

Brandversuch zur Überprüfung  
der Leistungsfähigkeit eines  
Druckbelüftungssystemes zur  
Rauchfreihaltung der Treppenträume  
in einem Bürogebäude

**T 953**

T 953

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

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

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Brandversuch zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit  
eines Druckbelüftungssystemes zur Rauchfreihaltung  
der Treppenträume in einem Bürogebäude

durchgeführt von der Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik an der Universität  
Karlsruhe (TH)

Auftraggeber:  
Institut für Bautechnik, Berlin

Informationszentrum RAUM und BAU  
der Fraunhofer-Gesellschaft  
Inventar-Nr. T 953 Id. Nr. 82082537

## INHALTVERZEICHNIS

	Seite	
1.	EINLEITUNG	1
2.	BESCHREIBUNG DER TREPPENRÄUME	1
3.	ÜBERDRUCKBELÜFTUNGSSYSTEM	2
3.1	Anforderungen an das Überdruckbelüftungssystem	2
3.2	Ausführung des Überdruckbelüftungssystems	3
3.3	Berechnungsgrundlagen	4
3.4	Auslegungsdaten	4
4.	VERSUCHSBEDINGUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	5
4.1	Zustand des Gebäudes	5
4.2	Zu- und Abluftanlage	6
4.3	Brandraum und Brandgeschoß	6
4.4	Brandlast	7
4.5	Meß- und Beobachtungseinrichtungen	9
4.5.1	Temperaturen	9
4.5.2	Optische Rauchdichten	10
4.5.3	Strömungsgeschwindigkeit	10
4.5.4	Druckdifferenzen	11
4.5.5	CO- und CO <sub>2</sub> -Konzentrationen	11
4.5.6	Visuelle Aufzeichnungen	12
4.5.7	Beobachtungen	12
5.	VERSUCHSABLAUF	13
6.	VERSUCHSERGEBNISSE	18
6.1	Temperaturen	18
6.2	Volumenströme	20
6.3	Druckdifferenzen	21
6.4	Strömungsgeschwindigkeiten	22
6.5	Optische Rauchdichten	22
6.6	CO- und CO <sub>2</sub> -Konzentrationen	23
7.	BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	25
7.1	Subjektive Bewertung	25
7.2	Bewertung der Versuchsergebnisse	26
8.	BEURTEILUNG DER WIRKSAMKEIT DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS	44
8.1	Wirksamkeit im Auslegungsbereich des Druckbelüftungssystems	44

		Seite
8.2	Wirksamkeit bei Bedingungen, die über den Auslegungsbereich des Druckbelüftungssystems hinausgehen	46
9.	AUSWIRKUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUF KÜNFTIGE BERECHNUNGEN	48
10.	LEISTUNGSGRENZEN DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS	49
11.	ZUSAMMENFASSUNG	50
12.	LITERATURVERZEICHNIS	52
13.	TABELLE	53
14.	BILDER	54

## FORMELZEICHEN

$I_0$	Bestrahlungsintensität ohne Rauch
$I$	Bestrahlungsintensität mit Rauch
$l$	Lauge
$\Delta P$	Druckdifferenz
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\sigma$	Extinktionskoeffizient

## INDIZES

A	Abgas
B	Brandraum
T	Treppenraum
U	freie Umgebung
V	Vorraum

## MESSTELLEN

C1 bis C7	dynamische Drücke
G1 bis G3	Entnahmestellen für Gasproben
P1 bis P8	statische Drücke
RD1 bis RD4	optische Rauchdichte
T1 bis T18	Temperaturen
VK	Aufstellungsort von Videokameras

# Brandversuch zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Druckbelüftungssystems zur Rauchfreihaltung der Treppenträume in einem Bürogebäude

## 1. EINLEITUNG

In Hamburg-Barenfeld, Friedrichsallee 252-260, wird zur Zeit ein Verwaltungsneubau erstellt, der im wesentlichen aus 4 unterschiedlich hohen Baukörpern besteht. In diesem Gebäude befinden sich 6 Treppenträume. Davon liegen 2 Treppenträume im Kernbereich und 4 Treppenträume an den Außenseiten des Gebäudes.

Um die Treppenträume im Brandfall jederzeit benutzen zu können, sind zum Schutz gegen einen Raucheintritt bzw. gegen eine Verqualmung mechanische Lüftungsanlagen vorgesehen. Dabei werden die innenliegenden Treppenträume durch ein Überdruckbelüftungssystem gegen einen Raucheintritt geschützt. Die außenliegenden Treppenträume werden, um ihre Benutzbarkeit im Brandfall zu gewährleisten, mit Frischluft gespült.

Im Auftrag des Bauherrn, der Hermes Kreditversicherungs AG, Hamburg, hat die Forschungsstelle für Brandschutztechnik in einem Gutachten vom 8.8.1978 die Auslegungsdaten für diese Belüftungssysteme berechnet.

Aufgrund der im Genehmigungsbescheid des Bauordnungsamtes Hamburg aufgestellten Forderung, die Funktionsfähigkeit des Überdruckbelüftungssystems zu überprüfen, wurde am 10.7.1980 ein Brandversuch in diesem Verwaltungsneubau durchgeführt.

## 2. BESCHREIBUNG DER TREPPENRÄUME

Die Lage der durch das Überdruckbelüftungssystem geschützten Treppenträume 1 und 2 ergibt sich aus dem Bild 1, das schematisch den Grundriß des Gebäudes zeigt. Eine Ansicht des Gebäudes gibt Bild 2 wieder.

Die im Kernbereich des Gebäudes liegenden Innentreppenräume 1 und 2 beginnen im dritten Untergeschoß (Ebene 03, Niveauhöhe -10,63 m) und führen bis zum 2. Obergeschoß (Ebene 2, Niveauhöhe 9,8m). Diese beiden Treppenräume sind in Höhe des 2. Obergeschosses von den darüberliegenden Treppenräumen A1 und A2 getrennt. Die Höhe der Treppenräume 1 und 2 beträgt 20,43 m. Vor den Treppenräumen 1,2, A1 und A2 befindet sich in Höhe des 2. Obergeschosses ein offener Fluchtbalkon. Diese Treppenräume können in diesem Geschoß nur über den Fluchtbalkon betreten bzw. verlassen werden. In den Bildern 3 bis 8 sind die Grundrisse im Bereich der Treppenräume 1 und 2 für alle Etagen vom 3. Untergeschoß bis zum 2. Obergeschoß dargestellt.

Die Treppenräume A1 und A2 führen als außenliegende Treppenräume von der Höhe des 2. Obergeschosses (Ebene 2, Niveauhöhe 9,8 m) bis zum 21. Obergeschoß (Ebene 21, Niveauhöhe 75,7 m) bzw. zum 22. Obergeschoß (Ebene 22, Niveauhöhe 79,1 m). Vor diesen Treppenräumen befindet sich in jedem Geschoß ein Fluchtbalkon. Die Höhe der beiden Treppenräume beträgt 65,9 m bzw. 69,3 m.

### 3. ÜBERDRUCKBELÜFTUNGSSYSTEM

Um im Brandfall die unbehinderte Benutzbarkeit der Treppenräume zu gewährleisten, ist für die im Kernbereich gelegenen Treppenräume 1 und 2 ein Überdruckbelüftungssystem eingebaut.

#### 3.1 Anforderungen an das Überdruckbelüftungssystem

Das Überdruckbelüftungssystem ist entsprechend den vom Bauordnungsamt Hamburg festgelegten Bedingungen so ausgelegt, daß das Eindringen von Rauch in die Treppenräume 1 und 2 im Brandfall verhindert wird, wenn die im folgenden genannten Türen ganz oder teilweise geöffnet sind.



