

# **BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG**

**DER BUNDESLÄNDER**

**BERICHTE**

**Rauchabführung aus hohen und  
weitläufigen Bauwerken im Brandfall  
für den Personenschutz**

**79**

**ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"**

Arbeitsgemeinschaft der Innenminister der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr. 79

Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im  
Brandfall für den Personenschutz

von  
Dipl.-Ing. Reiner John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Dezember 1991

FA. Nr. 136 (2/91)

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
2. Gefährdung von Personen durch Brandrauch
3. Brandgefahren bei Bränden in Atriumbauwerken
4. Bei Bränden entstehender Brandrauch-Luftgemisch-Volumenstrom
5. Maßnahmen zum Schutz von Räumen und Rettungswegen des Atriumgebäudes gegen eine Verqualmung
  - 5.1 Abführung von Brandrauch aus einem Atrium
  - 5.2 Raucheintritt in die an das Atrium angrenzenden Räume als Folge, daß das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch an der Fassade anliegt.
6. Kombiniertes Abzugssystem für das im Brandfall entstehende Brandrauch-Luftgemisch
  - 6.1 Unzureichende Funktionsfähigkeit der RWA-Anlagen bei "kleinen" Bränden
  - 6.2 Auslegung eines kombinierten Abzugssystems
7. Bewertung der Auslegungsdaten
  - 7.1 Temperaturdifferenz zwischen dem Brandrauch-Luftgemisch unterhalb des Daches und der Außentemperatur
  - 7.2 Branddauer und freigesetzter Wärmestrom beim Erreichen der vorgegebenen Temperaturdifferenz von 5 K
  - 7.3 Volumenstrom der Abgasventilatoren
  - 7.4 Zuluft- und Abgasöffnungen
  - 7.5 Grenzen des berechneten Systems für große beim Brand freigesetzte Wärmeströme

8. Allgemeine Aussagen zu mechanischen Brandschutzeinrichtungen
9. Auswertung der ersten Brandversuch zur Überprüfung der berechneten Auslegungsdaten für kombinierte Abzugssysteme
  - 9.1 Durchgeführte Versuche
  - 9.2 Bewertung der Rechenergebnisse mit den Meßwerten
10. Zusammenfassung
11. Literatur

## FORMELZEICHEN

$C_p$	spezifische Wärme	$\text{kJ/kg K}$
$c$	Geschwindigkeit	$\text{m/s}$
$d$	Durchmesser	$\text{m}$
$D$	Schichtdicke	$\text{m}$
$\dot{m}$	differentieller Massenstrom	$\text{kg/s}$
$\dot{V}$	differentieller Volumenstrom	$\text{m}^3/\text{h}$
$F$	Fläche der Öffnungs- querschnitte	$\text{m}^2$
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
$k$	Brandausbreitungsexponent	$1/\text{s}$
$K$	Konstante, siehe Gleichung (8)	
$\dot{m}$	Massenstrom	$\text{kg/s}$
$\Delta p$	Druckdifferenz	$\text{N/m}^2$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$\text{kW}$
$t$	Temperatur	$^\circ\text{C}$
$\Delta t$	Temperaturdifferenz	$\text{K}$
$T$	Temperatur	$\text{K}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3/\text{s}$
$v$	Verdünnungsfaktor	$(v = V_{\text{BrL}} / V_{\text{Brst}})$
$Z$	Höhe der rauchfreien Zone über der Brandgutoberfläche	$\text{m}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg/m}^3$
$\tau$	Branddauer	$\text{s}$

## INDICES

$a$	aerodynamisch
$Br$	Brandrauch
$L$	Luft
$st$	Strömung
$th$	thermisch
$o$	Anfangszustand
$0$	im Normzustand

# Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im Brandfall für den Personenschutz

## 1. EINLEITUNG

Personenschäden mit Todesfolge im Verlauf eines Brandes sind nach /1/ fast ausschließlich auf die Einwirkung von Brandrauch zurückzuführen und bei kleinen und mittleren Bränden mit geringen Sachschäden im Wohn- und Schlafbereich (Wohnungen, Heimen, Hotels) zu beklagen. Nach der in /2/ aufgestellten Statistik für die Jahre 1979 bis 1985 ist in den USA der Anteil der Personen, die bei einem Brand durch Brandrauch getötet wurden, von 59 % stetig auf 67 % angestiegen.

Aus diesen Angaben folgt, daß das Problem "Brandrauch" eine für die Folgen eines Brandes wesentliche Ursache ist und daß der Einfluß des Brandrauches auf die Personenschäden sehr hoch ist und weiter zunimmt. Dies gilt insbesondere für die immer zahlreicher werdenden großflächigen überdachten Gebäudekonstruktionen, wie z.B. Einkaufszentren, Bürozentren, Ankunftshallen von Flughäfen u.ä., in denen sich sehr viele Personen aufhalten. Im Fall eines Brandes und der dabei entstehenden Rauchentwicklung ergibt sich neben der unmittelbaren Gefährdung durch den Brandrauch auch eine Gefährdung der Personen durch die durch unzureichende Rauchabfuhr hervorgerufene tatsächliche oder vermeintliche Gefährdung auftretenden Panik.

Bei großflächigen überdachten Bereichen, in denen sich viele Personen aufhalten können, sind daher alle Maßnahmen zu ergreifen, durch die im Brandfall eine tatsächliche oder vermeintliche Gefährdung weitgehends ausgeschlossen werden kann. Der Abführung des entstehenden Brandrauches kommt dabei neben anderen Maßnahmen eine besondere Bedeutung zu.

## 2. GEFÄHRDUNG VON PERSONEN DURCH BRANDRAUCH

Die Gefährdung von Personen durch Brandrauch beginnt aufgrund der Untersuchungen von /3/ bereits bei sehr niedrigen Konzentrationen. Die erforderliche Verdünnung des bei verschiedenen Brandstoffen entstehenden Brandrauches, durch die die in /3/ ermittelten Grenzwerte nicht überschritten werden, wurden in den in /4/ genannten Arbeiten untersucht.

Aus diesen Untersuchungen ergibt sich, daß bei einer geringeren Verdünnung von Brandrauch mit Frischluft als im Verhältnis 1 : 1.400 mit einer Gefährdung von Personen zu rechnen ist. Bei der Bewertung des Verdünnungsverhältnisses wird der Anteil von Frischluft auf das bei stöchiometrischer Verbrennung entstehende Brandrauchvolumen bezogen (siehe /4/ Teil 2 und 3).

Durch ein Brandrauch-Luftgemisch mit einem Brandrauchanteil, der oberhalb des o. g. Verdünnungsverhältnisses liegt, wird nach /3/ das physische und psychische Verhalten von Personen verändert. U.a. verringert sich die Gehgeschwindigkeit, die Konzentrationsfähigkeit läßt nach und die Herz- und Atemfrequenz steigt an. Durch die Reizwirkung des Brandrauches verringert sich auch das Sehvermögen, wodurch Rettungshinweisschilder nicht mehr erkannt werden (siehe /4/ Teil 4). Bei weiter steigendem Anteil an Brandrauch in der Luft erfolgt auch bei kurzen Aufenthaltszeiten eine gesundheitliche Gefährdung.

Im Fall einer akuten oder vermeintlichen Gefährdung, die z.B. durch ein Brandrauch-Luftgemisch ausgelöst werden kann, ist auch damit zu rechnen, das sich Personen nicht mehr rational verhalten und sich u.a. bereits gebildeten Gruppen, "die ja wissen wo es lang geht", anschließen (siehe /5/). Bei der Planung und Ausführung aller Brandschutzmaßnahmen ist daher auch das mögliche physiologische Verhalten von Personen mit zu berücksichtigen.

### 3. BRANDGEFAHREN BEI BRÄNDEN IN ATRIUMBAUWERKEN

Brände in Gebäudeteilen, die an ein Atrium angrenzen, unterscheiden sich von Bränden in Gebäudeteilen, die nicht an überdachte Innenhöfe angrenzen, zunächst dadurch, daß der Brandrauch nicht wie bei einem Brand im "Freien" unbegrenzt abziehen kann (siehe Bild 1). Das Problem der Brandübertragung über die Fassade und das Eindringen von Brandrauch in offenen Fenster, die über dem Brandherd liegen, bleibt in beiden Fällen gleich, sofern sich im Atrium das unterhalb des Daches angesammelte Brandrauch-Luftgemisch oberhalb der obersten Fenster befindet (Höhe H1 im Bild 1). Die durch eine Überdachung eines Innenhofes hervorgerufenen brandschutztechnischen Probleme ergeben sich daher aus der Notwendigkeit, das entstehende Brandrauch-Luftgemisch aus dem Atrium so abzuführen, daß es nicht in die an den Innenhof angrenzenden Räume und Rettungswege eindringen kann. Sinkt die Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches unter die Oberkante der obersten Öffnung eines Raumes, z.B. eines Fensters, ab (Höhe H2 im Bild 1), so kann das angestaute Brandrauch-Luftgemisch in die oberhalb H2 liegenden Räume eindringen.

Bei der Beurteilung der Gefährdung durch das sich im Atrium ansammelnde Brandrauch-Luftgemisch ist es wesentlich, wie die am Innenhof liegenden Räume von diesem getrennt sind. Sind z.B. die im Bild 1 dargestellten Räume durch eine massive Wand mit einer ausreichenden Feuerwiderstandsdauer vom Innenhof getrennt, so ergibt sich in diesen Räumen keine Gefahr durch das angesammelte Brandrauch-Luftgemisch. Sind die Räume nur im oberen Teil, z.B. ab der Höhe H3 in Bild 1, vom Innenhof brandschutztechnisch getrennt, so ergibt sich eine Gefährdung durch das Brandrauch-Luftgemisch, wenn die Unterseite unter die Höhe H3 absinkt.

Eine Bewertung der sich in Atrien im Brandfall ergebenden höheren Gefährdung gegenüber einem Brandfall in einem allseitig offenen Bau ist daher nur möglich, wenn die Art der Verbindungsöffnungen der am Innenhof liegenden Räume zu diesen bekannt ist. Um ein

Eindringen des Brandrauch-Luftgemisches in Bereiche, die vom Innenhof aus zugänglich sind, zu vermeiden, muß durch technische Einrichtungen dafür gesorgt werden, daß im Brandfall die Unterseite des sich unter dem Dach ansammelnden Brandrauch-Luftgemisches nicht unter die Oberkante der obersten Öffnung absinkt.

Nach /6/ werden die erforderlichen technischen Maßnahmen, durch die das im Brandfall entstehende Brandrauch-Luftgemisch aus dem Atrium abgeführt wird, nach der Art der Abtrennung der Räume zum Innenhof festgelegt.

#### 4. BEI BRÄNDEN ENTSTEHENDER BRANDRAUCH-LUFTGEMISCH-VOLUMENSTROM

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch steigt aufgrund des thermischen Auftriebes nach oben auf. Dabei wird Luft aus der Umgebung mitgerissen. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch nimmt daher an Volumen zu und kühlt sich ab. Dabei verringert sich auch der thermische Auftrieb. Das Aufsteigen des Brandrauch-Luftgemisches kommt in der Höhe zum Stillstand, in der die umgebende Luft die gleiche Dichte wie das Brandrauch-Luftgemisch hat. Bei der dabei i.d. Regel großen Verdünnung des Brandrauches mit Luft ist dies dann der Fall, wenn die Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches nicht mehr über der Umgebungstemperatur liegt.

Innerhalb eines Atriums gelten für das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch die gleichen Bedingungen wie im Freien, allerdings ist die freie Aufstiegshöhe durch das Dach des Atriums begrenzt. Bei großen Höhen des Atriumdaches über dem Brandherd kann es wie im Freien dazu kommen, daß die Aufstiegshöhe des Brandrauch-Luftgemisches durch die Dichtegleichheit des Brandrauch-Luftgemisches mit der Luft im oberen Teil des Atriums begrenzt wird. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch sammelte sich dann in dieser Höhe.

Der bei Bränden entstehende Brandrauchmassenstrom, der frei über dem Brandherd aufsteigen kann, ist proportional zum freigesetzten Wärmestrom. Aufgrund der Meßergebnisse nach /7/ ergibt sich der nach oben gerichtete Massenstrom über dem Brandherd zu:

$$\dot{m}_{BrL} = 0,21 \left[ \frac{\rho_L^2 \cdot g}{C_{pBrL} \cdot T_L} \right]^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad \text{kg/s} \quad (1)$$

Der Volumenstrom ergibt sich daraus zu:

$$\dot{V}_{BrL} = \dot{m}_{BrL} / \rho_{BrL} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (2)$$

Die Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches ergibt sich für diesen Fall aus Bild 2 nach /7/.

