschiedliche Temperaturen in ihrer Umgebung auf. Wie sich vor allen Dingen aus den Bildern 18, 29 und 32 ergibt, können die folgenden Standorte einer Stütze (bzw. Abschnitte derselben) hinsichtlich der Beanspruchungen durch die heißen Gase unterschieden werden:

1. Außenstütze in der Fensterfläche des Brandraumes.
2. Außenstützen neben dem Fenster des Brandraumes.
3. Außenstütze vor der Fassade des nächst höheren Geschosses.
4. Außenstütze in der Fassade des nächst höheren Geschosses.

4.1.1. Temperaturen in der Fensterfläche des Brandraumes

Der zeitliche Verlauf der Maximaltemperaturen in der Fensterfläche entspricht etwa den Temperaturen im Brandraum in Fensternähe. Diese liegen bei nicht zu tiefen Brandräumen nahe beim (örtlichen) Mittelwert, bei sehr tiefen Brandräumen dagegen häufig noch darüber (vgl. Bild 17).

Die Maximaltemperaturen werden unmittelbar unterhalb des Fenstersturzes gefunden.

Die Feuerbeanspruchung einer Außenstütze in der Fensterfläche wird im wesentlichen durch folgende Größen bestimmt:

1. Maximale Temperaturen (unterhalb der Fensterkante) entsprechend der Brandraumtemperatur,
2. einseitige Wärmestrahlung vom Brandraum her,
3. heftige einseitig wirkende Heißgasströmung aus dem Brandraum.

Die Stütze muß also fast ausschließlich auf der dem Brandraum zugekehrten Fläche gegen die Brandeinwirkung gesichert werden. Der seitliche Überstand ist aufgrund der im Abschnitt 1.3.3 beschriebenen englischen Versuche in der Regel größer zu wählen als in Bild 7 angegeben.

Im Bereich des Stahlbaues könnte bei Verwendung nur einseitiger Bekleidungen (bei dreiseitig ungeschütztem Stahlprofil) ohne nähere Untersuchungen ein gewisses Risiko bestehen: Unter dem Einfluß der aus dem Brandraumfenster herausschlagenden Flammen wird in der Regel der außenliegende ungeschützte Flansch des Stützenprofils stärker erwärmt als der geschützte. Dadurch werden Verformungen der Stütze hervorgerufen, die die Tragfähigkeit in unzulässiger Weise vermindern können.

Die Vergrößerung des Abstandes von der Fensterebene des Brandraumes führt für die in Höhe des Brandgeschosses befindlichen Stützenabschnitte sehr bald zu einer Abminderung der Beanspruchung durch heiße Gase. Aufgrund der Messungen kann unterstellt werden, daß bei Fensterhöhen von 1 bis 2 m große Teile der Stützen außerhalb hoher Gas-temperaturen liegen, wenn der Abstand von der Fensterfläche größer 0,5 m beträgt. Stützen in derartiger Entfernung werden lediglich von der noch sehr intensiven Wärmestrahlung aus dem Innern des Brandraumes getroffen. Der Verfasser ist der Ansicht, daß diese Verhältnisse bei den in Hamburg ausgeführten Versuchen (vgl. Abschnitt 1.3.1) ausreichend genau nachgebildet wurden und daß somit die Schlußfolgerungen von Bongard [10], soweit sie die von der Fassade abgerückten Außenstützen betreffen, richtig sind.

Bei Verwendung von Außenstützen mit einem ausreichend großen Abstand von der Fensterfläche geraten in der Regel Deckenanschlüsse oder Riegel in den Bereich sehr heißer Gasströmungen in der Nähe des Fenstersturzes. Für derartige Bauglieder erscheint ein Feuerschutz, wie er für Innenstützen bzw. -träger üblich ist, unvermeidbar.