2. Obergeschoß (Ebene 2):

Türen Treppenraum/Fluchtbalkon  
sind ganz geöffnet.

Erdgeschoß (Ebene 0):

alle Türen zwischen Treppen-  
raum und freier Umgebung sind  
ganz geöffnet.

Brandgeschoß:

alle Türen zwischen Treppenraum  
und dem Brandraum stehen 30 cm auf.

Damit die in den Treppenraum führenden Türen auch von körperlich schwachen Personen geöffnet werden können, darf der maximale Überdruck in diesen Treppenräumen den Wert von  $50 \text{ N/m}^2$  nicht überschreiten.

### 3.2 Ausführung des Überdruckbelüftungssystems

Bei dem hier ausgeführten Überdruckbelüftungssystem wird aus baulichen Gründen den Treppenräumen 1 und 2 von einem im 2. Untergeschoß aufgestellten gemeinsamen Zuluftventilator Luft zugeführt (siehe Bild 4). Die Austrittsöffnungen der Zuluft in die Treppenräume befinden sich jeweils zwischen dem 1. und 2. Untergeschoß sowie zwischen dem Erdgeschoß und dem 1. Untergeschoß (siehe die Bilder 4 und 5). Der Zuluftvolumenstrom muß so groß sein, daß sich zwischen dem Treppenraum und den angrenzenden Räumen eine positive Druckdifferenz einstellt, die nur an der Oberkante der Tür Treppenraum/Vorraum im Brandgeschoß auf den Wert 0 absinken darf. Um diese Druckdifferenz  $\Delta P_{TV}$  bei einer kleinen Druckdifferenz  $\Delta P_{TU}$  zwischen Treppenraum und freier Umgebung, die ihrerseits kleine Leckagevolumenströme hervorruft, zu erreichen, müssen die an den Treppenraum angrenzenden Vorräume entlüftet werden. Die im Bereich der Treppenräume 1 und 2 zu entlüftenden Vorräume sind in den Bildern 3 bis 7 schraffiert angelegt.

Entflüftet werden diese Räume entweder direkt über die Abluftschächte 3 und 4, wie im 2. und 3. Untergeschoß, oder über zusätzliche Abluftkanäle 7, wie z.B. im Erdgeschoß.

Die Abluftschächte 3 und 4 beginnen im 3. Untergeschoß und führen bis auf das Dach des höchsten Baukörpers (22. Obergeschoß, Niveauhöhe 79,1 m). Um eine Rauchübertragung aus den Abluftschächten in andere Geschosse zu verhindern, sind die Öffnungen der Abluftschächte zu den zu entlüftenden Räumen mit rauchdichten Klappen verschlossen. Im Brandfall werden nur die Klappen in dem Geschoß geöffnet, in dem durch einen Brandmelder ein Brand registriert wird.

### 3.3 Berechnungsgrundlagen

Die für die Auslegung des Überdruckbelüftungssystems erforderlichen Daten wurden nach /1/ und /2/ berechnet. In Bild 9 sind die bei der Berechnung zugrunde gelegten Verhältnisse eingezeichnet. Der dem Treppenraum zugeführte Luftvolumenstrom strömt, je nach den baulichen Gegebenheiten, direkt oder über eine Schleuse in die Vorräume. In den Vorräumen strömen Rauchgase aus dem Brandraum und mischen sich mit der Frischluft. Dieses Rauchgasluftgemisch strömt zum Teil wieder in den Brandraum bzw. wird über einen Abluftschacht abgeführt. Die Brandraumtemperatur ist im vorliegenden Fall mit 400 °C angenommen worden, da alle Räume des Gebäudes durch eine Sprinkleranlage geschützt werden.

### 3.4 Auslegungsdaten

Aufgrund der im Gutachten durchgeführten Berechnungen ergeben sich folgende Daten für die Auslegung des Druckbelüftungssystems.

Unter Berücksichtigung der im Abschnitt 3.1 gestellten Forderungen und unter Einbeziehung der Leckageverluste an den ge-

geschlossenen Türen in den übrigen Zugängen zum Treppenraum ist bei einer angenommenen Frischlufttemperatur von 20 °C für einen Treppenraum ein Zuluftvolumenstrom von 8,8 m<sup>3</sup>/s erforderlich.

Da bei dem hier vorliegenden Überdruckbelüftungssystem die Zuluft zu den beiden Treppenträumen von einem gemeinsamen Ventilator gefördert wird, werden die Zuluftvolumenströme, die jedem einzelnen Treppenraum zugeführt werden, vom Verhältnis der Summe der Öffnungsquerschnitte der in beiden Treppenträumen, über die die Luft wieder abströmen kann, abhängen. Bei der Vielzahl von Türen, die gleichzeitig vollständig geöffnet sein müssen, um den bei der Berechnung zugrunde gelegten Zustand zu erreichen, wurde davon ausgegangen, daß 80 % der in Betracht kommenden Türen in beiden Treppenträumen gleichzeitig offen stehen. Damit ergibt sich der geforderte Gesamtvolumenstrom in beiden Treppenträumen zu:

$$2 \cdot 8,8 \cdot 0,8 = 14,1 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Dieser Luftvolumenstrom muß bei einer Druckdifferenz von ca. 6 N/m<sup>2</sup> zwischen der freien Umgebung und dem Treppenraum zugeführt werden. Bei geschlossenen Türen darf die maximale Druckdifferenz von 50 N/m<sup>2</sup> nicht überschritten werden, um die Türen noch öffnen zu können.

Diese berechneten Daten sowie die Funktionsfähigkeit des Druckbelüftungssystems wurden durch einen Brandversuch überprüft.

#### 4. VERSUCHSBEDINGUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

##### 4.1 Zustand des Gebäudes

Zum Zeitpunkt der Brandversuche erfolgte der Innenausbau des Verwaltungsgebäudes. Wie Bild 2 zeigt, waren zu diesem

Zeitpunkt alle Fenster eingesetzt. Die für die Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems wichtigen Türen waren entsprechend den Bildern 10 bis 15 eingebaut. Aus diesen Bildern ist zu ersehen, daß noch nicht alle Türen zum Zeitpunkt des Versuches eingebaut waren. Weiterhin ist zu bemerken, daß zum Teil andere Türen als im Endausbau vorgesehen, eingebaut waren. Der endgültige Ausbauzustand war nur im 2. Obergeschoß mit den Türen 2/11 und 2/21 erreicht.

#### 4.2 Zu- und Abluftanlage

Die Zu- und Abluftkanäle entsprachen bis auf die Aus- bzw. Eintrittsgitter dem endgültigen Ausbau.

Die Zuluftöffnungen im Treppenraum waren entsprechend Bild 16 verkleinert worden. Dadurch wurde der erhöhte Strömungswiderstand der Austrittsgitter simuliert. Bei dem Zuluftventilator war die Druckregelung, die eine Überschreitung des Überdruckes von  $50 \text{ N/m}^2$  im Treppenraum verhindert, noch nicht funktionsfähig. Das Gebläse lief daher je nach manueller Einstellung mit voller oder halber Leistung.

In den Abluftschächten waren an allen Öffnungen bzw. Kanalanschlüssen die dafür vorgesehenen Klappen eingebaut. Diese Klappen waren alle bis auf die im Brandgeschoß (1. Untergeschoß) geschlossen. Da die Brandmelder und die pneumatische Einrichtung zum automatischen Öffnen der Klappen noch nicht vorhanden waren, wurden diese beiden Klappen vor Versuchsbeginn manuell geöffnet und fixiert.