Das frei über dem Brandherd aufsteigen Brandrauch-Luftgemisch vergrößert mit zunehmender Höhe über dem Brandherd stetig seinen Durchmesser. Der sichtbare Durchmesser des Kegels des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches ergibt sich nach /8/ zu

$$d_{BrL} = 0,48 (t_{BrL} / t_L)^{1/2} \cdot z \quad \text{m} \quad (3)$$

oder bei großen Höhen Z zu

$$d_{BrL} = 0,5 \cdot z \quad \text{m.} \quad (4)$$

Innerhalb dieses Kegels des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches herrscht ein Unterdruck gegenüber der Umgebung, durch den Luft aus der Umgebung dem Kegel zu strömt.

Innerhalb eines Atriums ergeben sich durch die räumlich begrenzte Höhe, bis zu der das Brandrauch-Luftgemisch aufsteigen kann, durch den seitlichen Abstand der Gebäude und durch die nicht freie Zuströmung der Luft in das aufsteigende Brandrauch-Luft-

gemisch Bedingungen, unter denen das Brandrauch-Luftgemisch in Räume und Rettungswege eindringen kann.

Erreicht das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch mit einer höheren Temperatur als die der Umgebung das Dach des Atriums, so staut es sich. Das sich anstauende Brandrauch-Luftgemisch hat einen mit der Dicke der angestauten Schicht zunehmenden Überdruck gegenüber der umgebenden Luft. Aus diesem Grund breitet sich das Brandrauch-Luftgemisch unterhalb des gesamten Daches sehr schnell aus und strömt durch Öffnungen im Dach ins Freie ab und/oder dringt durch in den Seitenbegrenzungen vorhandenen Öffnungen in die dahinter liegenden Räume ein.

Die gleichen Auswirkungen wie ein geschlossenes Dach ergeben sich für das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch, wenn dieses auf eine Luftschicht trifft, die die gleiche oder eine niedrigere Dichte wie das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch hat. In diesem Fall ergibt sich wie bei einer Inversionswetterlage eine Sperrschicht für das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch. Unter dieser Sperrschicht staut sich das Brandrauch-Luftgemisch ebenso wie unter einem geschlossenen Dach. Hat die Luft im Atrium oberhalb der Sperrschicht die gleiche Dichte wie die Luft außerhalb des Atriums, so ergibt sich kein thermischer Auftrieb. Beim Öffnen von RWA-Klappe kann daher die Luft im oberen Teil des Atriums und damit auch das entstehende Brandrauch-Luftgemisch nicht abziehen.

Diese Sperrschicht für das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch innerhalb eines Atriums ergibt sich immer dann, wenn die Luft im unteren Teil kälter ist als oben. Dieser Fall kann im Sommer durch eine Kühlung des Atriums, ganz oder nur im unteren Teil, auftreten oder auch allein durch die Erwärmung der Luft im oberen Teil des Atriums und der Außenluft infolge von Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden. Bei der Bewertung der Temperaturdifferenz und der daraus resultierenden Dichtedifferenz muß auch der Einfluß der Feuchtigkeit der Luft auf deren Dichte berücksichtigt werden.

Feuchte Luft hat eine geringere Dichte als trockene Luft. Daraus folgt, das ein Brandrauch-Luftgemisch unter gleichen Bedingungen in trockener Luft höher aufsteigt als in feuchter Luft. Staut sich das Brandrauch-Luftgemisch unterhalb eines Daches, so ist gegenüber trockener Außenluft die thermisch bedingte Druckdifferenz größer als bei feuchter Außenluft. Dadurch werden auch die über die Rauchabzugsöffnungen ausgetauschten Volumenströme beeinflusst.

Um die gleiche thermisch bedingte Druckdifferenz des Brandrauch-Luftgemisch zu gesättigter feuchter Luft zu erhalten, muß die Temperaturdifferenz zwischen dem Brandrauch-Luftgemisch und der Umgebungsluft bei einer Lufttemperatur von 20 °C um ca. 2,5 K und bei 30 °C Lufttemperatur um 4,5 °C höher sein als gegenüber trockener Luft.

Kann Luft nicht symmetrisch dem sich über dem Brandherd bildenden Kegel zuströmen, so verlagert sich die Achse des Kegels auf die Seite, auf der der Zuluftstrom behindert wird. Der Unterdruckbereich des Kegels breitet sich dann in diese Richtung aus.

Erreicht der Kegelmantel eine Fassade, so herrscht in diesem Bereich ebenfalls ein Unterdruck, der sich auch auf die Räume ausdehnt, die Öffnungen in diesem Fassadenbereich haben. Das Brandrauch-Luftgemisch strömt dann in diese Räume ein, wenn ihnen keine Luft in ausreichender Menge zugeführt wird.

Diese Betrachtungen gelten nur solange, wie das Brandrauch-Luftgemisch frei aufsteigen kann und dessen Temperatur über der der Umgebungsluft liegt.

Die in der Gleichung (1) angegebenen Beziehung zwischen dem beim Brand freigesetzten Wärmestrom und dem Brandrauch-Luftgemischmassenstrom gilt nicht, wenn durch den Brand unmittelbar benachbarte Bereiche aufgeheizt werden. Dadurch kühlt sich der beim Brand entstehende Brandrauch stark ab und vom aufgeheizten Bereich

wird i.d. Regel zusätzlicher Rauch abgegeben. In dieser Phase entsteht, wie in /4/ Teil 5 angegeben, ein optisch sehr dichter Brandrauch. Dieses so entstandene Rauchgemisch entspricht bezüglich seines Massenstromes und seiner Temperatur nicht der Beziehung nach Gleichung (1) bzw. dem Bild 2.

## 5. MAßNAHMEN ZUM SCHUTZ VON RÄUMEN UND RETTUNGSWEGEN DES ATRIUMGEBÄUDES GEGEN EINE VERQUALMUNG

### 5.1 Abführung von Brandrauch aus einem Atrium

Im Normalfall wird das sich unterhalb eines Daches angesammelte Brandrauch-Luftgemisch infolge des thermischen Auftriebes über entsprechende Öffnungen im Dach abgeführt. Der thermische Auftrieb ergibt sich zu:

$$\Delta p_{th} = D_{BrL} \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_{BrL}) \quad (5)$$

Kann die Zusammensetzung der Gase, wie z.B. bei großer Verdünnung des Brandrauches, und die Feuchtigkeit vernachlässigt werden, so geht die Gleichung (5) über in:

$$\Delta p_{th} = D_{BrL} \cdot g \cdot \rho_{L0} \cdot (273/T_L - 273/T_{BrL}) \quad (6)$$

Von diesem thermischen Auftrieb muß der durch den Strömungswiderstand des abströmenden Brandrauch-Luftgemisches hervorgerufene Druckverlust

$$\Delta p_{stBrL} = \rho_{BrL}/2 \cdot (\dot{V}_{BrL}/F_{aBrL})^2 \quad (7)$$

und der durch den Strömungswiderstand der zuströmenden Frischluft hervorgerufene Druckverlust

$$\Delta p_{stL} = \rho_L/2 \cdot (\dot{V}_L/F_{aL})^2 \quad (7)$$

aufgebracht werden.

Die durch den thermischen Auftrieb hervorgerufenen Druckdifferenz ist um so kleiner, je geringer die Schichtdicke des Brandrauch-Luftgemisches  $D_{BrL}$  unterhalb des Daches und die Temperaturdifferenz zwischen dem Brandrauch-Luftgemisches ( $t_{BrL}$ ) und der Umgebungsluft ( $t_L$ ) ist.

Die in einem Atrium zulässige Schichtdicke des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb des Daches ist von der Bauausführung abhängig. Die zulässige Schichtdicke  $D_{BrL}$  ist klein, wenn sich bis unterhalb des Daches Öffnungen, Fenster oder offene Gänge befinden. Große Werte können erreicht werden, wenn die an das Atrium angrenzenden Räume dicht abgeschlossen sind und die Wände oder die Verglasung zum Atrium eine ausreichende Feuerwiderstandsdauer aufweisen.

Die Temperaturdifferenz  $t_{BrL} - t_L$  wird bei konstanten Bedingungen durch die Brandintensität und die Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone beeinflusst. Kleine Brandintensitäten und große Höhen  $Z$  ergeben kleine Werte für  $t_{BrL}$ . In klimatisierten Räumen erfolgt bei einem Brand im Sommer die Verbrennung mit Luft, deren Temperatur unter der Außentemperatur liegt. Bei kleinen Brandintensitäten und großen Höhen  $Z$  der rauchfreien Zone liegt daher die Temperatur des Brandrauch-Luftgemisches u.U. nicht über der Außentemperatur. Besonders ungünstige Verhältnisse liegen dann vor, wenn sich durch eine Teilklimatisierung oder durch sonstige Einflüsse innerhalb des Atriums eine Temperaturschichtung mit kalter Luft im unteren Teil einstellt und die Temperatur der Luft im oberen Teil nicht über der Außentemperatur liegt. In diesem Fall kann das in der Anfangsphase eines Brandes entstehende Brandrauch-Luftgemisch nur bis zur Höhe der Sperrschicht, wie in Abschnitt 4 beschrieben, aufsteigen. Der untere Teil des Atriums und die daran angrenzenden Räume reichern sich daher sehr schnell mit Brandrauch an.

Eine weitere Einflußgröße, durch die der thermische bedingte Abzug von Brandrauch beeinflusst wird, ist der Wind. Je nach der Umströmung eines Gebäudes wird durch den Windeinfluß die Abfuhr von Brandrauch über RWA-Öffnungen verstärkt oder unterbunden. Besonders bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen dem Brandrauch-Luftgemisch und der Außenluft ist dieser Einfluß zu beachten. In der Tabelle 1 sind die durch den Auftrieb je m Schichtdicke des Brandrauch-Luftgemisches entstehenden Druckdifferenzen und die durch Wind maximal hervorgerufenen Staudrücke aufgetragen. Diese Tabelle zeigt, daß bei einer Schichtdicke des Brandrauch-Luftgemisches von 4 m und einer Temperaturdifferenz von  $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  eine thermisch bedingte Druckdifferenz von

$$4 * 0,39 \text{ N/m}^2 = 1,56 \text{ N/m}^2$$

ergibt. Der maximale Staudruck von Wind mit einer Stärke von nur 2 Beaufort (ca.  $c = 2,6 \text{ m/s}$ ) liegt aber bereits bei  $4,2 \text{ N/m}^2$ . Bei der Auslegung von Rauchabzugsanlagen für Atriumgebäude ist daher der Einfluß des Windes stets mit zu untersuchen.

Bei der Dimensionierung muß davon ausgegangen werden, daß auch bei kleinen Brandintensitäten, d.h. bei einem geringen freigesetzten Wärmestrom, schon so hohe Brandrauchkonzentrationen auftreten können, daß die zulässige Brandrauchkonzentration in Rettungswegen überschritten wird (siehe /3/). Ein thermischer Auftrieb kann dabei wegen der zuvor erwähnten Einflüsse jedoch nicht zwangsläufig vorausgesetzt werden. Aus diesem Grund ist ein System erforderlich, durch das auch ohne thermischen Auftrieb das bei "kleinen" Brandintensitäten entstehende Brandrauch-Luftgemisch aus dem Atrium entfernt wird. Es muß daher die RWA-Anlage mit einer mechanischen Absaugung des Brandrauch-Luftgemisches kombiniert werden.

5.2 Raucheintritt in die an das Atrium angrenzenden Räume als Folge, daß das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch an der Fassade anliegt.

Um zu verhindern, daß sich das an der Fassade aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch über vorhandene Öffnungen in die angrenzenden Räume oder in die offenen Gänge ausbreitet, muß die Luft, die beim freien Aufstieg des Brandrauch-Luftgemisch von diesem in der jeweiligen Höhe aus der Umgebung mitgerissen wird, diesen Räumen bzw. Fluren zugeführt werden.

Die von einem frei über dem Brandherd aufsteigenden Brandrauch angesaugte Luft kann in Abhängigkeit von der Höhe über dem Brandherd über die Gleichung (1) und (2) berechnet werden.