4.1.2. Temperaturen außerhalb der Fensterlaibung

Über die Feuerbeanspruchung der Stützenabschnitte, die seitlich sich außerhalb der Fensterlaibung befinden, geben die im Abschnitt 1.3.3 beschriebenen englischen Brandversuche Auskunft. Bild 32 (auch Bild 29) zeigt ebenfalls, in wie starkem Maße die Temperaturen außerhalb des Fensters abnehmen. Bei den im Bauwesen üblichen Fensterhöhen kann davon ausgegangen werden, daß die Temperaturen ca. 50 cm neben der Fensterlaibung unter die Zündtemperatur normalentflammbarer Baustoffe abgesunken sind. Dort befindliche Bauteiloberflächen werden lediglich durch vom Brandraumfenster und Flamme ausgehende Wärmestrahlung getroffen. Die Wärmestrahlungsintensitäten sind jedoch wegen des kleinen Konfigurationsfaktors zwischen dem Brandraumfenster und den Bauteiloberflächen (vgl. [37, 38, 39]) klein.

4.1.3. Temperaturen vor der Fassade des nächst höheren Geschosses

Die Temperaturen oberhalb der Brandraumfenster werden durch die herausschlagenden Flammen bestimmt, deren Achse bei bauüblichen Fensterhöhen etwa 0,8 bis 1,2 m vor der Fassade angenommen werden kann. Die nach vollständiger Zündung der Brandlast weitgehend stationäre Temperaturverteilung ist in den Bildern 18 und 29 a für die Fensterachse dargestellt. Bild 32 zeigt, daß derartige Temperaturen bei nebeneinanderliegenden Fenstern des Brandraumes auch außerhalb der Fensterlaibung auftreten können. Die Untersuchungen zeigen, daß die örtliche Temperaturverteilung offensichtlich nur wenig von der Fensterbreite abhängt.

Die Form des Heißgaskegels wird wesentlich dadurch be-

stimmt, inwieweit im nächst höheren Geschos Fenster vorhanden sind oder nicht. Großflächige Fenster führen dazu, daß die Achse der Flammen näher an die Fassade rückt (vgl. Abschnitt 3.2.2.3).

Der zeitliche Verlauf der Maximaltemperaturen in der Flammenachse kann wie folgt charakterisiert werden: Bis zum Ende der Zündphase, also bis zum Übergang zum stationären Brandablauf, erfolgt ein steiler Temperaturanstieg bis ca. 800°C. Bis zu diesem Zeitpunkt sind, wie aus Modellversuchen bekannt, in der Regel ca. 20 % der Brandbelastung verbraucht. Bei konstanter Abbrenngeschwindigkeit bleibt danach die Temperatur vor der Fassade konstant. Nach Abbrand von ca. 80 % der ursprünglichen Brandlast sinken die Temperaturen vor der Fassade rasch ab. Außenstützen dürften von diesem Zeitpunkt ab keine zusätzliche Feuerbeanspruchung mehr erfahren. Hieraus kann gefolgert werden, daß die Dauer intensiver Beanspruchung durch heiße Gase für Außenstützen in diesem Bereich evtl. kürzer ist als für Bauteile im Innern des Brandraumes. Wegen der langsamen Auskühlung des Brandraumes können die für die Bestimmung der äquivalenten Branddauer t_0 kennzeichnenden Brandwirkungen (vgl. Bild 4) erst zu einem späteren Zeitpunkt eintreten.

Die Feuerbeanspruchung einer Außenstütze vor der Fassade (in ungünstigster Lage, also in der Flammenachse oder in der Mitte zwischen zwei Fenstern mit geringem Abstand gedacht) kann wie folgt charakterisiert werden:

1. Die Temperaturen wirken von allen Seiten in gleicher Weise auf die Stütze, die Heißgasströme wirken weitgehend parallel zur Stützenachse (vgl. Bild 34).
2. Der Temperatur-Zeit-Verlauf wird durch einen je nach Zündgeschwindigkeit der Brandlast steileren oder flache-