#### 4.3 Brandraum und Brandgeschoß

Der Brandraum war im 1. Unterschoß eingerichtet. Ausschlaggebend für die Auswahl des Brandraumes war die Tatsache, daß der Treppenraum von diesem Geschoß aus über eine Schleuse und zusätzlich auch über eine einzelne Tür betreten werden

kann (siehe Bild 5) und daß dieses Geschoß etwa in halber Höhe der Treppenträume 1 und 2 liegt. Der Brandraum wurde an der im Bild 17 dargestellten Stelle im 1. Untergeschoß errichtet.

Dazu wurde von dem an den Vorraum Nr. 01/51 (siehe Bild 5) angrenzenden Raum eine Fläche von ca. 15 m<sup>2</sup> feuerbeständig abgemauert und eine abgehängte Decke aus Asbestzementplatten eingezogen. Die Wände des Brandraumes wurden mit zwei Lagen Gipskartonplatten verkleidet. In die Trennwand zwischen Brandraum und Vorraum wurde eine feuerhemmende Tür eingesetzt. Der Vorraum wurde an den Wänden und an der Decke mit Gipskartonplatten verkleidet. Eine ca. 10 cm hohe Sandschüttung schützte den Boden im Brandraum und im Vorraum. In der Halle (Aufzugsvorraum) wurden alle Aufzugstüren mit Gipskartonplatten verkleidet. Gipskartonplatten wurden ebenfalls zum Verschließen von Öffnungen verwendet, in die noch keine Türen eingesetzt waren. In den Mittelgang zwischen den beiden Treppenträumen (siehe Bilder 5 und 12), wurden mit Gipskartonplatten ein geschlossener Gang mit einer Höhe von ca. 2,5 m bis zur Rauchabzugsöffnung für die Halle eingebaut. Dies war erforderlich, da in diesem Bereich noch offene Deckendurchbrüche zwischen dem 1. Untergeschoß und dem Erdgeschoß vorhanden waren. Das Bild 18 zeigt den mit Gipskartonplatten verkleideten Vorraum. Die Tür rechts im Vordergrund führt in den Brandraum, die linke hintere Tür in den Treppenraum.

#### 4.4 Brandlast

Als Brandlast wurde bei diesem Brandversuch eine Brandlastpalette mit einer Gesamtmasse von ca. 185 kg verwendet. Ihr Aufbau ist in Bild 19 dargestellt.

Der Boden 2 der Brandlastpalette ist in 250 mm Höhe über dem Boden 1 des Brandraumes angeordnet. Auf ihm sind die 8 Holzkrippen 3 aufgebaut. Die Holzkrippen 3 entsprechen dem Prüfobjekt AI/H nach DIN 14406 und sind aus 15 Lagen

mit je 4 Stäben Kiefernholz mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm und einer Länge von 300 mm aufgebaut. Die Zündkrippe 4 besteht aus 25 Lagen mit je 6 Stäben Kiefernholz mit den Abmessungen 20 mm x 20 mm und einer Länge von 400 mm. Die Zündkrippe steht auf zwei 30 mm hohen Holzbalken. Unter der Zündkrippe steht die Zündwanne 9, die mit 0,5 l Brennspritus gefüllt ist. An einer Außenseite sowie zwischen den Holzkrippen stehen insgesamt 5 Styroporplatten ohne Brandschutzausrüstung. Die Schaumstoffplatten 5 haben die Abmessungen 0,5 m x 1 m und eine Dicke von 100 mm. Die Platten 6 ergeben sich durch Teilen einer Platte der genannten Abmessungen in je eine mit 0,4 m bzw. 0,6 m Länge.

Der Boden der Brandlastpalette ist zur Hälfte mit Linoleum 7 mit einer Dicke von 3 mm und mit einem Nadelfilzteppich 8 ohne Gummi- oder Kunststoffrücken belegt. Auf der hinteren Längsseite ist aus Kiefernholzbalken mit den Abmessungen 80 mm x 100 mm der eingezeichnete Rahmen 10 aufgesetzt, an dem über die gesamte Breite ein Vorhang 11 aus Baumwollmischgewebe mit maximal 50 % Synthetikanteil angebracht ist. Die Brandlast einer Palette setzt sich wie folgt zusammen. Die Ziffern in den Klammern beziehen sich auf die Bezeichnungen in Bild 19.

Holzkrippen (3)	136,0 kg
Holzbalken (10)	29,0 kg
Styropor (5+6)	1,6 kg
Textilboden (8)	1,5 kg
Linoleum (7)	5,0 kg
Vorhänge (11)	2,0 kg
Zündkrippe (4)	12,0 kg
Brennspritus	0,4 kg

Das Gewicht dieser Brandlastpalette beträgt ca. 185 kg.

Der Heizwert dieser Brandpalette hat einen Wert von insgesamt ca. 3200 MJ. Bezogen auf die Fläche des Brandraumes von  $15 \text{ m}^2$  ergab sich damit eine mittlere Brandbelastung von  $213 \text{ MJ/m}^2$ .

Wie Vorversuche in einem ca.  $12 \text{ m}^2$  großen Brandraum an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ergeben haben, entspricht das Abbrandverhalten (Temperatur und Rauchentwicklung im Brandraum) etwa den von Bränden mit normalen Wohnungseinrichtungsgegenständen. Die Abbrandgeschwindigkeit bei ausreichender Ventilation (Fensteröffnung  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  oder größer) beträgt für eine Brandlastpalette mit Zündkrippe in der stationären Brandphase  $6,4 \text{ kg/min}$ . Die im Brandraum aufgestellte Brandlastpalette zeigt Bild 20.

#### 4.5 Meß- und Beobachtungseinrichtungen

Zur Beurteilung des Versuchsablaufes und der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems wurden bei dem Versuch die in den nächsten Abschnitten beschriebenen Werte gemessen. Die Anordnung der Meßstellen ist dem Bild 21 zu entnehmen. Alle Meßdaten wurden von einem rechnergesteuerten Datenerfassungssystem aufgenommen und auf Disketten abgespeichert.

##### 4.5.1 Temperaturen

Im Bild 21 sind die Temperaturmeßstellen mit "T" gekennzeichnet. Im Brandraum waren die Meßstellen T1 bis T5 5 cm unterhalb der Decke angeordnet. In der Mittelachse der Türöffnung Brandraum/Vorraum waren die Thermoelemente T6 bis T8 angeordnet, um die Temperaturen der durch die Türöffnung strömenden Rauchgase und des in den Brandraum strömenden Rauchgas-Luftgemisches zu messen. Die 3 Thermoelemente waren 2 cm unter der Oberkante der Türöffnung (T6), in halber Höhe (T7) und 20 cm über dem Boden (T8) angeordnet. In  $1,5 \text{ m}$  Höhe über dem Boden des Vorraumes befanden sich die Meßstellen T9 und T10.

Die Meßstelle T11 war im Eintrittsbereich des Entlüftungskanals angeordnet. Mit den Thermoelementen T12 bis T14 wurde in der Mittelachse der Türöffnung (Treppenraum/Vorraum) die Temperatur 20 cm unter der Oberkante der Türöffnung, in halber Höhe der Türöffnung und 20 cm über dem Boden gemessen. Im Treppenraum wurden die Temperaturen an der im Bild 21 eingezeichneten Stelle in 1,5 m Höhe über dem Boden im 1. Untergeschoß (T15), im 2. Untergeschoß (T16) und im Erdgeschoß (T17) gemessen.