Nach Gleichung (1) ist

$$\dot{m}_{BrL} = 0,21 \left[ \frac{\rho_L^2 \cdot g}{C_{pBrL} \cdot T_L} \right]^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad \text{kg/s}$$

Für konstante Temperaturen ergibt sich der Faktor

$$K = 0,21 \left[ \frac{\rho_L^2 \cdot g}{C_{pBrL} \cdot T_L} \right]^{1/3} \quad (8)$$

Bei einer Temperaturdifferenz zwischen der Luft und dem Brandrauch-Luftgemisch von 20 °C ergibt sich bei einer Lufttemperatur von 0 °C ein Wert K von 0,0752 und bei einer Lufttemperatur von 30 °C ein Wert K von 0,0680. Bei niedrigen Temperaturen treten danach die höchsten Massenströme auf. Wird mit einem Wert von K = 0,076 gerechnet, so ergibt sich der Massenstrom zu:

$$\dot{m}_{BrL} = 0,076 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (9)$$

Der in der Höhe Z dem aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisch zuströmenden Massenstrom aus der Umgebungsluft entspricht der Änderung des aufsteigenden Massenstromes  $\dot{m}_{BrL}$  des Brandrauch-Luftgemisches. Damit ergibt sich der Zuluftmassenstrom in der Höhe Z:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{BrL} = 0,076 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot 5/3 \cdot Z^{2/3} \cdot dZ \quad \text{bzw.}$$

$$\dot{m}_L = 0,127 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot Z^{2/3} \cdot dZ \quad (10)$$

Der Zuluftvolumenstrom  $\dot{V}_L$  in der Höhe Z ergibt sich mit Gleichung (2) zu:

$$\dot{V}_L = \dot{m}_L / \rho_L \quad (11)$$

Nach diesen Gleichungen sowie mit der Gleichung (3) und der Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches nach Bild 2 sind die in der Tabelle 2 aufgeführten Werte berechnet worden. Sie gelten für das bei einem Brand mit einem freigesetzten Wärme-strom von 5.000 kW aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch.

In Spalte 2 der Tabelle 2 ist in Abhängigkeit von der Höhe Z (Spalte 1) der rauchfreien Zone die Temperatur, in Spalte 3 der in dieser Höhe abzuführende Volumenstrom des Brandrauch-Luftgemisches bei der jeweiligen Temperatur  $t_{BrL}$ , in Spalte 4 der gesamte zuzuführende Zuluftvolumenstrom bei einer Temperatur  $t_L$  von 16 °C, und in Spalte 5 der pro m Höhenänderung in der Höhe Z, von Z - 0,5 m bis Z + 0,5 m, vom aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisch mitgerissenen Luftvolumenstrom  $\dot{V}'_L$  berechnet. Der nach Gleichung (3) berechnete Durchmesser des Brandrauch-Luftgemisch in Spalte 6 gilt nach /8/ für den sichtbaren Bereich des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches. Mit diesem Durchmesser und der Höhendifferenz von 1 m ergibt sich zusammen mit dem pro m Höhendifferenz zuströmenden Luftvolumenstrom  $\dot{V}'_L$  die in Spalte 7 angegebene Zuströmgeschwindigkeit der Luft in den Kegel des

aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches.

Um zu verhindern, daß sich das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch in die an das Atrium angrenzende Räume oder Gänge ausbreitet, muß der Luftvolumenstrom, der nach Tabelle 2, Spalte 5 von dem über dem Brandherd aufsteigenden Brandrauch bei einem unbehinderten Aufsteigen in der jeweiligen Höhe mitgerissen würde, den Räumen oder Gängen im Bereich des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches im Verhältnis des an der Fassade anliegenden Anteils der Kegelfläche zur gesamten Kegelfläche des Brandrauch-Luftgemisches in dieser Höhe zugeführt werden. Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit dieser Luft aus den Räumen oder Gänge in das Atrium muß im Bereich der in der Tabelle 1 angegebenen Werten von ca.  $c_L = 0,5$  m/s liegen.

## 6. KOMBINIERTES ABZUGSSYSTEM FÜR DAS IM BRANDFALL ENTSTEHENDE BRANDRAUCH-LUFTGEMISCH

### 6.1 Unzureichende Funktionsfähigkeit der RWA-Anlagen bei "kleinen" Bränden

In der Regel wird jeder Brand klein beginnen. Seine Ausbreitung bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Auswirkung auf das im Umfeld des Brandherdes vorhandene Material ist i.a. nicht vorhersehbar. Durch eine vorhandene Sprinkleranlage wird ein Brand auf ein ebenfalls nicht genau vorhersehbares Maß in seiner Ausbreitung begrenzt und/oder die beim Auslösen des Sprinklers vorhandene Brandintensität wird verringert.

Aufgrund der genannten Ereignisse muß daher in jedem Fall bei einem Atrium davon ausgegangen werden, daß Brandfälle auftreten, bei denen ein Rauchabzug mit Hilfe des thermischen Auftriebes (RWA-Anlagen) nicht bzw. nicht in ausreichendem Maße erreicht wird. Diese Situation tritt im Anfangsstadium eines Brandes auf,

in dem die Personen den gefährdeten Bereich verlassen müssen. Es ist daher in jedem Einzelfall zu prüfen, welche Auswirkung eine Verqualmung insbesondere des unteren Bereiches auf die Sicherheit bei der Räumung hat. Dabei ist zu berücksichtigen, daß überdachte Innenhöfe auch entgegen der ursprünglich angegebenen Nutzung für Vorträge, Aufführungen und Ausstellungen genutzt werden und sich in diesem Fall eine sehr große Anzahl von Personen dort aufhält. In diesen Fällen ist es daher erforderlich, das Brandrauch-Luftgemisch mit einem mechanischen Abzugssystem abzusaugen. Das mechanische Abzugssystem ist zusätzlich mit einer RWA-Anlage für hohe Brandrauch-Luftgemischvolumenströme bei großen Brandintensitäten, bei denen ein ausreichender thermischer Auftrieb vorhanden ist, zu kombinieren.

Bei einem kombinierten Abzugssystem für das im Brandfall entstehende Brandrauch-Luftgemisch wird in der Anfangsphase eines Brandes das entstehende Abgas (Brandrauch-Luftgemisch) sowie die als Sperrschicht unterhalb des Daches wirkende Luft durch Ventilatoren mechanisch abgesaugt. Hat das sich unterhalb der Decke ansammelnde Brandrauch-Luftgemisch eine Temperatur erreicht, die deutlich über der Außentemperatur der Luft liegt, z.B. eine Temperaturdifferenz von 5 K, so werden diese Ventilatoren, im folgenden als Abgasventilatoren bezeichnet, abgeschaltet und entsprechende Abgasöffnungen (RWA-Klappen) geöffnet. Die erforderlichen Zuluftöffnungen werden mit dem Einschalten der Abgasventilatoren vollständig geöffnet. Die Temperaturdifferenz, bei der die Umschaltung erfolgt, hat einen wesentlichen Einfluß auf die Auslegung und muß in jedem Einzelfall aufgrund der örtlichen und baulichen Verhältnisse festgelegt werden.

Die Vorteile dieses kombinierten Abzugssystems sind folgende:

Das Brandrauch-Luftgemisch wird unabhängig von der Brandintensität und den zum Zeitpunkt des Brandausbruchs herrschenden Temperaturverhältnissen abgeführt.

Die Abgasventilatoren sind nur für den Volumenstrom auszuliegen, bei dem noch kein ausreichender thermischer Auftrieb vorhanden ist.

Bezüglich der Temperaturfestigkeit der Abgasventilatoren werden keine Anforderungen gestellt.

Die bei einem ausgedehnten Brand auftretenden hohe Brandrauch-Luftgemisch-Volumenströme mit Temperaturen, die wesentlich über der Außentemperatur liegen, werden über RWA-Öffnungen abgeführt.

Bei einem Fehlalarm tritt keine größere Störung im Atrium auf, da nur die Abgasventilatoren eingeschaltet und die Zuluftöffnungen geöffnet werden. Die RWA-Klappen bleiben geschlossen. Witterungsbedingte Störungen von z.B. Ausstellungen im Atrium durch Regen u.a. treten dabei nicht auf.

## 6.2 Auslegung eines kombinierten Abzugssystems

Die Auslegung eines kombinierten Abzugssystems richtet sich nach der erforderlichen Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone, der Wärmeabfuhr des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches an das Gebäude sowie nach dem maximal bei einem Brand in dem Atrium freigesetzten Wärmestrom. Eine weitere Einflußgröße ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

Im Folgenden sind für ein angenommenes Atrium in Abhängigkeit von der Höhe der rauchfreien Zone  $Z$  die Absaugleistung der Abgasventilatoren sowie die Größe der Zuluft- und Abgasöffnungen berechnet worden.

Für die Berechnung wurde angenommen, daß das Gebäude 75 m lang und 35 m breit ist. Die Höhe des Gebäudes variiert. Sie ergibt sich aus der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone und der Dicke  $D_{BrL}$  des

Brandrauch-Luftgemisches, das sich unterhalb des Daches ansammelt. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch breitet sich gleichmäßig unterhalb des Daches aus und gibt auf der vom Brandrauch-Luftgemisches beaufschlagten Fläche Wärme an das Bauwerk ab. Das aufsteigende Brandrauch-Luftgemisch vermischt sich mit dem unterhalb der Decke bereits angesammelten Brandrauch-Luftgemisch und nimmt eine mittlere Mischungstemperatur an. Die Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches ändert sich entsprechend dem beim Brand freiwerdenden Wärmestrom und der jeweiligen Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone.

Es wurde weiter angenommen, daß sich der Brand entsprechend der Beziehung

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot e^{kT} \quad (12)$$

ausbreitet. Dabei wurde für den Entstehungsbrand ein freigesetzter Wärmestrom von  $\dot{Q}_0 = 100$  kW angenommen. Die Brandausbreitung wird dabei zunächst so begrenzt, daß der maximale Wärmestrom 5.000 kW beträgt. Als Exponent  $k$  wurde der bei Zimmerbrandversuchen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ermittelte Wert von 0,0083 1/s eingesetzt. Damit ergibt sich der beim Brand freigesetzte Wärmestrom in Abhängigkeit von der Branddauer zu:

$$\dot{Q} = 100 \cdot e^{0,0083T} \text{ kW} \quad (13)$$

Die Ventilatoren saugen das entstehende Brandrauch-Luftgemisch solange ab, bis die Temperatur des sich unterhalb des Daches angesammelten Brandrauch-Luftgemisches um 5 K über der Umgebungstemperatur liegt. Danach werden die Ventilatoren abgeschaltet und die RWA-Klappen öffnen.

Im Bild 3 ist die Brandausbreitung, dargestellt durch den beim Brand freigesetzten Wärmestrom  $\dot{Q}$ , über der Branddauer aufgetragen. Es handelt sich hierbei um eine relativ langsame Brandaus-

breitung, die hohe Abgasvolumenströme der Abgasventilatoren ergibt. Bei einer schnelleren Brandausbreitung sind die abzusaugenden Volumenströme etwas geringer.

Im Bild 4 ist über der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone der beim Brand freigesetzte Wärmestrom  $\dot{Q}$  (Kurven 1) entsprechend Gleichung (13) und die Branddauer (Kurven 2) aufgetragen, bei dem die Temperaturdifferenz von 5 K für  $D_{BrL}$  von 1 m, 2 m und 4 m gerade erreicht wird.

Im Bild 5 sind die erforderlichen Volumenströme der Abgasventilatoren (Kurven 1) und die erforderlichen geometrischen Querschnittsflächen der Zuluft- und Abgasöffnungen (Kurven 2) in Abhängigkeit von der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone bei den angenommenen Schichtdicken  $D_{BrL}$  des sich unterhalb des Daches angesammelten Brandrauch-Luftgemisches von 1 m, 2 m und 4 m aufgetragen.

## 7. BEWERTUNG DER AUSLEGUNGSDATEN

Die in den Bildern 4 und 5 aufgetragenen Werte gelten nur für die hier vorgegeben Randbedingungen. Der Einfluß anderer Randbedingungen auf die Ergebnisse, z.B. eine stärkere Wärmeabfuhr des Brandrauch-Luftgemisches an das Gebäude oder an andere Einrichtungsteile, kann nur im Zusammenhang mit allen bei diesem Problem vorliegenden Einflußgrößen beurteilt werden.

### 7.1 Temperaturdifferenz zwischen dem Brandrauch-Luftgemisch unterhalb des Daches und der Außentemperatur

Ein wesentliches Kriterium für die Rechenergebnisse ist die Festlegung der Temperaturdifferenz zwischen dem Brandrauch-Luftgemisch unterhalb des Daches und der Außentemperatur, bei der vom mechanischen Absaugsystem auf das RWA-System umgeschaltet wird. Bei den hier durchgeführten Berechnungen wurde eine Temperatur-

differenz von 5 K festgelegt. Wird die Temperaturdifferenz kleiner angesetzt, so wird auch die Absaugleistung der Abgasventilatoren kleiner. Gleichzeitig muß aber die Querschnittsfläche der Zuluft- und Abgasöffnungen infolge des dann geringeren thermischen Auftriebs vergrößert werden. Umgekehrte Folgen hat eine Vergrößerung der Temperaturdifferenz.