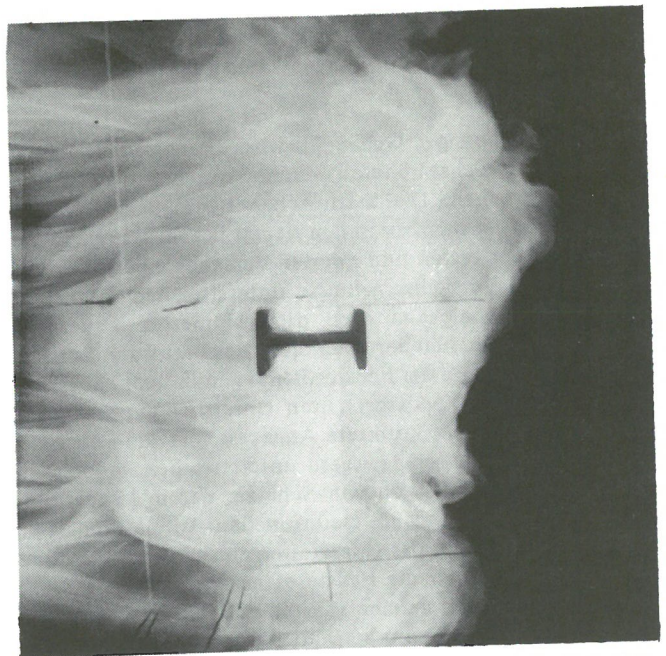


Bild 34
Stahlprofil I 80 als Modell einer Außenstütze vor dem Brandraumfenster

Erläuterungen:

Bild zeigt Ansicht senkrecht von unten in Richtung der Stützenachse. Am linken Bildrand befindet sich der Brandraum. Der Fenstersturz des Modells markiert sich als helle Linie.

Bild demonstriert die allseitige Beanspruchung von vor der Fassade stehenden Außenstützen im Bereich der Fenster.

ren Anstieg gekennzeichnet. Nach Erreichen von ca. 800°C bleibt die Temperatur konstant.

- Ein Herausrücken der Stütze aus dem Heißgaskegel hat zunächst einen nur geringen Einfluß, da der Wärmestrom von den heißen Gasen zur Stützenoberfläche überwiegend durch Wärmestrahlung beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 3.2.2.4).

4.2. Feuerbeanspruchung von Fassaden

Die Ausführungen dieses Abschnittes beschränken sich auf Fassaden oder Teilen davon, soweit sie in der Ebene der Brandraumfenster liegen. Für Fassadenteile anderer Lage gelten die für Außenstützen gemachten Angaben sinngemäß. Die Ausführungen gelten gleichzeitig für Außenstützen, soweit sie unmittelbar in die Fassade des Gebäudes einbezogen sind.

Die Oberflächen von Fassaden werden, wenn von dem unmittelbaren Bereich der Fensteroberkante abgesehen wird, in nur geringem Maße durch heiße Gase beansprucht. In weiteren Bereichen oberhalb der Brandraumfenster ist jedoch die intensive Wärmestrahlung zu beachten. Trotz der niedrigen Gastemperaturen gehen auf diese Weise Wärmeströme hoher Dichte auf die Oberflächen der Fassaden über. Wie im Abschnitt 1.3.3 angegeben, treten nach Versuchserfahrungen der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) derartige Wärmestromdichten in den für Innenbauteile bestimmten Normprüfständen auf, wenn die Brandraumtemperaturen ca. 650°C betragen. Mit zunehmendem Abstand vom Fenstersturz sinken die Temperaturen (vgl. auch Tafel 7).

Wie die Untersuchungen an zwei nebeneinanderliegenden Brandraumfenstern ergaben, ist für Fassadenteile oberhalb der Mitte zwischen zwei Fenstern ebenfalls noch mit erheblichen Feuerbeanspruchungen zu rechnen, solange der Abstand der Fenster bei der bauüblichen Fensterhöhe kleiner als 1 m bis 2 m ist.