#### 4.5.2 Optische Rauchdichten

Mit 4 Meßstrecken wurde die optische Rauchdichte ermittelt. Diese Meßstrecken bestehen jeweils aus einem Lichtsender und einer Fotozelle, deren Beleuchtungsstärke sich entsprechend der Abschwächung des Lichtstrahls durch die Rauchdichte änderte. Als Lichtquelle diente hierbei eine normale Glühlampe. Die Meßstrecken RD 1 bis RD 4 sind im Bild 21 eingezeichnet. Die Meßstrecke RD 1 war in 1,5 m Höhe über dem Boden in der Mitte des Vorräumes angeordnet. Unmittelbar über der Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) war die Meßstrecke RD 2 im Treppenraum installiert. Weitere Meßstrecken waren entsprechend dem Bild 21 in 1,5 m Höhe über den Stufen eine halbe Treppe unterhalb (RD 3) und eine halbe Treppe oberhalb (RD 4) des Brandgeschosses angeordnet.

#### 4.5.3 Strömungsgeschwindigkeit

Um Strömungsgeschwindigkeiten berechnen zu können, wurden mit Prandtlrohren die dynamischen Drücke an verschiedenen Stellen gemessen. An den Meßstellen C1 bis C3 wurden die dynamischen Drücke des Luftvolumenstromes durch die Türöffnung 01/21 (Treppenraum/Vorraum) in den Höhen 20 cm unterhalb der oberen Türkante, in halber Türhöhe sowie 20 cm über dem Boden gemessen. Der dynamische Druck des Luftvolumenstromes durch die Türöffnung 2/21 (Tür Treppenraum/Fluchtbalkon, siehe



Bild 15) wurde an der Meßstelle C4 in der Mitte der Türöffnung ermittelt. An den Meßstellen C5 bis C7 wurden die dynamischen Drucke der Volumenströme der Luft in den Treppenraum 2, der Abgase im Abgaskanal sowie der Zuluft im Zuluftkanal für beide Treppenträume (siehe Bild 4) gemessen.

#### 4.5.4 Druckdifferenzen

Die während des Versuches auftretenden Druckdifferenzen zwischen verschiedenen Räumen innerhalb des Gebäudes und der Umgebung wurden an den Meßstellen P1 bis P8 (siehe Bild 21) gemessen. An den Meßstellen P1 bis P3 und P8 wurde der Überdruck im Treppenraum in Höhe des 3. Untergeschosses, des 1. Untergeschosses, des Erdgeschosses sowie des 2. Obergeschosses gegenüber der Umgebung gemessen. An den Meßstellen P4 bis P6 wurden der Überdruck im Vorraum, im Brandraum und in der Halle des Brandgeschosses gegenüber der freien Umgebung gemessen. Diese Meßstellen befanden sich alle in 1,5 m Höhe über dem Boden.

#### 4.5.5 CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Die Konzentration von CO und CO<sub>2</sub> wurden mit Hilfe von Gasprüfröhrchen an den Meßstellen G1 bis G3 ermittelt (siehe Bild 21). Aus dem Vorraum (Meßstelle G1) wurden Gase kontinuierlich über ein Rohr abgesaugt und anschließend auf ihren CO- und CO<sub>2</sub>-Gehalt untersucht. An der Meßstelle G2 im Treppenraum vor der Tür zum Vorraum des Brandgeschosses sowie an der Meßstelle G3 im Treppenraum auf dem Podest zwischen dem 1. Untergeschoß und dem Erdgeschoß wurden die Gase direkt über die Prüfröhrchen abgesaugt.

#### 4.5.6 Visuelle Aufzeichnungen

Von zwei Videokameras wurden die Vorgänge im Treppenraum, im Bereich der Tür Treppenraum/Vorraum sowie im Vorraum selbst aufgenommen und auf Band aufgezeichnet. Die Vorgänge im Vorraum wurden zusätzlich mit einer Registrierkamera fotografisch aufgenommen.

#### 4.5.7 Beobachtungen

Zur Beschreibung des Versuchsablaufes wurden die Vorgänge im Treppenraum, im Vorraum und im Brandraum beobachtet und die Beschreibungen des jeweiligen Zustandes auf einem Diktiergerät festgehalten.

## 5. VERSUCHSABLAUF

Der Brandversuch zum Nachweis der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Druckbelüftungssystems wurde am 10.7.1980 in Anwesenheit sowie mit Unterstützung der Berufsfeuerwehr Hamburg<sup>+</sup> durchgeführt.

Vor Versuchsbeginn wurden alle vorhandenen Türen, die zu den Treppenträumen 1 und 2 führen, geschlossen. Nur die Tür 2/21, die im 2. Obergeschoß vom Treppenraum 2 auf den Fluchtbalkon führt, blieb ganz geöffnet (siehe Bild 15).

Im folgenden ist der Versuchsablauf in chronologischer Reihenfolge aufgrund der Beobachtungen wiedergegeben.

<u>Versuchszeit in min</u>	<u>Beobachtungen</u>
2	Zündung der Brandlast
5	Die Flammen im Brandraum schlugen bis an die Decke. Die Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) wird kurzzeitig geöffnet, um Rauchgase aus dem Versuchsraum anzusaugen.
6	Die Brandraumtür wird ca. 30 cm geöffnet und in dieser Stellung fixiert. Im Brandraum erfolgt der Abbrand unter starker Flammenbildung. In den Vorraum dringen Rauchgase ein.
7	Die Lüftungsanlage wird bei einer Versuchszeit von 6 min 20 s auf volle Leistung geschaltet.

---

<sup>+</sup>Wir danken der Berufsfeuerwehr Hamburg für ihre Unterstützung bei der Durchführung dieses Brandversuches.

- 8 Im Treppenraum treten starke Luftströmungen auf. Durch eine starke Rauchentwicklung sind Beobachtungen der Vorgänge im Brandraum eingeschränkt.
- 9,5 Die Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) wird 30 cm geöffnet. Sie muß in dieser Stellung fixiert werden, da sie sonst wieder zugeedrückt würde. Die provisorisch eingebaute Tür 0/21 wird mit dem Rahmen herausgerissen.
- 10 Der Brandraum ist sehr stark verqualmt, es sind nur dunkelrote Flammen zu erkennen. Durch die teilweise geöffnete Tür 01/2 dringen keine Rauchgase in den Treppenraum.
- 12 Die Rauchdichte im Vorraum geht zurück.
- 15 Lüfter wird auf halbe Leistung geschaltet, da sich die Tür 2/11 (Treppenraum/Fluchtbalkon im Treppenraum 1) bei voller Lüfterleistung nicht öffnen läßt. Nach dem Zurückschalten wird die Tür 2/11 ganz geöffnet.
- 16 Im Brandraum brennen alle Holzstapel im Bereich der Zündquelle. Die Verqualmung des Vorraumes nimmt zu, die Rauchsicht beginnt ca. 1,75 m über dem Boden. Der Rauch wird an der Tür zum Treppenraum nach unten gelenkt und strömt dann wieder in den Vorraum. In den Treppenraum treten keine Rauchgase ein.

- 19 Der Bodenbelag der Brandlastpalette brennt jetzt mit. Die Tür 01/21 wird ganz geöffnet. An der Tür 01/21 dringt oben Rauch in den Treppenraum ein.
- 19,75 Die Lüftungsanlage wird wieder auf die volle Leistung hochgeschaltet.
- 20,5 Rauch tritt oben aus der Türöffnung 01/21 aus. Diese Rauchschwaden ziehen zum Teil auch nach unten in den Treppenraum. Die Unterkante der Rauchsicht in dem Vorraum liegt in einer Höhe von ca. 1,7 m.
- 21,5 Der in den Treppenraum eindringende Rauch zieht nur noch nach oben ab. Es scheint, als ob der Luftstrom durch den Treppenraum zugenommen hat. Im Brandraum haben sich die Holzkrippen entzündet, die der Zündquelle gegenüber angeordnet sind.
- 23 Die Tür 2/11 (Treppenraum 1/Fluchtbalkon) wird auf 30 cm geschlossen. In den Treppenraum dringen noch Rauchgase aus dem oberen Bereich der Tür 01/21 ein. Dadurch ergeben sich Behinderungen (tränennde Augen) im Treppenraum. Der Rauchgasaustritt geht langsam zurück.
- 26 Die Tür 2/11 wird ganz geöffnet, die Verhältnisse im Treppenraum ändern sich dadurch nicht wesentlich.
- 29 Um die Temperaturen im Brandraum nicht weiter ansteigen zu lassen, wird das Brandgut ca. 2 min lang mit Wasser besprüht.