Alle vom Brandrauch-Luftgemisch abgegebenen Wärmeströme bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperaturdifferenz zur Außenluft müssen bei der Berechnung berücksichtigt werden. Dazu gehört auch die Wärmemenge, die zum Erwärmen der Luft im Atrium erforderlich ist, wenn diese bei Ausbruch eines Brandes unter der der Außenluft liegt.

### 7.2 Branddauer und freigesetzter Wärmestrom beim Erreichen der vorgegebenen Temperaturdifferenz von 5 K

Wie Bild 4 zeigt, ist der freigesetzte Wärmestrom (Kurven 1) und die Branddauer (Kurven 2) beim Erreichen der Temperaturdifferenz von 5 K bei gleicher Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone von der Dicke der Schicht des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb des Daches abhängig. Bei einer Höhe  $Z$  von 10 m beträgt die Branddauer (Kurven 2) je nach der Dicke der Schicht  $D_{BrL}$  3,7 min bis 4,8 min. Bei einer Höhe  $Z$  von 20 m sind die entsprechenden Zeiten auf 6,5 min bzw. 7,1 min angestiegen. Die diesen Werten entsprechenden, beim Brand freigesetzten Wärmeströme  $\dot{Q}$  betragen 630 kW und 1130 kW bzw. 2440 kW und 3360 kW (Kurven 1).

### 7.3 Volumenstrom der Abgasventilatoren

Der erforderliche Volumenstrom der Abgasventilatoren ist im Bild 5, Kurven 1, über der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone aufgetragen. Daraus ergibt sich, daß der Volumenstrom mit zunehmender

Höhe  $Z$  überproportional ansteigt. Dies ist im wesentlichen auf den ansteigenden Massenstrom  $\dot{m}_{BrL}$  in Abhängigkeit von der Höhe  $Z$  mit der Potenz 1,67 nach Gleichung (1) zurückzuführen. Gleichzeitig steigt auch die Branddauer bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von 5 K an, sodaß der Wert von  $\dot{Q}$  (siehe Bild 3), und damit ebenfalls  $\dot{m}_{BrL}$ , ansteigt. Da der Wert von  $\dot{Q}$  mit der Potenz 0,33 in den Massenstrom  $\dot{m}_{BrL}$  nach Gleichung (1) eingeht, ist dieser Anteil jedoch von wesentlich geringerem Einfluß als die Höhe  $Z$ .

Bei Werten der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone unterhalb von 18 m ist der erforderliche Volumenstrom der Abgasventilatoren bei höheren Werten für  $D_{BrL}$  kleiner. Liegt der Wert der Höhe  $Z$  über 18 m, dann ist bei hohen Werten von  $D_{BrL}$  auch ein etwas höherer Abgasvolumenstrom der Ventilatoren erforderlich. Bei einem Wert der Höhe  $Z$  von 9 m ist bei einem Wert von  $D_{BrL}$  größer 1 m ein Abgasventilator nicht erforderlich.

Die im Bild 5 dargestellten Abgasvolumenströme gelten nur dann, wenn sich der Brand entsprechend der Gleichung (13) ausbreitet und dabei auch den nach Bild 4 entsprechend der Höhe  $Z$  aufgetragenen Wärmestrom erreicht. Wird dieser Wärmestrom nicht erreicht oder breitet sich ein Brand langsamer als nach Bild 3 aus, so müssen die Abgasventilatoren für Volumenströme ausgelegt werden, die um ca. 10 % über den für  $D_{BrL} = 1$  m angegebenen Werten liegen.

#### 7.4 Zuluft- und Abgasöffnungen

Im Bild 5 sind zusätzlich zu den Volumenströmen der Abgasventilatoren die ermittelten geometrischen Querschnittsflächen der Zuluft- und Abgasöffnungen über der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone aufgetragen (Kurven 2). Diese geometrischen Querschnittsflächen der Zuluft- und Abgasöffnungen sind als gleich groß angenommen worden. Für die Zuluftöffnung wurde ein Strömungsbeiwert von 0,6

und für die Abgasöffnung (RWA) ein Strömungsbeiwert von 0,8 bei der Berechnung angesetzt. Die Flächen wurden so festgelegt, daß sich nach dem Abschalten der Ventilatoren die Höhe Z der rauchfreien Zone nicht vermindert.

#### 7.5 Grenzen des berechneten Systems für große beim Brand freigesetzte Wärmeströme

Über diese nach Abschnitt 7.4 ermittelten und in Bild 5 aufgetragenen geometrischen Öffnungsquerschnitte für die Zuluft und die Abgase kann durch den thermischen Auftrieb das bei Bränden entstehende Brandrauch-Luftgemisch unter Einhaltung der jeweils geforderten Höhe Z der rauchfreien Zone auch bei wesentlich größeren beim Brand freigesetzten Wärmeströmen als 5.000 kW abgeführt werden.

Kann sich ein Brand weiter als in Abschnitt 6.2 angegeben ausbreiten, so wird auch dabei die Höhe Z der rauchfreien Zone eingehalten, wenn der dabei freigesetzte Wärmestrom einen von der Dicke  $D_{BrL}$  abhängigen Wert nicht überschreitet.

Bei allen drei bei den hier durchgeführten Berechnungen angenommenen Werten für  $D_{BrL}$  von 1 m, 2 m und 4 m kann das bei Bränden mit einem freigesetzte Wärmestrom bis 50.000 kW entstehende Brandrauch-Luftgemisch über den thermischen Auftrieb abgeführt werde. Bei einem Wert von  $D_{BrL}$  von 1 m kann ab einer Höhe Z der rauchfreien Zone von 18 m das bei einem Brand bis zu einem freigesetzte Wärmestrom von 200.000 kW entstehende Brandrauch-Luftgemisch abgeführt werden. Bei  $D_{BrL}$  von 2 m kann der freigesetzte Wärmestrom schon ab einem Wert Z von 14 m und für  $D_{BrL} = 4$  m ab  $Z = 12$  m bis auf 200.000 kW ansteigen. Die rauchfreie Zone kann bei diesem hohen Wärmestrom von 200.000 bis zu einem Wert von  $Z = 28$  m eingehalten werden.

Für die Auslegung von Lüftungsanlagen zur Rauchfreihaltung von Atriumgebäuden sind daher nicht die bei großen Bränden entstehenden Abgasvolumenströme maßgebend, sondern die bei einem Entstehungsbrand anfallenden Brandrauch-Luftgemischvolumenströme und die dabei vorhandenen Verhältnisse bezüglich des thermischen Auftriebes. Dies gilt insbesondere deswegen, da über die Brandausbreitung und besonders über die durch ausgelöste Sprinkler begrenzte Brandausbreitung keine Aussagen bezüglich der dabei auftretenden Abgasvolumenströme und deren Temperaturen möglich sind.

#### 8. ALLGEMEINE AUSSAGEN ZU MECHANISCHEN BRANDSCHUTZEINRICHTUNGEN

Bei der Planung von mechanischen Brandschutzeinrichtungen zum Schutz von Personen vor den Auswirkungen eines Brandes ist stets eine ausführliche Analyse aller möglichen Gefahrenquellen durchzuführen. Dabei sind auch die Folgen von Änderungen der z.Zt. vorhandenen Risiken zu erfassen. Aktuelles Beispiel ist die Verwendung von Kunststoffteilen ohne Brandschutzausrüstung, um diese Kunststoffe besser recyceln zu können. Nur mit gesicherten Ausgangsdaten ist eine sinnvolle Berechnung möglich.

Alle Brandschutzmaßnahmen sind so auszuführen, daß die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahmen möglichst kurz ist. Dazu gehört vor allen Dingen eine frühestmögliche Brandmeldung.

Durch die Brandmeldung werden von der Brandmeldezentrale aus die vorhandenen Einrichtungen angesteuert. Zwischen der Ansteuerung der ersten Einrichtung und dem Erreichen der vollen Wirksamkeit aller Anlagen ist eine längere Zeit erforderlich, da mechanisch betätigte Klappen u.ä. Stellzeiten zum Öffnen oder Schließen benötigen und einige Schaltungen erst nacheinander ablaufen können. Auch diese Zeitdauer zwischen dem ersten Schaltimpuls und dem Erreichen der vollen Wirksamkeit aller Schutzsysteme muß, z.B. durch schnelle Stellantriebe, so kurz wie möglich gehalten werden.

Ein weiterer Faktor, der ebenfalls zu einer verspäteten Auslösung führt, sind Brandmelder, die zur Verringerung von Fehlalarmen auf einen hohen Schwellenwert eingestellt sind. Ein Brand wird dadurch erst gemeldet, wenn er sich bereits weiter ausgebreitet hat. Diese Zeitverzögerung kann für Personen schon zu einer erheblichen Gefährdung führen, da z.B. bei Flüssigkeitsbränden sofort Brandrauch mit einer hohen optischen Dichte entsteht. Auch durch das Einmischen des entstehenden Brandrauches in ein großes Luftvolumen werden innerhalb von wenigen Sekunden die zulässigen Grenzwerte überschritten, wie die Versuche nach /9/ zeigten.

Um die Zeit bis zur vollen Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und gleichzeitig die Folgen einer Fehlalarmlösung zu verringern, wird das im Folgenden aufgeführte Grundkonzept für ein Brandschutzsystem empfohlen.

Beim Ansprechen eines sehr empfindlich eingestellten Brandmelders werden bereits diejenigen Funktionen des Brandschutzsystems ausgelöst, die zu keiner wesentlichen Störung des normalen Betriebsablaufes führen, wie z. B. das Betätigen der Zu- und Abluftklappen für die Klimaanlage und der Zuluftöffnungen in das Atrium sowie das Schließen von mechanisch offengehaltenen Türen. Das Zuschalten von besonderen Lüftungsanlagen, z.B. für Überdrucksysteme, sofern sie nicht bereits vorher ohne eine Störung des Betriebsablaufes erfolgen kann, und eine im Brandfall erforderliche Betriebsunterbrechung erfolgen zusammen mit der allgemeinen Brandalarmierung der im Gebäude befindlichen Personen erst beim Auslösen eines zweiten auf den normalen Wert eingestellten Brandmelders. Je nach der Art der Brandmeldeanlage ist die erste Stufe der Brandschutzsysteme auch beim Ansprechen des 1. Melders eines Mehrschleifensystems oder bei einer geringen Erhöhung der Normalwerte bei einer rechnergesteuerten Brandmeldeanlage auszulösen.

Durch diese Systeme wird verhindert, daß der insbesondere bei Flüssigkeitsbränden in der Anfangsphase eines Brandes entstehende Brandrauch in die durch mechanische Brandschutzeinrichtungen

geschützte Bereiche eindringt, bevor diese Systeme voll betriebsbereit sind bzw., im Fall der Druckänderungen, ihren Endwert erreicht haben.

Bei allen technischen Anlagen ist deren Störanfälligkeit mit zu betrachten. Im Fall einer technischen Störung müssen diese Anlagen in einen Grundzustand gehen, der noch eine möglichst hohe Restschutzfunktion erfüllt. Es dürfen die Verhältnisse in den zu schützenden Bereichen in keinem Fall schlechter werden, als wenn diese Anlage nicht vorhanden wäre. Dies gilt besonders dann, wenn Anlagen sich gegenseitig beeinflussen und z.B. ihre Volumenströme in Abhängigkeit voneinander geregelt werden müssen. Beim Ausfall z.B. dieser Regelung müssen die beiden getrennten Anlagen in eine Grundstellung gehen, die noch einen möglichst hohen Personenschutz gewährleistet. Es darf z.B. durch den Ausfall der Regelung die Druckdifferenz an Türen nicht über den zulässigen Wert von  $50 \text{ N/m}^2$  ansteigen, damit die Tür auch von schwächeren Personen und Kindern noch geöffnet werden kann.

## 9. AUSWERTUNG DER ERSTEN BRANDVERSUCHE ZUR ÜBERPRÜFUNG DER BERECHNETEN AUSLEGUNGSDATEN FÜR KOMBINIERTER ABZUGSSYSTEME

Die zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Brandgasabsaugsystems der neuen Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brandversuche haben bereits einige Ergebnisse geliefert, mit denen die berechneten Auslegungsdaten für kombinierte Abzugssysteme überprüft werden können.

### 9.1 Durchgeführte Versuche

In der neuen Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik, deren Hauptabmessungen in den Bildern 6 und 7 angegeben sind, wurde Holz in Form von Holzkrippen abgebrannt.

Die bei den Brandversuchen entstehenden Brandgase sammelten sich im oberen Teil der Halle und wurden über Öffnungen in den beiden Absaugrohren abgesaugt. Zuluft wurde über die im Boden eingelassenen Zuluftkanäle (siehe Bilder 6 und 7) angesaugt.