Bei mehrgeschossigen Gebäuden wird die Fassadenfläche in der Regel im nächst höheren Geschöß durch Fensteröffnungen unterbrochen. Die thermischen Bedingungen vor der Fassade dürften dann zwischen denen liegen, wie sie in den Versuchen der ersten und zweiten Versuchsreihe untersucht wurden. Die Versuchsergebnisse unterstreichen die Bedeutung eines ausreichend groß dimensionierten Feuerüberschlagweges zwischen der Oberkante des Brandraumfensters und der Unterkante der Fensteröffnungen in dem nächst höheren Geschöß. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse erlauben zwar nicht konkrete Angaben über die Länge des notwendigen Überschlagweges, unterstreichen jedoch die Richtigkeit der Aussagen von Schütze, der in [5] schrieb: „Feuerüberschlagwege bei traditionellen Außenwänden bis 9 m verhindern nicht das Übergreifen eines Brandes in höhere Geschosse. Durch die Fensteröffnungen wird der Brand bei jeder wie auch immer gearteten Brüstung übertragen. Die über dem Brandraum befindlichen Räume werden nicht in ihrem unteren, sondern in ihrem oberen Teil gefährdet, und zwar praktisch unabhängig von jeder Brüstungsausführung und -höhe.“ Schütze leitet daraus die voll zu unterstützende Forderung ab, zum Schutz der Fensteröffnungen in Gebäuden bauliche oder abwehrende Brandschutzmaßnahmen vorzusehen. Er schreibt: „Es gibt genügend technisch realisierbare Möglichkeiten für den Schutz von Wandöffnungen; sie auf Fensteröffnungen in Außenwänden anzuwenden, hat man trotz unerfreulicher Erfahrungen noch

nicht für nötig befunden. Stattdessen werden an Brüstungen und Stürze Anforderungen gestellt, was genau so sinnvoll ist, wie wenn man bei Feuerschutzabschlüssen von den Rahmen eine hohe Widerstandsfähigkeit verlangte, sich aber nicht um mehrere quadratmetergroße Verglasungen aus Fensterglas in ihnen kümmerte.“

Die Fassaden vieler Gebäude werden aus ästhetischen Gesichtspunkten oder für Zwecke des Wärmeschutzes mit brennbaren Verkleidungen versehen. Die gemessenen Temperaturen und Wärmeübergangszahlen lassen erkennen, daß derartige Verkleidungen in einem weiten Bereich oberhalb des Fenstersturzes im Brand zerstört werden. Bei Verwendung normalentflammbarer Baustoffe nach DIN 4102 kann davon ausgegangen werden, daß die Fassadenfläche vollständig abbrennt (vgl. auch [5]). Schwerentflammbare Baustoffe nach DIN 4102 verlöschen in der Regel nach Wegnahme der Zündquelle. Sie verlöschen in der Regel spätestens in Bereichen, in denen die Lufttemperatur unter ca. 200°C absinkt.

Anmerkung:

Schwerentflammbare Baustoffe nach DIN 4102 besitzen bei Prüfungen nach dem Plattenschlot-Brandschachtverfahren eine unzerstörte Restlänge von mindestens 15 cm. An dieser Grenzlinie herrschen bei nicht brennbaren Baustoffen im Brandschacht Temperaturen von rd. 160°C [46].

4.3. Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Fassaden und Außenstützen durch Brandversuche

Die Feuerwiderstandsdauer von Fassaden und Außenstützen kann in der Regel nicht am fertigen und eingerichteten Bauwerk untersucht werden. Vielmehr muß eine Bauart, eine Baukonstruktion oder ein Baustoff nur an einigen wenigen Probekörpern in Modellversuchen hinsichtlich des Brandverhaltens untersucht werden. Das Wort Modellversuch bezieht sich hier zunächst auf die zu prüfenden oder prüfbar abmessungen des Prüfkörpers (Modellkörpers). Es ist nicht möglich, alle denkbaren Abmessungen, z. B. von Stützen oder Fassaden zu prüfen. Man muß sich auf typische Abmessungen „brandschutztechnisch ungünstiger“ Konstruktionen beschränken. Die Prüfergebnisse gelten dann in gewissen Grenzen als auf ähnliche Bauteile übertragbar.

Das Wort Modellversuch bezieht sich wegen der im Abschnitt 1.2 skizzierten Mannigfaltigkeit natürlicher Brandabläufe aber auch auf die Eigenschaften des Prüfbrandes (Modellbrandes). Soweit es sich um Innenbauteile handelt, sind dafür Standarduntersuchungsverfahren geschaffen worden, von denen erwartet wird, daß sie einen ausreichend großen Bereich von Brandrisiken naturgetreu nachbilden und eine ausreichende Beurteilung des Prüfkörpers hinsichtlich seines Verhaltens in beliebigen Bränden erlauben.