- 32 Die Brandlast brennt nach dem Abspritzen weiter. In den Treppenraum treten nur geringe Rauchgas-mengen ein.
- 33 Die Tür zum Brandraum wird vollständig geöffnet. Die Holzstöße brennen mit hellen Flammen. Durch die Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) treten mit leicht steigender Tendenz heiße Rauchgase aus. In der Türöffnung sind diese Gase in Kopfhöhe wahrnehmbar.
- 38 Alle Türen in den Treppenträumen 1 und 2 werden ganz geöffnet. Das Brandgut steht vollständig in Flammen. Ein Aufenthalt in der Türöffnung 01/21 ist wegen hohen Temperaturen nicht möglich. Im Treppenraum ca. 1 m vor der Tür herrschen schon wieder normale Temperaturen.
- 42 Die Türen 0/11 und 2/11 werden geschlossen. Vom Treppenraum aus kann der hellbrennende Brand im Brandraum beobachtet werden.
- 45 Der Vorraum wird zum Fotografieren in Hockstellung betreten.
- 48 Im Vorraum steigt die Verqualmung leicht an. Im Brandraum ist ein Holzstapel zusammengebrochen.
- 52 Die Türen 2/11 und 0/11 werden auf 30 cm geöffnet. Die Tür 01/11 steht ganz auf.

- 55 Die Türen 0/11 und 2/11 werden ganz geöffnet. Die Holzkrippen im Brandraum fallen weiter zusammen. In den Treppenraum dringen weiterhin geringe Mengen Rauchgase ein.
- 60 Mit dem Ablöschen des Brandgutes wird begonnen.
- 70 Der Versuch ist beendet.

Während des Versuches ist es wiederholt vorgekommen, daß am Bau beschäftigte Personen durch den Treppenraum 1 gingen und dabei unkontrolliert verschiedene Türen öffneten. Ebenso ist nicht sichergestellt, daß die Türen in beiden Treppenträumen, die in Abstellkammern führen, wie z.B. die Türen 1/12, 1/22 und 0/12 und 0/22 (siehe die Bilder 13 und 14), bei den hohen Überdrücken in der Anfangsphase des Versuches nicht aufsprangen. Über diese Räume war ein Abströmen von Luft möglich, da die Decken dieser Räume noch große Öffnungen aufwiesen. Die in vorhergehenden und in den folgenden Abschnitten angegebenen Türstellungen beziehen sich daher nur auf die zu Beginn jeder neuen Versuchsphase durchgeführte Veränderung der Türstellung.

Die Vorgänge während des Versuches im Vorraum sind in den Bildern 22a bis 22g dargestellt. In den Bildern ist rechts die Tür zum Brandraum und im Hintergrund links die Tür zum Treppenraum zu sehen. Das Bild 23a zeigt die Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) beim Öffnen auf eine Spaltbreite von 30 cm. Den Blick in den Vorraum durch die ganz offen stehende Tür 01/21 gibt Bild 23b wieder.

Bei einer Versuchszeit von ca. 44 min wurde der Vorraum zum Fotografieren betreten. Die Verhältnisse im Brandraum zeigen die Bilder 24a und 24 b.

Die Rußspuren an den Wänden des Vorraumes sowie an der Brandraumtür nach dem Brandraumversuch zeigen die Bilder 25 a und 25b.

## 6. VERSUCHSERGEBNISSE

Bei dem Brandversuch sind u.a. die in den Bildern 26 bis 36 dargestellten Meßwerte registriert worden. In diese Bilder sind die Zeiten mit eingetragen, zu denen verschiedene, den Versuchsablauf beeinflussende Veränderungen, wie z.B. das Einschalten des Druckbelüftungssystems, ausgeführt wurden. Die in den Bildern hinter der Kurvennumerierung in Klammern angegebene Bezeichnung gibt die Meßstelle entsprechend Bild 21 wieder.

### 6.1 Temperaturen

In Bild 26 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur im Brandraum über der Versuchszeit aufgetragen. Die Kurve 1 gibt den Verlauf des mit der 4. Potenz der 5 Temperaturen unterhalb der Brandraumhöhe (T1 bis T5, siehe Bild 21) gebildeten Mittelwertes wieder. Diese gemittelte Temperatur hat die bei der Berechnung zugrunde gelegte maximale Brandraumtemperatur von  $400^{\circ}\text{C}$  in gesprinklerten Räumen nach einer Versuchszeit von 16 min überschritten und ist bis auf  $720^{\circ}\text{C}$  angestiegen. Um einen weiteren Temperaturanstieg zu vermeiden, wurde bei einer Versuchszeit von 29 min die Brandintensität durch ein kurzzeitiges Besprühen des Brandgutes mit Wasser herabgesetzt. Dadurch ergaben sich die aus Bild 26 zu ersiehenden Temperaturabnahmen. Bei einer Versuchszeit von 52 min wurde die  $400^{\circ}\text{C}$ -Grenze wieder unterschritten. Bei einer Versuchszeit von 60 min wurde das noch vorhandene Brandgut abgelöscht.

Die Kurven 2 bis 4 geben den zeitlichen Temperaturverlauf an den Meßstellen T6 bis T8 wieder, die sich (siehe Bild 21) in der Mittelachse der Türöffnung zwischen Brandraum und Vorraum befanden. Als Kurve 5 ist die an der Meßstelle T18 gemessene Außentemperatur aufgetragen.



Im Bild 27 ist durch die Kurven 1 und 2 der zeitliche Verlauf der Temperaturen im Vorraum an den Meßstellen T9 und T10 wiedergegeben. Die etwa gleichverlaufenden Temperaturen stiegen mit dem teilweisen Öffnen der Brandraumtür bei einer Versuchszeit von 6 min bis auf  $67^{\circ}\text{C}$  an. Nach dem teilweisen Öffnen der Tür Treppenraum/Vorraum sanken diese Temperaturen wieder ab. Ein starker Anstieg auf ca.  $180^{\circ}\text{C}$  erfolgte, nachdem die Brandraumtür ganz geöffnet wurde. Mit dem Rückgang der Brandraumtemperatur sanken auch die Temperaturen T9 und T10 ab.

Der Verlauf der Kurve 3 (Meßstelle T11), gibt die Abgas-temperatur im Eintritt des Abluftkanals wieder. Diese Kurve zeigt ebenfalls zu Beginn des Versuches die gleiche Tendenz wie die Kurven 1 und 2. Mit dem Anstieg der Brandraumtemperatur nahm diese Temperatur sehr schnell zu. Der weitere Verlauf wurde im wesentlichen durch die Brandraumtemperatur bestimmt.

In Bild 28 ist der zeitliche Verlauf der Temperaturen in der Türöffnung Treppenraum/Vorraum sowie im Treppenraum aufgetragen. Die Kurven 1 bis 3 geben den zeitlichen Temperaturverlauf an den Meßstellen T12 bis T14 wieder. Diese Meßstellen waren in verschiedenen Höhen der Türöffnung Treppenraum/Vorraum angeordnet. Nach dem Öffnen der Brandraumtür stiegen die Temperaturen an diesen Meßstellen mit zunehmender Vorraumtemperatur an. Beim Öffnen der Tür Treppenraum/Vorraum strömte kalte Luft aus dem Treppenraum in den Vorraum, wodurch die Temperaturen sanken. Bei einer Versuchszeit von 15 min stieg die Temperatur an der Meßstelle T12 (Kurve 1) infolge des verringerten Zuluftvolumenstromes in den Treppenraum an. Eine wesentliche Erhöhung dieser Temperatur erfolgte, als die Tür zum Brandraum vollständig geöffnet wurde. Die höchste Temperatur an der Meßstelle T12 betrug  $230^{\circ}\text{C}$ .