Bei den hier zur Überprüfung der berechneten Auslegungsdaten herangezogenen Versuche wurde bei dem ersten Versuch 100 kg Holz, das in Form einer Holzkrippe aufgebaut war, in dem in den Bildern 6 und 7 eingezeichneten Brandraum abgebrannt. Bei diesem Versuch war der Brandraum oben offen, sodaß die Brandgase frei nach oben aufsteigen konnten. Aus der Halle wurde während dieses Versuches ein Volumenstrom abgesaugt, der zwischen 25.000 m<sup>3</sup>/h und 35.000 m<sup>3</sup>/h, bezogen auf den Normzustand, variiert wurde.

Berechnet wurde mit der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Methode die Lage der Unterseite des sich in der Versuchshalle ansammelnden Brandrauch-Luftgemisches und dessen Temperatur in Abhängigkeit von der Branddauer bei einem angenommenen mittleren abgesaugten Volumenstrom aus der Halle von 30.000 m<sup>3</sup>/h bezogen auf den Normzustand. Um einen direkten Vergleich mit der beobachteten Absenkung des Brandrauch-Luftgemisches innerhalb der Halle zu erhalten, wurde der beim Brand freigesetzte Wärmestrom aus der bei dem Versuch gemessenen zeitlichen Massenänderung ermittelten Massenverlustrate berechnet. Da das Dach der Versuchshalle hermetisch dicht ist und das Brandrauch-Luftgemisch nur mechanisch abgesaugt werden kann, wurde bei der durchgeführten Berechnung für die Verhältnisse in der Versuchshalle die Fläche der Abgasöffnung (RWA-Klappen) im zuvor benutzten Rechenprogramm (siehe Abschnitt 6.2) mit Null angesetzt. Die Absenkung der Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches in Abhängigkeit von der Branddauer wurde aus der Auswertung von Videoaufzeichnungen ermittelt.

Im Bild 8 sind die berechneten Werte und die beobachtete Lage der Unterseite des Brandrauch-Luftgemisch über der Branddauer aufgetragen.

Im Bild 9 sind die entsprechenden Daten für einen zweiten Versuch mit 400 kg Holz wiedergegeben. Bei diesem Versuch war über den in Bild 7 eingezeichneten Brandraum eine Decke aufgelegt worden, sodaß der Brandrauch unter der Decke entlang zog und am vorderen Ende erst nach oben in die Halle aufsteigen konnte. Der aus der Halle abgesaugte Volumenstrom betrug bei Versuchsbeginn 42.000 m<sup>3</sup>/h. Infolge der steigenden Temperatur des abgesaugten Brandrauch-Luftgemisches sank der auf den Normzustand bezogenen Volumenstrom auf ca. 37.000 m<sup>3</sup>/h bis zur Versuchszeit von 7 min ab. Bei der Versuchszeit von 7 min 30 s wurde der Volumenstrom auf 35.000 m<sup>3</sup>/h gedrosselt und ab der Versuchszeit von 10 min auf 39.000 m<sup>3</sup>/h erhöht. Diese Veränderungen des abgesaugten Volumensstromes aus der Halle sind bei der Berechnung in Bild 9 nicht berücksichtigt worden. In diesem Bild wurde mit einem konstanten Wert für den abgesaugten Volumenstrom des Brandrauch-Luftgemisch von 38.000 m<sup>3</sup>/h gerechnet. Die beobachtete Lage der Unterseite des sich in der Halle ansammelnden Brandrauch-Luftgemisches wurde ebenfalls mit in das Bild 9 eingetragen. In Bild 9 wurde auch die an einer Stelle gemessenen Temperatur des Brandrauch-Luftgemisches im Vergleich zu der berechneten Temperatur eingetragen. Die Temperaturmeßstelle befand sich vor einer Öffnung in den unterhalb des Daches der Versuchshalle verlegten Rohren (siehe Bild 7), über die die Abgase aus der Halle angesaugt werden.

Der Vergleich der beobachteten Lage der Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches in Abhängigkeit von der Branddauer mit den berechneten Werten führt zu den folgenden Feststellungen:

In beiden Fällen senkte sich das Brandrauch-Luftgemisch langsamer ab als es den berechneten Werten entspricht. Beim Abbrand von 100 kg Holz erreicht die Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches nach einer Branddauer von ca. 6 min die minimale Höhe der rauchfreien Höhe von ca. 5,9 m. Da sich das Brandgut 0,5 m über dem Hallenboden befand, betrug die Höhe  $Z = 5,5$  m. Der berechnete Wert  $Z$  lag mit 4,4 m um 1,1 m niedriger als der beobachtete Wert.

Die Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches hat sich bei diesem ersten Versuch, bei dem der Brandrauch frei über dem Brandherd aufsteigen konnte, nicht soweit abgesenkt, wie es der Berechnung entsprach.

Beim zweiten Versuch, Abbrand von 400 kg Holz, bei dem der Brandrauch nicht senkrecht über dem Brandgut aufsteigen konnte, ergab sich bis zur Reduzierung des Absaugvolumenstromes unter Berücksichtigung der Veränderung der tatsächlichen Absaugleistung gegenüber der bei der Berechnung angesetzten Absaugleistung etwa die gleiche Höhe  $Z$  von ca. 3,8 m für die Berechnung und die Beobachtung. Nach der Reduzierung des Absaugvolumenstromes sank die Unterseite des Brandrauch-Luftgemisches um ca. 0,5 m unter den berechneten Wert ab.

Bei beiden Versuchen wurde beobachtet, daß eine längere Zeit als berechnet erforderlich ist, um das Brandrauch-Luftgemisch wieder vollständig aus der Halle abzusaugen (siehe die Bilder 8 und 9).

Die bei dem zweiten Versuch gemessenen Temperaturen erreichten mit 223 °C den berechneten Wert. Das Maximum der Temperatur wurde jedoch um etwa 6 min später erreicht, als es der Berechnung entsprach.

## 9.2 Bewertung der Rechenergebnisse mit den Meßwerten

Die Bewertung der Rechenergebnisse mit den bei den ersten vorläufigen Versuchen erhaltenen Meßergebnissen ergibt folgende Aussagen.

Der berechnete abzusaugende Volumenstrom des Brandrauch-Luftgemisches entspricht etwa dem gemessenen Volumenstrom. Die berechnete Temperatur des sich unterhalb des Daches ansammelnden Brandrauch-Luftgemisches kann aufgrund dieser Versuche nicht in ihrem zeitlichen Verlauf bewertet werden, da nur eine Meßstelle

vorhanden war, aus der nicht auf eine räumliche Verteilung und dem zeitlichen Anstieg an verschiedenen Stellen unter dem Hallendach geschlossen werden kann. Lediglich bezüglich des an der einen Stelle gemessenen Maximalwertes kann festgestellt werden, daß dieser mit dem berechneten Wert übereinstimmt.

Die bei diesen Vorversuchen erhaltenen Erkenntnisse werden bei den folgenden Versuchen berücksichtigt. So werden an ca. 40 Stellen unterhalb des Hallendaches Temperaturen und an 12 Stellen die CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen, um eine Aussage über die Temperaturverteilung und das Mischungsverhältnis des Brandrauches mit der Luft sowie ihren zeitlichen Verlauf zu ermöglichen.

#### 10. ZUSAMMENFASSUNG

Personenschäden mit Todesfolge im Verlauf eines Brandes sind fast ausschließlich auf die Einwirkung von Brandrauch zurückzuführen und bei kleinen und mittleren Bränden mit geringen Sachschäden im Wohn- und Schlafbereich (Wohnungen, Heimen, Hotels) zu beklagen.

Das Problem "Brandrauch" ist eine für die Folgen eines Brandes wesentliche Ursache und der Einfluß des Brandrauches auf die Personenschäden ist sehr hoch und weiter ansteigend. Dies gilt insbesondere für die immer zahlreicher werdenden großflächigen überdachten Gebäudekonstruktionen, wie z.B. Einkaufszentren, Bürozentren, Ankunftshallen von Flughäfen u.ä., in denen sich sehr viele Personen aufhalten. Bei großflächigen überdachten Bereichen, in denen sich viele Personen aufhalten können, sind daher alle Maßnahmen zu ergreifen, durch die im Brandfall eine tatsächliche oder vermeintliche Gefährdung weitgehendst ausgeschlossen werden kann. Der Abführung des entstehenden Brandrauches kommt dabei neben anderen Maßnahmen eine besondere Bedeutung zu.

In der Entstehungsphase eines Brandes sowie bei einer durch eine Sprinkleranlage begrenzten Brandausbreitung und bei hohen rauchfrei zu haltenden Zonen ergeben sich Probleme mit der Abfuhr des entstehenden Brandrauch-Luftgemisches aufgrund des geringen bzw. nicht vorhandenen thermischen Auftriebs. Für diese Fälle wird ein aus Abgasventilatoren und herkömmlicher, durch thermischen Auftrieb wirksame RWA-Anlage bestehendes "kombiniertes Abzugssystem" vorgestellt. Die Auslegung dieses Systems wird erläutert und die Auslegungsdaten berechnet sowie die Berechnungsmethode durch erste Versuchsergebnisse untermauert.

10. LITERATUR

- /1/ Klingsohr, K:  
Brandrauch- Einsatzerfahrungen der Feuerwehr  
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung  
(1987) H. 3, S. 91-95
- /2/ Harwood, B and John R.H. Jr.  
What kills in fires: Smoke inhalation or burns?  
Fire-Journal (1989) H. (Mai/June) S. 29-34
- /3/ Jin, T.: Studies of emotional instability in smoke from  
fires  
Journal of Fire and Flammability  
Vol. 12 (1981) April, S. 130-142
- /4/ John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme  
zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die Gesund-  
heit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewähr-  
leistendes Maß  
Teil 1: Planung und Bau der Versuchseinrichtung  
Forschungsbericht Nr. 46, März 1982  
  
Teil 2: Optische Brandrauchdichte  
Forschungsbericht Nr. 50, Dezember 1983  
  
Teil 3: Optische Brandrauchdichte  
Forschungsbericht Nr. 59, Januar 1987  
  
Teil 4: Brandrauch und Sichtbarkeit von Hinweis-  
schildern in Rettungswegen  
Forschungsbericht Nr. 66, Mai 1988

Teil 5: Brandversuche im natürlichen Maßstab zur Beurteilung der entstehenden Brandrauchkonzentrationen und deren Abbau sowie die daraus resultierenden Maßnahmen zum Schutz von Rettungswegen  
Forschungsbericht Nr. 75, September 1990

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

/5/ Bodamer, M. Dombrowsky, W. und Schuh, H.

Das Verhalten von Menschen bei Gebäudebränden  
Teil 1: Literaturlauswertung  
Forschungsbericht Nr.: 60, April 19087

Teil 2: Literaturlauswertung

Forschungsbericht Nr.: 61, September 1987

Das Verhalten von Menschen bei Bränden. Technische Determinanten des Verhaltens von Bränden. Einladung zum Umdenken.

Forschungsbericht Nr.: 63, März 1988

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

/6/ Barnfield, W. und Foster, H.:

Atriumbuildings: Background to the draft British Standard Code

Fire Surveyor, April 1991, S. 16-21

/7/ Tanaka, T. und Yamana, T.:

Smoke control in large scale space

Teil 1: Analytic theories for simpel control problems

Fire Science and Technology

Vol.5 ( 1985 ), No 1, S.31 - 40

Teil 2: Smoke control experiments in a large scale space

Fire Science and Technology

Vol.5 ( 1985 ), No 1, S.41 - 53

/8/ Cooke, G.

Meeting the fire safety design requirements of modern buildings

Fire Surveyour, Vol. 15 (1986), No. 3,

S. 16 - 28

/9/

Brandversuche am HDR:

VFDB-Zeitschrift 35(1986), H. 3,

Müller K.

Versuchsaufbau und eingesetzt Meßtechnik S.100-102

Dobbernack, R.

Ergebnisse und theoretische Begleitung der

Versuche S. 102-107

John, R.