Die in beiden Richtungen des Wortes Modellversuch modellgetreue Nachbildung natürlichen Brandgeschehens erfordert für die Prüfung von Außenstützen und Fassaden den Aufbau geeigneter Prüfeinrichtungen im Originalmaßstab. In dem unteren von mehreren Geschossen müßte ein Brandraum ausreichender Größe vorgesehen werden. Vor der Fassade könnte dann das Verhalten der Bauteile in ihren natürlichen Abmessungen und unter üblichen mechanischen Beanspruchungen untersucht werden. Der Brandverlauf muß folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllen:

Das Brandgeschehen im Innern müßte eine ausreichend hohe äquivalente Normbranddauer besitzen. Zur Vermeidung

der dazu notwendigen Umrechnungen (vgl. Bild 4) sollte im Innern des Brandraumes die Einheitstemperaturkurve gesteuert werden. (Diese Anforderung wurde von den Hamburger Versuchen (vgl. Abschnitt 1.3.1) erfüllt.)

Die Abbrenngeschwindigkeit sollte entsprechend der durch die Brandraumöffnungen zugelassenen gewählt werden. Diese Forderung ist gleichbedeutend mit der Forderung nach einer örtlichen Temperaturverteilung, wie sie in den beschriebenen Modellbrandversuchen festgestellt wurde. (Diese Anforderung wurde nach den Ausführungen des Abschnitts 1.3 bisher von keinem Versuch im Maßstab 1 : 1 mit ausreichender Sicherheit erfüllt.)

Die Temperaturverteilung vor der Fassade sollte für eine ausreichend lange Zeit, wie sie durch die äquivalente Normbranddauer im Innern vorgegeben ist, aufrecht erhalten werden können. (Diese Forderung war bisher nicht ausreichend genug beachtet worden, da der Begriff der äquivalenten Normbranddauer erst in jüngster Zeit klarer definiert worden ist.)

Derartige Brandversuche im Maßstab 1 : 1 erscheinen für eine Normung wenig geeignet. Es dürfte vor allen Dingen technische Schwierigkeiten bereiten, ein derartig großes Brandhaus ausreichend vor der Witterung zu schützen, um auf diese Weise ausreichend reproduzierbare Prüfergebnisse zu erhalten.

Ein Ausweg bietet sich durch Teilmodellierung des Brandgeschehens an. Dieser Weg ist für die Beurteilung von gegen Feuer widerstandsfähige nicht tragende und nicht aussteifende Außenwandelemente, Brüstungen u. ä. in DIN 4102, Blatt 3 [2] mit Erfolg beschrritten worden. Die Richtigkeit der dabei angenommenen Prüfparameter wurde auch durch die vorliegende Arbeit erneut bestätigt.

Das Prüfverfahren nach [2], dort Abschnitt 4.3, erscheint über den bisher gegebenen Rahmen hinaus auch für beliebige fensterlose Außenwände geeignet.

Bei der Prüfung von Außenstützen könnte wie folgt vorgegangen werden:

Ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit kann die Orientierung einer Außenstütze zu einem möglichen Brandraum nicht eindeutig bestimmt werden. Die Feuerbeanspruchung in einem Brandfall kann also sowohl von der Art entsprechend Abschnitt 4.1.1, Abschnitt 4.1.2 als auch von der Art entsprechend 4.1.3 sein. Jede der Beanspruchungsarten müßte damit für eine Prüfung einer Außenstützenkonstruktion getrennt nachgeahmt werden. Auf eine der Teilprüfungen kann nur dann verzichtet werden, wenn nachgewiesen wird, daß eine Beflammungsart wesentlich schärfer ist als eine andere und damit beim Bestehen der schärferen das Bestehen der mildereren gefolgert werden kann. Eine in diesem Sinne eindeutige Abstufung in der Feuerbeanspruchung liegt zunächst nur für die unter 4.1.2 und 4.1.3 genannten Fälle vor. Ein Vergleich zwischen einseitiger Beanspruchung mit Temperaturen entsprechend etwa der Einheitstemperaturkurve und einer allseitigen Beanspruchung mit nur bis 800°C ansteigenden Temperaturen fällt dagegen sehr schwer. Zu dieser Frage sind also gezielte Untersuchungen im Originalmaßstab notwendig.