Mit dem vollständigen Öffnen der Brandraumtür erfolgte auch eine leichte Erhöhung der Temperaturen an den Meßstellen T13 und T14 (Kurven 2 und 3). Die Höchstwerte dieser Temperaturen lagen bei  $27^{\circ}\text{C}$  bzw.  $24^{\circ}\text{C}$ . Die Kurve 4 gibt den zeitlichen Temperaturverlauf an der Meßstelle T15 in 1,5 m Höhe über dem Boden des Treppenraumpodestes vor dem Brandgeschoß wieder. Die ebenfalls mit dem vollständigen Öffnen der Brandraumtür ansteigende Temperatur erreichte einen Maximalwert von  $35^{\circ}\text{C}$ . Zum Vergleich ist auch hier wieder die Umgebungstemperatur als Kurve 5 aufgetragen.

Eine im Maßstab vergrößerte Darstellung des zeitlichen Temperaturverlaufes an den beiden unteren Meßstellen in der Türöffnung Vorraum/Treppenraum (T13 und T14) (Kurven 1 und 2) sowie im Treppenraum an den Meßstellen T15, T16 und T17 (Kurven 3, 4 und 5) und der Außentemperatur (Kurve 6) gibt Bild 29 wieder. Aus dieser Darstellung ersieht man, daß bei Versuchsbeginn die Temperaturen innerhalb des Gebäudes niedriger waren als die Außentemperatur.

## 6.2 Volumenströme

In Bild 30 ist der zeitliche Verlauf der aus den an den Meßstellen C5 bis C7 gemessenen dynamischen Drücke berechneten Volumenströme als Kurven 1 bis 3 aufgetragen. Dabei gibt die Kurve 1 den gesamten, von dem Zuluftventilator geförderten Volumenstrom wieder. Nach dem Einschalten der Anlage auf die volle Leistung wird ein Volumenstrom von  $16\text{ m}^3/\text{s}$  erreicht. Nachdem in der 16. Minute der Ventilator auf die halbe Leistung geschaltet wurde, betrug das Fördervolumen ca.  $6,9\text{ m}^3/\text{s}$ . In der 20. Minute wurde der Lüfter wieder auf die volle Leistung geschaltet. Während der restlichen Versuchszeit ergab sich ein nahezu konstanter Volumenstrom von ca.  $17,7\text{ m}^3/\text{s}$ .

Als Kurve 2 ist der dem Treppenraum 2 zugeführte Luftvolumenstrom aufgetragen. Innerhalb der Versuchszeit von 9 min bis

15 min betrug dieser Volumenstrom  $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei der halben Leistung des Zuluftventilators sank dieser Anteil auf ca.  $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$  ab. Nachdem der Zuluftventilator wieder auf die volle Leistung geschaltet wurde, ergaben sich stark schwankende Werte des Luftvolumenstromes in den Treppenraum 2. Erst ab der 45. Versuchsminute blieb der Wert im wesentlichen mit ca.  $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$  gleich. Die durch die Kurven 1 und 2 dargestellten Volumenströme sind auf die Zulufttemperatur von  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  bezogen.

Der aus dem Vorraum bei der Temperatur T11 (Kurve 3, Bild 27) abgeführte Volumenstrom des Luft- Rauchgasgemisches wird in Bild 30 durch die Kurve 3 wiedergegeben. Der maximale Abgasvolumenstrom beträgt  $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 6.3 Druckdifferenzen

In Bild 31 ist der zeitliche Verlauf der Druckdifferenzen zwischen der freien Atmosphäre und dem Treppenraum in Höhe des 3. Untergeschosses (Kurve 1), dem Treppenraum in Höhe des 1. Untergeschosses (Kurve 2) sowie dem Vorraum (Kurve 3) dargestellt. Die Meßstellen P1, P2 und P4 (siehe Bild 21), befanden sich alle 1,5 m über dem Boden.

Bei einer Versuchszeit von ca. 10 min war es infolge des Überdruckes im Treppenraum nicht möglich, die Tür 2/11 (siehe Bild 15), die in den Treppenraum aufschlägt, zu öffnen. Der Druckverlauf im Treppenraum 1, der nicht gemessen wurde, entspricht etwa dem Druckverlauf an der Meßstelle P1 (Kurve 1) in Bild 31. Bei der Versuchszeit von 10 min herrschte demnach im Treppenraum 1 ein Überdruck von ca.  $120 \text{ N/m}^2$ .

Die während des Versuches ermittelten Druckdifferenzen zwischen der freien Atmosphäre und dem Brandraum sowie der Halle sind in Abhängigkeit von der Versuchszeit im Bild 32 durch die Kurven 2 und 3 dargestellt. Zum besseren Vergleich sind in dieses Bild nochmals die Werte der Druckdifferenz zwischen Vorraum und freier Umgebung mit eingetragen (Kurve 1).

Aus dieser Darstellung ergibt sich, daß der Druck im Brandraum in 1,5 m Höhe größer war als im Vorraum und daß er etwa ab der 8. Versuchsminute mit der gleichen Tendenz wie im Vorraum verläuft. Der Verlauf der Kurve 3 (Meßstelle P6) zeigt, daß in der Halle während der ganzen Versuchsdauer etwa der Druck der freien Atmosphäre herrschte.

#### 6.4 Strömungsgeschwindigkeiten

Aus den in den Türöffnungen 01/21 und 2/21 gemessenen dynamischen Drücken wurden die Strömungsgeschwindigkeiten berechnet. Da die Meßwerte infolge der äußerst ungünstigen Strömungsbedingungen stark schwankten, sind in Bild 33 die über verschiedene Zeitintervalle gebildeten arithmetischen Mittelwerte aufgetragen. Die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen sind, sofern sie nicht zeitlich unmittelbar aufeinander folgen, durch Geraden miteinander verbunden.

Die Kurven 1, 2 und 3 geben den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in der Türöffnung 01/21 (Treppenraum/Vorraum) wieder. Der seitliche Abstand der Meßstellen innerhalb der Türöffnung wurde so geändert, daß sich die Prandtlrohre jeweils in der Mitte des Strömungsquerschnittes befanden. Die Kurve 4 (Meßstelle C4) gibt die Geschwindigkeit durch die während des ganzen Versuches vollständig offen gehaltene Tür 2/21 wieder. Diese Meßstelle befand sich in der Mitte der Türöffnung.

#### 6.5 Optische Rauchdichten

Im Bild 34 ist der zeitliche Verlauf der an den Meßstrecken RD1 bis RD4 (siehe Bild 21) gemessenen optischen Rauchdichten in Form des Extinktionskoeffizienten aufgetragen. Der Extinktionskoeffizient  $\sigma$  wurde nach der Beziehung

$$\sigma = \frac{\ln (I_0/I)}{l} \quad (1)$$

berechnet. In dieser Beziehung sind  $I_0$  und  $I$  die gemessenen

Beleuchtungsintensitäten ohne und mit Raucheinfluß und 1 die Länge des Lichtweges.