Ergebnisse der Rauchgasverteilung und -konzentration S. 107-111

Tabelle 1: Thermische Druckdifferenz für  $D_{BrL} = 1 \text{ m}$   
und Staudruck durch Wind

berechnet für  $t_L = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta P_{th} = D_{BrL} \cdot g \cdot \rho_{L0} \cdot (273/T_L - 273/T_{BrL}) \text{ N/m}^2$$

$$\Delta t = T_{BrL} - T_L$$

$\Delta t$	K	1	2	4	10	50	100	200
$\Delta P_{th}$	$\text{N/m}^2$	0,04	0,08	0,16	0,40	1,77	3,08	4,90

Windstärke nach Beaufort B,  
mittlere Windgeschwindigkeit c in m/s  
Staudruck  $\Delta p$  in  $\text{N/m}^2$

B	1	2	3	4	5	6	8	10	12
c	0,7	2,6	4,3	6,4	8,7	11	17	23	29
$\Delta p$	0,3	4,1	11	25	46	74	176	323	514

Tabelle 2: Werte des über einem Brandherd mit einer Wärme- freisetzung von 5.000 kW aufsteigenden Brandrauch- Luftgemisches in Abhängigkeit von der Höhe Z der rauchfreien Zone

Höhe Z	$t_{BrL}$	$\dot{V}_{BrL}$	$\dot{V}_L$	$\dot{V}_L'$	$d_{BrL}$	$c_L$
m	°C	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s m	m	m/s
4	516	29,5	10,8	4,5	3,1	0,46
6	286	41,3	21,4	5,9	4,0	0,47
8	176	53,8	34,6	7,2	4,8	0,48
10	120	68,5	50,1	8,3	5,6	0,47
12	88	85,3	68,2	9,5	6,4	0,47
14	68	104,2	88,2	10,5	7,3	0,47
16	54	124,9	110,3	11,5	8,2	0,45
18	46	147,5	134,2	12,4	9,1	0,43
20	37	171,8	160,0	13,3	9,9	0,43
22	32	197,8	187,6	14,2	10,8	0,42
24	27	225,4	216,8	15,1	11,7	0,41
26	23	262,2	255,8	16,1	12,6	0,41

$\dot{V}_{BrL}$  bei der Temperatur  $t_{BrL}$

$\dot{V}_L$  und  $\dot{V}_L'$  bei 16 °C

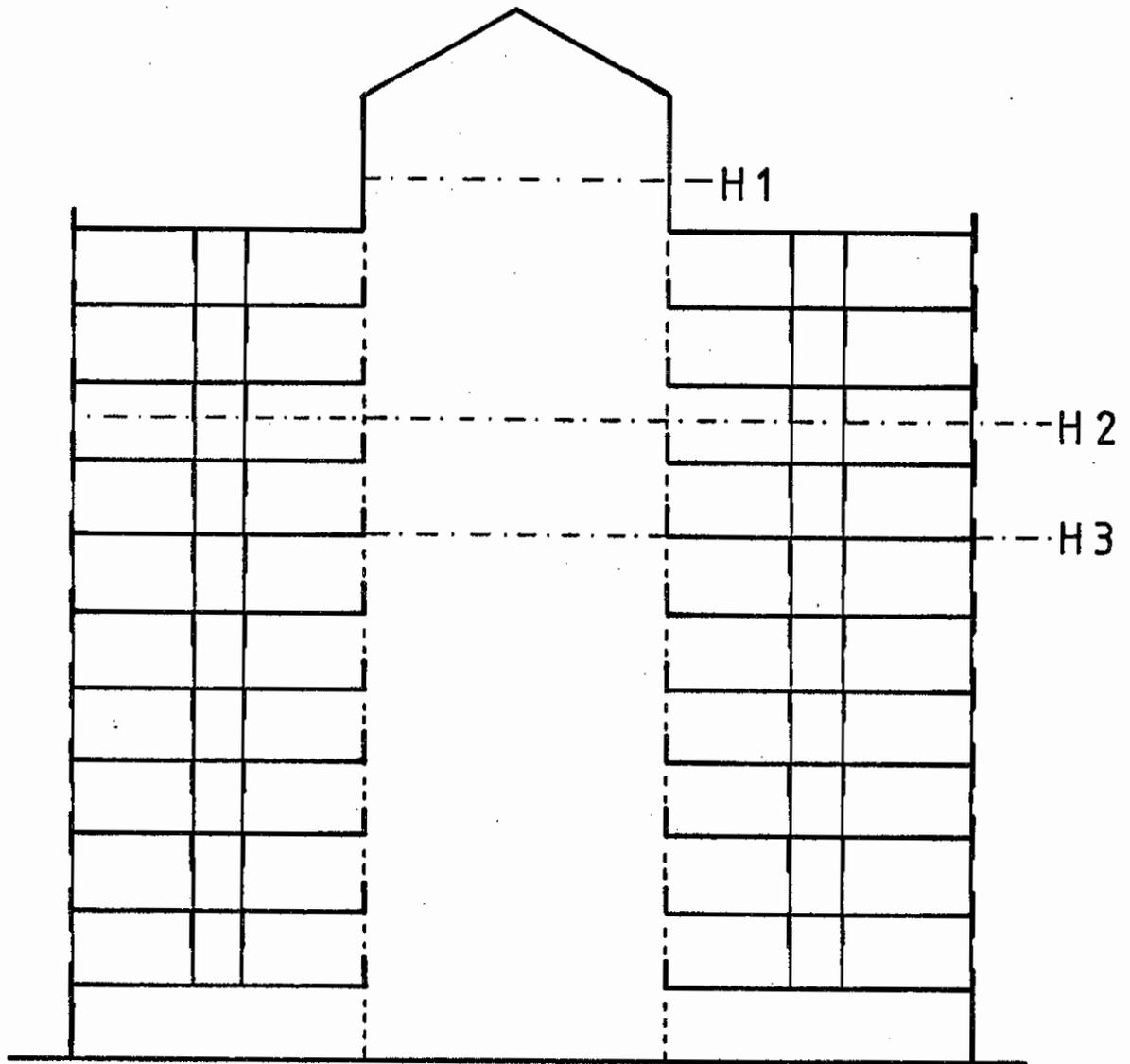


Bild 1: Brandgefahren durch Brände im Atriumbereich bei unterschiedlicher Begrenzung der an das Atrium angrenzenden Räume

H1, H2, H3

Unterseite des sich angestauten  
Brandrauch-Luftgemisches  
Trennwand mit Öffnungen zwischen  
Atrium und angrenzenden Räumen

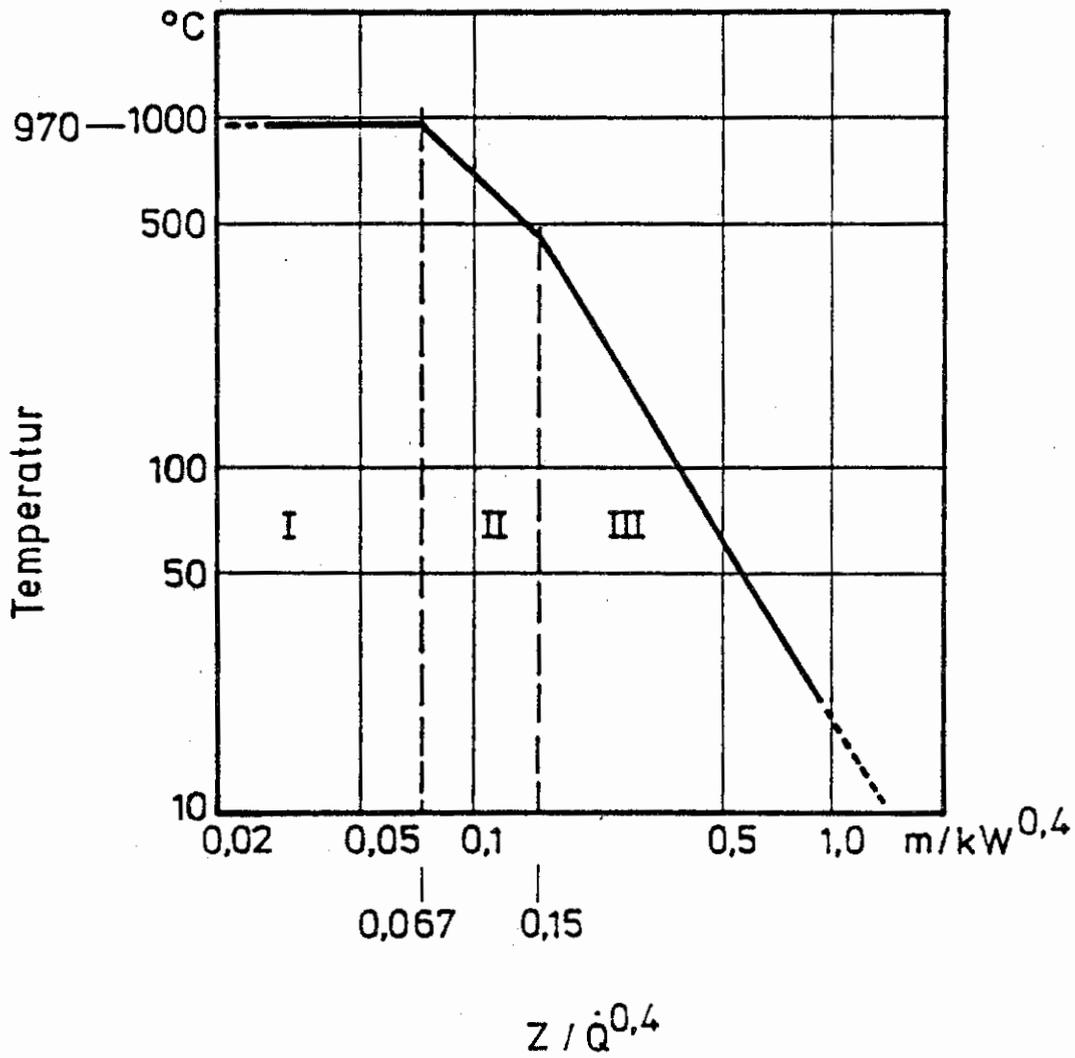


Bild 2: Temperatur des aufsteigenden Brandrauch-Luftgemisches nach /7/

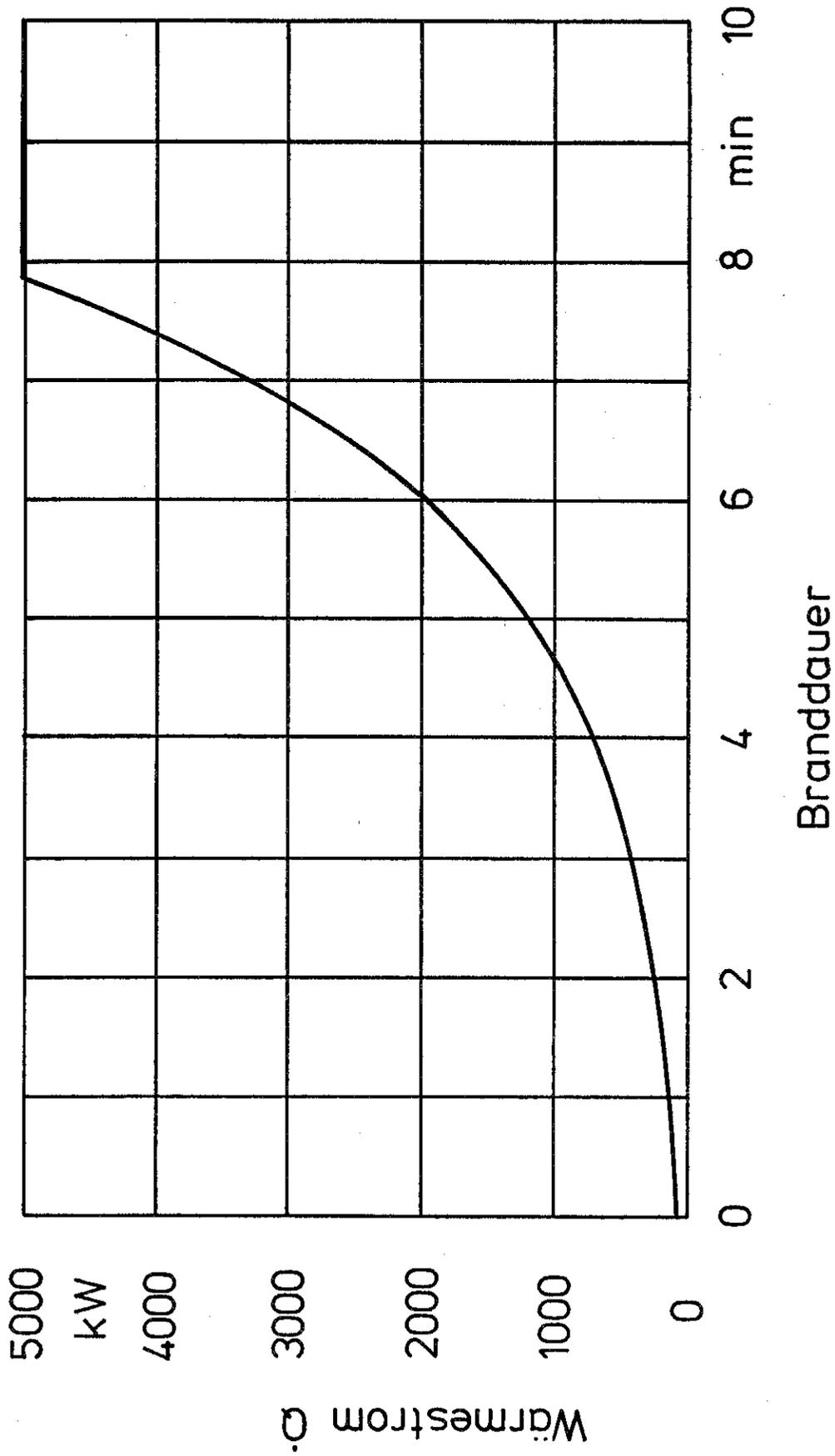


Bild 3: Brandausbreitung nach Gleichung (13)