Für den Bereich des Stahlbaues läßt sich jedoch hier teilweise eine Antwort bereits geben. Der für den Schutz der vor dem Brandgeschoß verlaufenden Abschnitte einer Außen-

stütze ausreichende einseitige Feuerschutz ist für *mehrgeschossige* Gebäude nur dann ausreichend, wenn der Abstand zwischen den Fenstern der Brandräume ausreichend groß ist und die Stütze zwischen den Fenstern verläuft. In allen anderen Fällen werden die drei äußeren ungeschützten Seiten der Stütze durch Temperaturen bis zu ca. 650°C oder höher beansprucht. Einer derartigen Beanspruchung widerstehen höchstens sehr schwere Stahlprofile für Zeiten von ca. 30 Minuten oder mehr. Für den Stahlbau erscheint daher wegen der zusätzlichen Gefahr einseitiger Verformungen ein allseitiger Feuerschutz unumgänglich zu sein. Im Falle nur eingeschossiger Gebäude können die einseitigen Brandschutzmaßnahmen bereits ohne Prüfung aufgrund der vorliegenden Untersuchungen abgeschätzt werden. Ein seitlicher Überstand, der der Höhe des Profils entspricht, dürfte in der Regel ausreichend sein. Das zur Bekleidung verwendete Material sollte bei Versuchen an Innenstützen oder -trägern eine ausreichende Eignung für Maßnahmen des baulichen Brandschutzes nachgewiesen haben und zusätzlich witterungsbeständig sein.

Klammert man eingeschossige Gebäude aus und beschränkt die Aussagefähigkeit der Prüfungen auf allseitig gleichmäßig geschützte Stützenkonstruktionen, so erscheint die Nachbildung einer allseitigen, für die Achse der aus den Fenstern herausschlagenden Flammen typische Beanspruchung für ein allgemeingültiges Prüfverfahren geeignet. Es wird für die Prüfung einer Außenstütze mit dem Ziel einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung hier folgender Vorschlag gemacht:

Zur Simulierung der allseitigen Temperaturbeanspruchung (vgl. Bild 34) wird ein Brandversuch im *Innenstützenprüfstand* ausgeführt. Es wird eine Brandraumtemperatur-Zeitkurve durchfahren, die wie folgt angenommen wird:

1. bis 23 Minuten:
Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102, Blatt 2,
Endwert in der 23. Minute 782 grd über der Anfangstemperatur.
2. 24. Minute bis Versuchsende:
Konstante Temperatur von 782 grd über der Anfangstemperatur.

Es könnte verabredet werden, die Versuchszeit gegenüber der für die Klassifizierung von Innenbauteilen erforderlichen zu verkürzen, da das Brandgeschehen vor der Fassade in der durch die Prüfung simulierten Intensität in der Regel von kürzerer Dauer ist als im Innern des Brandraumes.

Schrifttum

- [1] DIN 4102, Blatt 2, Ausgabe Februar 1970:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen.
- [2] DIN 4102, Blatt 3, Ausgabe Februar 1970:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Sonderbauteilen.
- [3] DIN 4102, Blatt 4, Ausgabe Februar 1970:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Einreihung in die Begriffe.