Der Verlauf der Kurve 1 in Bild 34 zeigt, daß im Vorraum eine starke Verqualmung mit dem teilweisen Öffnen der Brandraumtür eintrat. Eine weitere starke Verqualmung des Vorraumes erfolgte beim vollständigen Öffnen der Brandraumtür bei einer Versuchszeit von 33 min. Auf der Oberfläche der Fotozelle der Rauchdichtemeßstrecke RD1 hatte sich nach dem starken Rauchgaseintritt Ruß niedergeschlagen, so daß keine zuverlässigen Meßwerte von dieser Meßstrecke nach einer Versuchszeit von ca. 40 min mehr registriert wurden.

An den Meßstellen RD 2 bis RD 4 wurden Intensitätsänderungen erst ab einer Versuchszeit von ca. 19 min registriert. Zu dieser Zeit stiegen die Werte für den Extinktionskoeffizienten kurzzeitig stark an (RD4 auf  $\sigma = 0,92$ , RD2 auf  $\sigma = 0,5$ ) und sanken danach wieder auf Werte von ca. 0,3 bzw. ca. 0,15 ab.

Wesentlich für die Beurteilung der Rauchfreihaltung des Treppenraumes sind die Werte an den Meßstrecken RD3 und RD4 (Kurven 3 und 4) anzusehen. Diese Meßstellen waren jeweils 1/2 Geschoß unter bzw. über dem Brandgeschoß angeordnet. Der aus dem oberen Teil der Tür O1/21 (Treppenraum/Vorraum) austretende Rauchgasvolumenstrom wurde mit der Meßstrecke RD2 erfaßt.

#### 6.6 CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Im Bild 35 sind die mit Prüfröhrchen gemessenen Konzentrationen von CO und CO<sub>2</sub> im Rauchgas- Luftgemisch über der jeweiligen Zeit des Beginns der Rauchgasabsaugung aufgetragen. Die einzelnen Meßpunkte der gleichen Meßstelle sind durch Geraden miteinander verbunden.

An der Meßstelle G1 trat während des Versuches eine Störung beim Abpumpen der Rauchgase auf, so daß hierfür keine gesicherten Meßwerte vorliegen.

An der Meßstelle G2 (Kurven 1.1 und 1.2) wurde die höchste  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 0,5% in der 41. Minute gemessen. Die höchste CO-Konzentration wurde mit 500 ppm bei einer Versuchszeit von 49 min und 57 min ermittelt. An der Meßstelle G3 (Kurven 2.1 und 2.2), die sich eine Treppe oberhalb des Brandgeschosses befand, wurden wesentlich niedrigere Konzentrationen gemessen. Die Höchstwerte betragen für  $\text{CO}_2$  0,2 Vol.-% und für CO 10 ppm. Der MAK-Wert beträgt für  $\text{CO}_2$  0,5 Vol.-% und für CO 50 ppm.

## 7. BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

### 7.1 Subjektive Bewertung

Aufgrund der subjektiven Beurteilung der Beobachter des Brandversuches ergibt sich, daß der Treppenraum während der ganzen Versuchszeit als Rettungsweg benutzt werden konnte, obwohl z.T. wesentlich ungünstigere Bedingungen für die Rauchfreihaltung als für die Auslegung angenommen vorlagen. Die in den Treppenraum eingedrungenen Rauchgasvolumenströme waren so gering, daß sie zu keinen unzumutbaren Behinderungen führten. Durch folgende Abweichungen der Versuchsbedingungen von dem bei der Auslegung des Druckbelüftungssystems angenommenen Verhältnissen ergaben sich verschärfte Bedingungen für die Rauchfreihaltung des Treppenraumes während des Brandversuches.

1. Halbe Leistung des Zuluftventilators bei etwa der in der Rechnung zugrunde gelegten Brandtemperatur.
2. Wesentlich höhere Brandraumtemperaturen als für die Auslegung zugrunde gelegt.
3. Da nicht alle der im Endausbau vorhandenen hintereinander angeordneten Türen zwischen dem Treppenraum und der freien Umgebung, insbesondere im Erdgeschoß, eingebaut waren, ergaben sich höhere Leckageluftströme vom Treppenraum in die freie Umgebung durch die Spalten bzw. Türöffnungen der vorhandenen Türen.
4. Vollständiges Öffnen von allen Türen im Treppenraum, sowie der Türen Treppenraum/Vorraum und Vorraum/Brandraum. Dadurch entstanden große Leckagevolumenströme und höhere Temperaturen im Vorraum.

## 7.2 Bewertung der Versuchsergebnisse

Neben dieser subjektiven Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Druckbelüftungssystems ergeben sich anhand der Versuchsergebnisse folgende Bewertungen des Versuchsauflaufes. Die Beurteilung der Versuchswerte wird dabei in die Zeitabschnitte unterteilt, in denen sich keine wesentlichen Veränderungen der Versuchsbedingungen ergaben.

### Zeit 2 min bis 6 min

Lüftungsanlage nicht in Betrieb

Brandraumtür geschlossen

Tür 2/21 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenräumen 1 und 2 sind geschlossen

Die Ausgangstemperaturen an den einzelnen Meßstellen innerhalb des Gebäudes lagen alle zwischen  $13,9^{\circ}\text{C}$  (Meßstelle T16) und  $15,6^{\circ}\text{C}$  (Meßstelle T10). Die Außentemperatur betrug  $16,2^{\circ}\text{C}$ . Nach dem Entzünden der Brandlast stiegen die Deckentemperaturen schnell an. Mit einer zeitlichen Verzögerung folgten auch die Temperaturen an den an der Tür zum Brandraum angeordneten Meßstellen T6, T7 und T8 (siehe Bild 26). Aus diesen Temperaturprofilen ergibt sich eine Aussage über die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Höhe im Brandraum. Im Vorraum stieg nur die Temperatur an der Meßstelle T11 (Bild 27) deutlich an. Mit diesem Temperaturanstieg setzt auch die Kaminwirkung des Abluftschachtes ein. Im Vorraum begann sich ein Unterdruck einzustellen (siehe Bild 32), der auch den Druck im Brandraum beeinflusste. Der im Brandraum aufgetretene Überdruck von maximal  $13,8 \text{ N/m}^2$  wurde dadurch wieder abgebaut. Rauchgase traten in dieser Phase nicht in den Treppenraum ein.



Zeit 6 min bis 9 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür 30 cm auf

Tür 2/21 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenräumen 1 und 2  
sind geschlossen

Die Temperaturen im Brandraum (Kurve 1 im Bild 26) waren in diesem Zeitabschnitt etwa konstant und betragen  $360^{\circ}\text{C}$ . Nach dem Öffnen der Brandraumtür auf eine Spaltbreite von 30 cm traten in den Vorraum verstärkt Rauchgase ein. Diese führten zu einer starken Verqualmung im Vorraum (siehe Bilder 22b und 34) sowie zu einer Temperaturzunahme. Durch die verstärkte Kaminwirkung des Absaugeschachtes verstärkte sich der Unterdruck im Vorraum bis auf  $13,3 \text{ N/m}^2$  (siehe Bild 32). Im Brandraum sank der Druck aufgrund der höheren Temperatur nicht ganz so weit ab als im Vorraum. Die Temperaturen an den Meßstellen T9 und T10 (siehe Bild 27) waren auf  $68^{\circ}\text{C}$  angestiegen. Der Abgasvolumenstrom am Ende dieses Zeitbereiches betrug  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$  bei einer Abgastemperatur von ca.  $180^{\circ}\text{C}$ . Bezogen auf die Temperatur der Frischluft von  $15^{\circ}\text{C}$  entspricht dies einem Abgasvolumenstrom von  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Das Einschalten des Druckbelüftungssystems bei einer Versuchszeit von 6 min 20 s hatte keinen Einfluß auf die Vorgänge im Vorraum und im Brandraum bei noch geschlossener Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) ausgeübt. Rauchgase sind in diesem Zeitabschnitt nicht in den Treppenraum eingedrungen. Die maximale Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Vorraum betrug in dieser Periode  $120 \text{ N/m}^2$ .