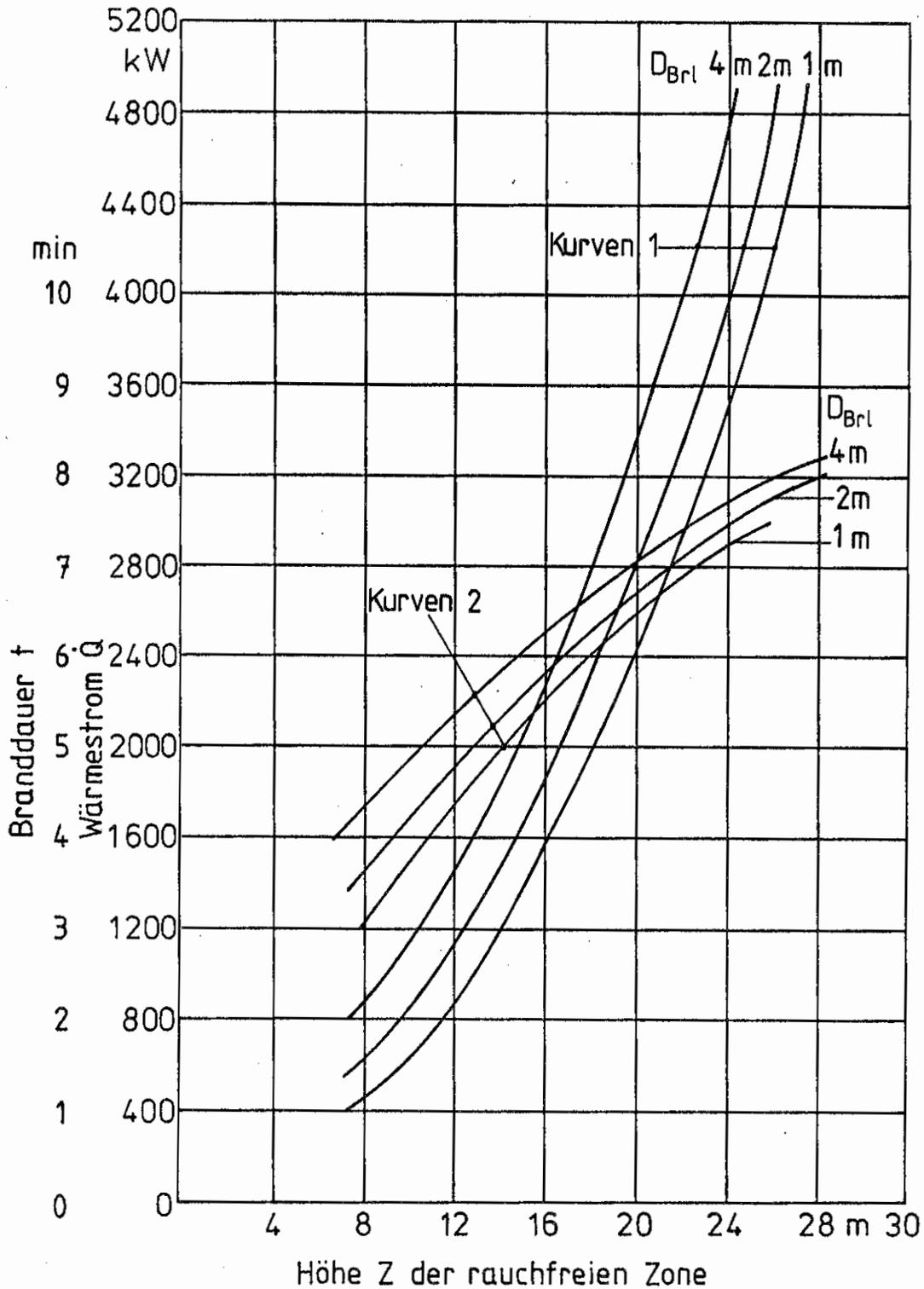


Bild 4: Freigesetzter Wärmestrom  $\dot{Q}$  (Kurven 1) und Branddauer (Kurven 2) bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von  $\Delta t = 5 \text{ K}$  in Abhängigkeit von der Höhe Z der rauchfreien Zone bei einer Dicke  $D_{BrL}$  des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb des Daches von 1 m, 2 m und 4 m.

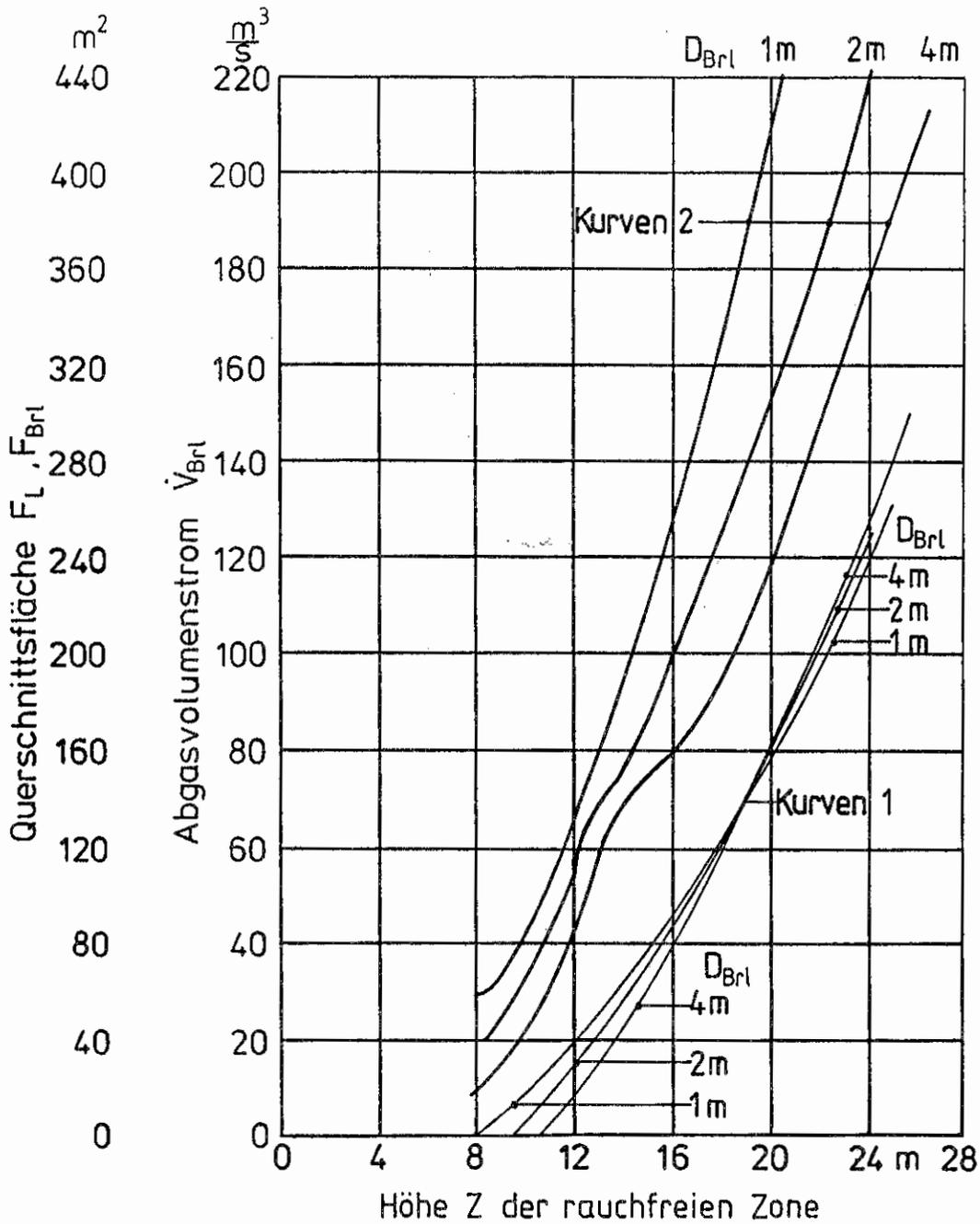


Bild 5: Erforderliche Volumenströme der Abgasventilatoren (Kurven 1) und geometrischen Querschnittsflächen der Zuluft- und Abgasöffnungen (Kurven 2) in Abhängigkeit von der Höhe  $Z$  der rauchfreien Zone bei einer Dicke  $D_{Brl}$  des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb des Daches von 1 m, 2 m und 4 m.

Skizze des Erdgeschosses

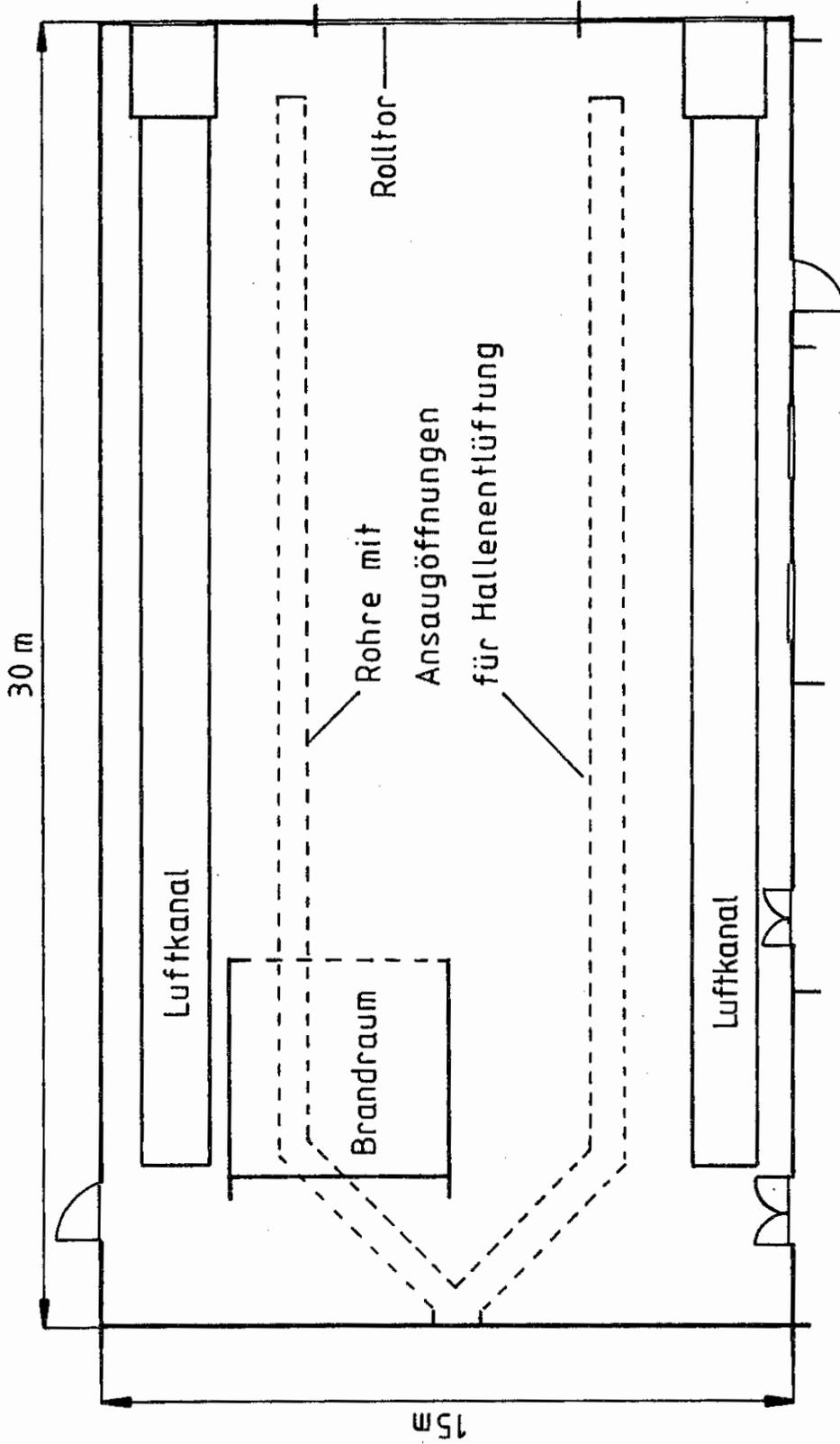


Bild 6: Grundriß der Brandversuchshalle mit einem darin errichteten Brandversuchsraum