- [4] Ergänzende Bestimmungen zu DIN 4102:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – 3. Fas-
sung, Ausgabe Februar 1970.
- [5] Schütze, W.:
Das Feuerrisiko von Frontaußenwänden.
Brandschutz Nr. 3 – 6/1967
- [6] Boué, P.:
Brandversuche mit Außenstützen aus Stahl.
Beiträge aus Statik und Stahlbau, anlässlich des 60. Ge-
burtstages von Prof. Klöppel, Köln 1961
- [7] Boué, P.:
Der Feuerschutz von Stahlhochbau.
Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau.
Stahlbau-Verlags GmbH, H. 21, Köln 1959
- [8] Schütze, W.:
Versuche in natürlichem Maßstab zur Untersuchung
der baulichen Bedingungen für die Ausbreitung von
Bränden.
VFDB-Zeitschrift 11 (1962), H. 3, S. 72 – 83
- [9] Bongard, W.:
Brandversuche mit Außenstützen aus Stahl.
Der Stahlbau 32 (1963), H. 5, S. 139 – 146
- [10] Bongard, W.:
Außenstützen aus Stahl im Feuer.
VFDB-Zeitschrift 12 (1963), H. 4, S. 117 – 125
- [11] Butcher, E. G., Chitty, T. B., Ashton, L. A.:
The temperature attained by steel in building fires.
Fire Research Technical Papers No 15, Joint Fire Re-
search Organisation
Her Majesty's Stationary Office, London 1966
- [12] Seigel, L. G.:
Fire test of an Exterior Exposed Steel Spandrel Girder.
Materials Research and Standards 10 (1970), Nr. 2,
S. 10 – 13
- [13] Bongard, W., Portmann, K. D.:
Brandschutz im Stahlbau – Wegweiser für die Praxis.
Köln 1970, Stahlbau-Verlags GmbH
- [14] Knublauch, E.:
Brandbelastung, Abbrenngeschwindigkeit, Energiefrei-
setzung und Brandgeschehen.
in: Beiträge zur Theorie des baulichen Brandschutzes
Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 5,
Nr. 10, S. 5 – 40, Düsseldorf 1970, VDI-Verlag
- [15] Kawagoe, K.:
Fire Behavior in Rooms.
Report of the Building Research Institute (Japan),
Nr. 27 (1958)
- [16] Thomas, P. H.:
Some studies of Building fires, Using Models.
Publication 786, National Academy of Sciences, Na-
tional Research Council, Washington D. C. (1961), Li-
brary of Congress
- [17] Gross, D., Robertson, A. F.:
Experimental fires in enclosures.
National Bureau of Standards (NBS), Report Nr. 8147
(Dez. 1963)
- [18] DIN 18 230 E, Stand Juli 1968:
Baulicher Brandschutz im Industriebau – Ermittlung
der Brandschutzklasse
- [19] Kawagoe, K., Sekine, T.:
Estimation of fire-temperature-time-curve in rooms.
Building Research Institute (Japan)
Occasional REport 11 (June 1963)
- [20] Ödeen, K.:
Theoretical study of fire characteristics in enclosed
spaces.
Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden,
Bulletin 10 (1963)
- [21] Ehm, H.:
Tendenzen im baulichen Brandschutz.
in: Bauen heißt experimentieren. Köln 1970, Stahl-
bau-Verlags-GmbH
- [22] Knublauch, E.:
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Norm-
brandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick
auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer.
BAM-Berichte, Forschung und Entwicklung in der
Bundesanstalt für Materialprüfung, BAM-BR 016
(1972) Berlin
- [23] Knublauch, E., Rudolphi, R., Stanke, J.:
Theoretische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer
von Stahlstützen. 1. Teil: Berechnung der Stahltempe-
raturen von Stahlstützen.
Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialprü-
fung (BAM) für die Europäische Konvention der Stahl-
bau-Verbände, Sept. 1971
Unveröffentlicht
- [24] Heselden, A. J. M.:
Parameters determining the severity of fire.
Paper 2 in: Symposium No 2, Behavior of structural
steel in fire. London 1968
Her Majesty's Stationary Office
- [25] Heselden, A. J. M., Smith, P. G., Theobald, C. R.:
Fires in a large compartment containing structural
steelwork. Detailed measurements of fire behavior.
Unveröffentlicht
- [26] Knublauch, E.:
Brandversuche an einer wassergekühlten Stahlstütze.
Der Stahlbau (1969), H. 6, S. 182 – 184
- [27] Spalding, D. B.:
The Art of Partial Modeling.
9th Symposium (international) on Combustion, New
York 1963, Academic Press
- [28] Yokoi, S.:
Upword convection current from a burning wooden
house.
International Symposium on the use of models in fire
research.
Publication 786 der National Academy of sciences –
National Research Council, S. 186, Washington D. C.
1961 Library of Congress
- [29] Taylor, G. J.:
Fire under influence of natural convection.
International Symposium on the use of models in fire

- research.
Publication 786 der National Academy of sciences –
National Research Council, S. 10, Washington D. C.
1961 Library of Congress
- [30] Hottel, H. G.:
Fire modeling.
International Symposium on the use of models in fire
research.
Publication 786 der National Academy of sciences –
National Research Council, S. 32, Washington D. C.
1961 Library of Congress
- [31] Fons, W. L. et al:
Project Fire Model, Summary Progress Report II.
Forest Service, US Dep. of Agriculture, Southern
Forest Fire Laboratory, Macon, Georgia (1962)
- [32] Gross, D.:
Experiments on the burning of cross piles of wood.
Journal of the Research of the National Bureau of
Standards (NBS), Vol 66 C, No 2, April – June 1962
- [33] Webster, C. T., Raftery, M. M.:
The burning of fires in rooms.
Part II: Tests with cribs and hight ventilations on
various scales.
Unveröffentlichte Mitteilung der Joint Fire Research
Station, Boreham Wood, England (F. R. Note 401,
Mai 1959)
- [34] Webster, C. T., Raftery, M. M., Smith, P. G.:
The burning of well ventilated compartment fires.
Part III: The effect of the wood thickness.
Unveröffentlichte Mitteilung der Joint Fire Research
Station, Boreham Wood, England (F. R. Note 474,
Sept. 1961)
- [35] Webster, C. T., Smith, P. G.:
The burning of well ventilated compartment fires.
Part IV: Brick compartment, 2,4 m cube.
Unveröffentlichte Mitteilung der Joint Fire Research
Station, Boreham Wood, England (F. R. Note 578,
Nov. 1964)
- [36] McGuire, J. H.:
Heat transfer by radiation.
Fire Research Special Report, No 2. London (1963)
Her Majesty's Stationary Office
- [37] NN:
Diagrams for the approximate assesment of radiation
exposure Hazards from fires in buildings.
Commonwealth Experimental Building Station, U. P.
153
Department of works, Australien, 1963
- [38] Law, M.:
Radiation from fires and building separation.
Unveröffentlichte Mitteilung der Joint Fire Research
Station, Boreham Wood, England (F. R. Note 437,
1960)
- [39] Jones, C. N.:
Influence charts for configuration factors.
Commonwealth Experimental Building Station, U. P.
154
Department of works, Australien (1962)
- [40] Naeser, G., Pepperhoff, W.:
Optische Temperaturmessung an leuchtenden Flammen.
Archiv für das Eisenhüttenwesen Bd. 22, Heft 1/2
(1951)
- [41] Hausen, H.:
Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und
Kreuzstrom, Technische Physik in Einzeldarstellungen.
Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1950, Springer-Verlag
- [42] Schack, A.:
Der industrielle Wärmeübergang.
7. Auflage, Düsseldorf, 1969, Verlag Stahleisen
- [43] Heiligenstaedt, W.:
Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen.
4. Auflage, Düsseldorf, 1966, Verlag Stahleisen
- [44] O'Dogherty, M. J., Young, R. A.:
Miscellaneous experiments on the burning of wooden
cribs.
Unveröffentlichte Mitteilung der Joint Fire Research
Station, Boreham Wood, England (F. R. Note 548,
1964)
- [45] Rudolphi, R., Knublauch, E.:
Ein Verfahren zur Berechnung der Feuerwiderstands-
dauer von Stahlbauteilen.
in: Beiträge zur Theorie des baulichen Brandschutzes.
Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 5,
Nr. 10, S. 41 – 90, Düsseldorf 1970, VDI-Verlag
- [46] Dorn, H.:
Entwicklung des Plattenschlot-Brandschachtverfahrens
zum Nachweis der Schwerentflammbarkeit von Bau-
stoffen in Anlehnung an DIN 4102.
Materialprüfung Bd. 5 (1963), Nr. 2, S. 58 – 65