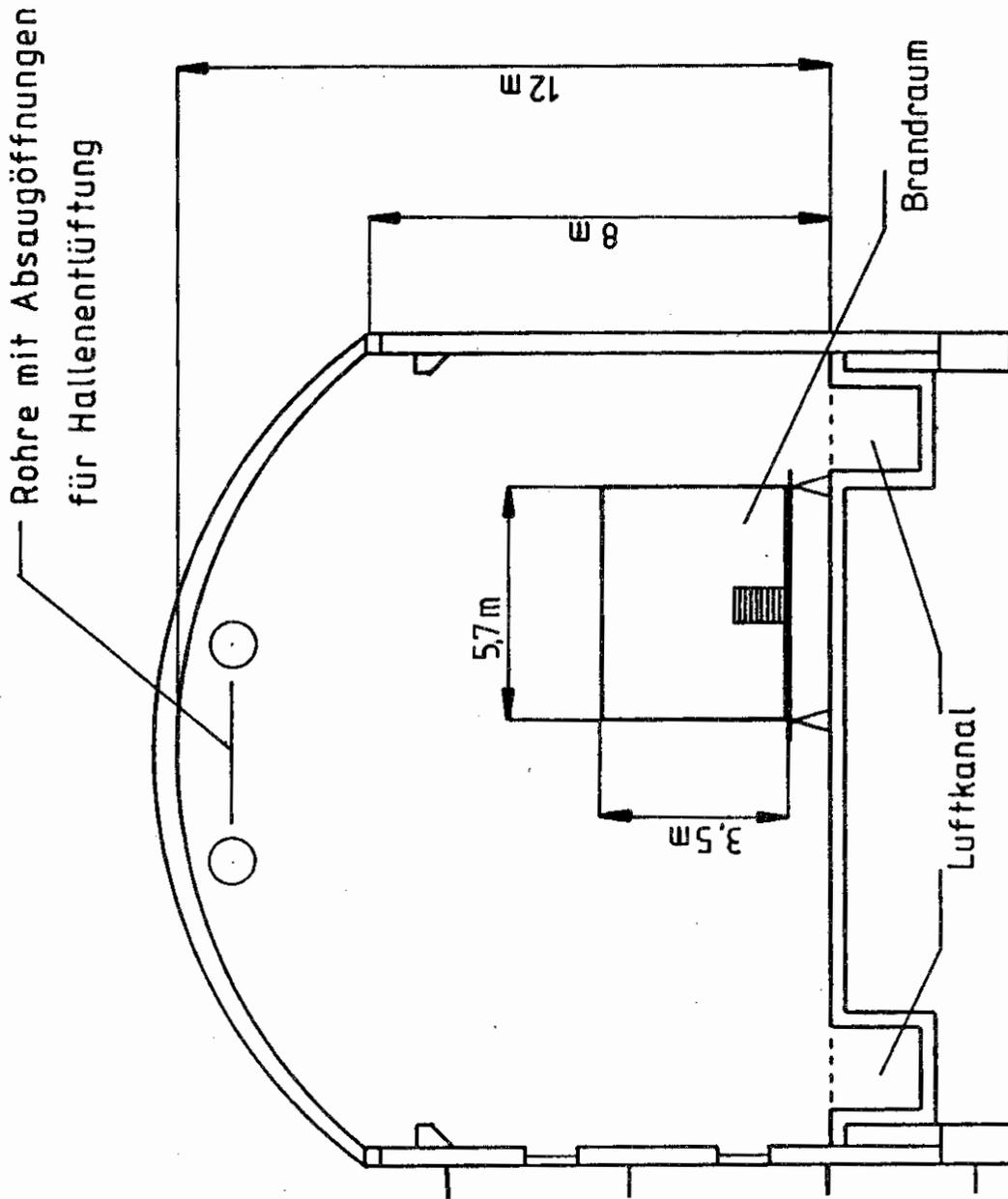


Bild 7: Querschnitt der Brandversuchshalle mit einem darin errichteten Brandversuchsraum

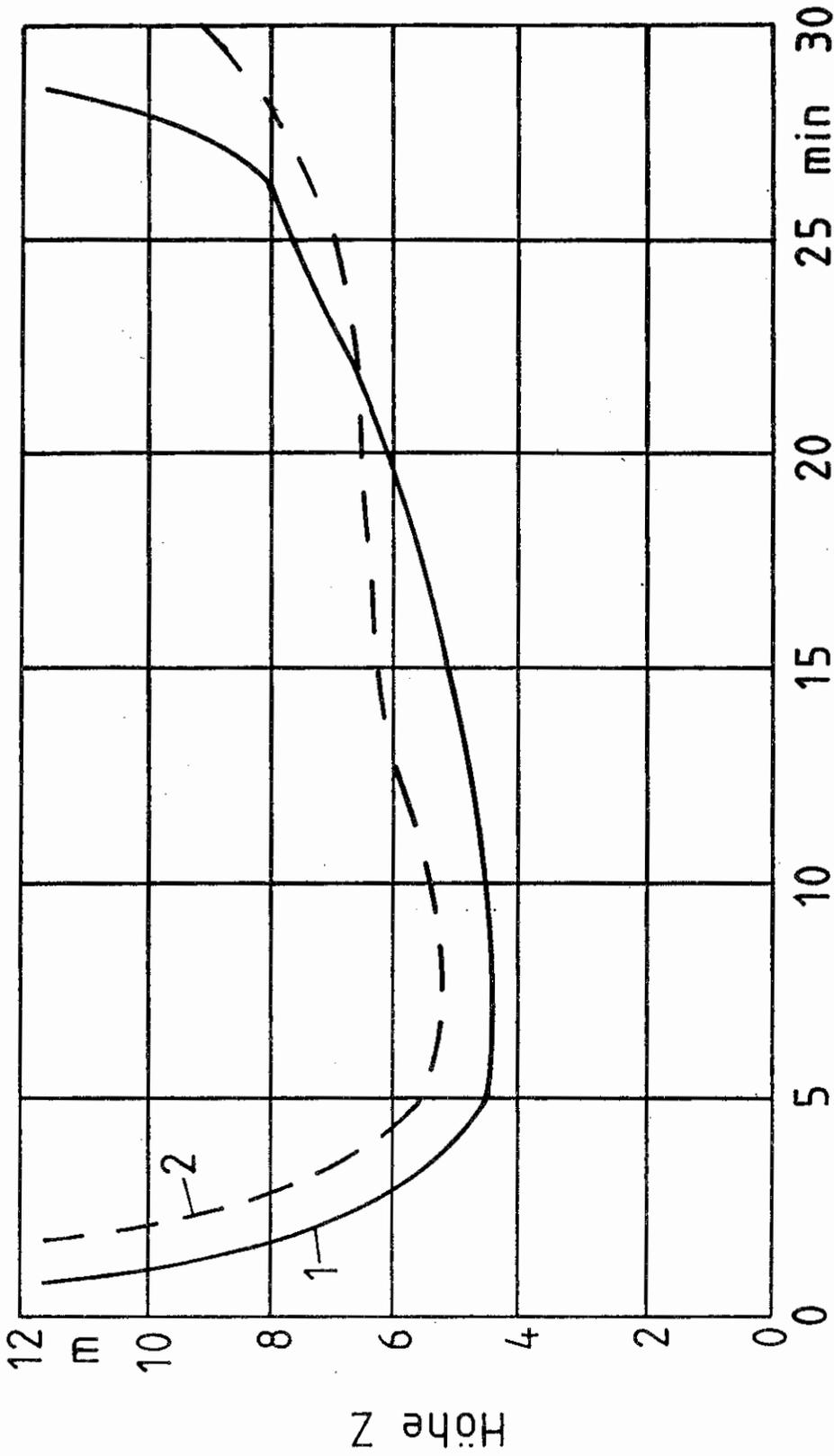


Bild 8: Höhe Z der rauchfreien Zone über dem Brandherd in einem Raum mit einem mechanischen Absaugsystem beim Abbrand von 100 kg Holz. Brandrauch steigt senkrecht über dem Brandgut auf.

Vergleich der Rechenwerte mit ersten Versuchsergebnissen

1 Höhe Z berechnet                      2 Höhe Z gemessen

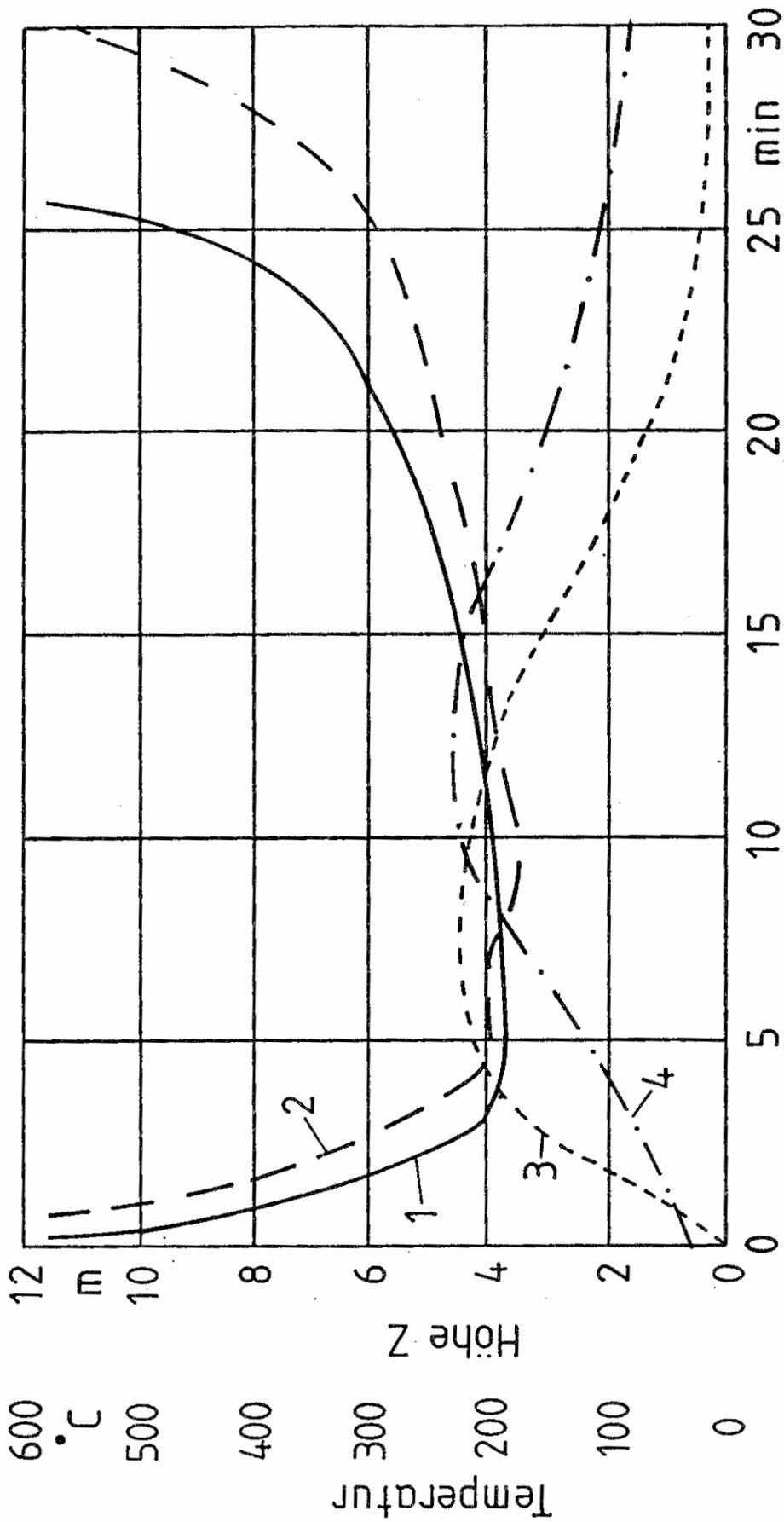


Bild 9: Höhe Z der rauchfreien Zone und des Temperaturverlaufes an einer Stelle in einem Raum mit mechanischer Absaugung beim Abbrand von 400 kg Holz. Brandrauch tritt aus einer seitlichen Öffnung aus dem Brandraum aus.  
Vergleich der Rechenwerte mit ersten Versuchsergebnissen

- 1 Höhe Z berechnet
- 2 Höhe Z gemessen
- 3 Temperatur Brandrauch-Luftgemisch berechnet
- 4 Temperatur Brandrauch-Luftgemisch gemessen