In der Zeit von 6 min bis 9 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	360 °C
Temperatur im Vorraum in 1,5 m Höhe T9, T10	45 °C
Abgastemperatur T11	125 °C
Temperatur im Treppenraum T15	15,2 °C
T16	14,5 °C
T17	15,6 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	8,5 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C5)	3,11 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 125 °C (C6)	0,24 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C	0,17 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	ca. 25 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenzen Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	ca. 33 N/m <sup>2</sup>

Zeit 9 min bis 15 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür 30 cm auf

Tür 01/21 30 cm auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 0/21 mit Rahmen herausgefallen, zeitweise wieder zugeedrückt

Alle übrigen Türen in den Treppenräumen 1 und 2 sind geschlossen

Die Brandraumtemperatur (Kurve 1 in Bild 26) war auch in diesem Zeitbereich im wesentlichen konstant geblieben. Der Mittelwert betrug 366 °C. Mit dem Öffnen der Tür 01/21 (Treppenraum/Vorraum) strömte Frischluft aus dem Treppenraum in den Vorraum. Die Druckdifferenz Vorraum/Umgebung stieg von -13,3 N/m<sup>2</sup> kurzzeitig auf 80 N/m<sup>2</sup> an. Sie sank in der zweiten Hälfte dieser Periode auf einen nahezu konstanten Wert von ca. 30 N/m<sup>2</sup> ab. Der Druck im Brandraum lag etwas höher als der Druck im Vorraum. Anhand der Temperaturkurven in Bild 26 ergibt sich, daß in dieser Zeit Luft von ca. 39 °C durch den unteren Teil der Türöffnung vom Vorraum in den Brandraum und daß im oberen Teil Rauchgase aus dem Brandraum in den Vorraum eindringen. Die Temperaturen

an den Meßstellen T9 und T10 (Kurven 1 und 2 in Bild 27) erreichten in der zweiten Hälfte dieser Periode einen Wert von ca. 24 °C.

Die Temperaturen an den Meßstellen T12 bis T14 in der Türöffnung 01/21 (Treppenraum/Vorraum) in den verschiedenen Höhen, sanken mit dem Öffnen der Tür auf die Frischlufttemperatur von ca. 15 °C ab. Während die Temperaturen T13 und T14 (siehe Bild 28) diesen Wert beibehielten, stieg die Temperatur T12 auf ca. 23 °C an. Dieser Temperaturanstieg ergab sich im wesentlichen durch die Wärmestrahlung der heißen Rauchgase unterhalb der Decke des Vorraumes auf die Meßstelle. Die Temperatur des abgeführten Rauchgas-Luftgemisches (T11, siehe Bild 27), sank durch den starken Zustrom von Frischluft in den Vorraum auf ca. 47 °C ab und stieg danach wieder auf ca. 113 °C an.

Im Treppenraum 2 hatte sich am Ende dieser Periode an der Meßstelle P2 (siehe Bild 31, Kurve 2) ein Überdruck von 34,6 N/m<sup>2</sup> gegenüber dem atmosphärischen Druck eingestellt. Der Überdruck zwischen Treppenraum und Vorraum betrug in Höhe der Meßstellen zu diesem Zeitpunkt 2,8 N/m<sup>2</sup>.

In der Zeit von 10 min bis 15 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	367 °C
Temperatur im Vorraum in 1,5 m Höhe	
T9	31 °C
T10	33 °C
Abgastemperatur T11	83 °C
Temperatur im Treppenraum	
T15	16,3 °C
T16	16,2 °C
T17	16,9 °C

Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	16,0 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom in Treppenraum 2 (C5)	8,5 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 83 °C (C6)	1,30 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C	1,05 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenhaus P2	56,0 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	6,4 N/m <sup>2</sup>

In diesem Zeitbereich sind keine Rauchgase in den Treppenraum eingedrungen.

Zeit 15 min bis 19 min

Lüftungsanlage halbe Leistung

Brandraumtür 30 cm auf

Tür 01/21 30 cm auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 2/11 ganz auf

Tür 0/21 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenträumen 1 und 2 sind geschlossen

Die Brandraumtemperatur (Mittelwert aus den Meßstellen T1 bis T5) stieg in diesem Zeitbereich von ca. 400 °C auf 450 °C an. Die Abgastemperatur T11 (siehe Bild 27) stieg von 122 °C auf 250 °C an. Die Temperaturen T9 und T10 (siehe Bild 27), die im Vorraum in 1,5 m Höhe gemessen wurden, veränderten sich nicht. An den Meßstellen in der Türöffnung 01/21 (Kurven 1 bis 3 in Bild 28) war nur die Temperatur an der Meßstelle T12 von 24 °C auf 50 °C angestiegen. Dieser Temperaturanstieg ist auf die erhöhte Wärmeeinstrahlung der heißen Rauchgase unterhalb der Decke des Vorräumcs zurückzuführen. Rauchgase sind, wie sich aus den Bildern 34 und 35 ergibt, nicht in den Treppenraum eingegangen.

Aus dem Bild 33 ergibt sich als Folge des verringerten Zuluftstromes eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Türöffnungen 01/21 und 2/21. Infolge des geringe-

ren Zuluftvolumenstromes sanken auch die Drücke im Treppenraum, im Vorraum und im Brandraum ab (siehe Bild 31 und 32). Im Vorraum stellte sich in der zweiten Hälfte dieser Periode ein Unterdruck von  $2,8 \text{ N/m}^2$  gegenüber der freien Atmosphäre ein. Der Überdruck im Treppenraum an der Meßstelle P2 gegenüber dem Druck im Vorraum (Meßstelle P4) betrug  $5,1 \text{ N/m}^2$ .

In der Zeit von 16 min bis 19 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	418 °C
Temperatur im Vorraum in 1,5 m Höhe	
T9	22 °C
T10	25 °C
Abgastemperatur (T11)	195 °C
Temperatur im Treppenraum	
T15	15,9 °C
T16	15,7 °C
T17	15,9 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	6,95 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom (C5)	2,53 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 195 °C (C6)	1,12 m <sup>3</sup> /s
"                  umgerechnet auf 15 °C	0,69 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	6,4 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	2,8 N/m <sup>2</sup>

In diesem Zeitbereich sind keine Rauchgase in den Treppenraum eingedrungen.

Zeit 19 min bis 23 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraamtür 30 cm auf

Tür 01/21 ganz auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 0/21 ganz auf

Tür 2/11 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenträumen 1 und 2 sind geschlossen

Als Folge der verstärkten Brandintensität stieg im Brandraum die Temperatur stark an. Der Mittelwert aus den Meßstellen T1 bis T5 erreichte einen Wert von  $647^{\circ}\text{C}$ . Beim vollständigen Öffnen der Tür O1/21 (Treppenraum/Vorraum) bei einer Versuchszeit von 19 min, zu der die Lüftungsanlage noch mit halber Leistung lief, drangen Rauchgase vom Vorraum in den Treppenraum ein (siehe Bild 34). Diese Rauchgase sind in dem Teil der Türöffnung O1/21 ausgetreten, der oberhalb der Temperaturmeßstelle T12 lag, da sich die Temperatur an dieser Meßstelle, die 20 cm unterhalb der Oberkante der Türöffnung angebracht war, nicht nennenswert erhöhte. Wahrscheinlich wurde der plötzliche Rauchgaseinbruch in den Treppenraum auch dadurch hervorgerufen, daß durch das plötzliche Öffnen der Tür O1/21 eine Druckänderung im Vorraum auftrat, durch die Frischluft aus dem Treppenraum in den Vorraum und Rauchgase aus dem Vorraum in den Treppenraum austraten. Nachdem die Lüftungsanlage bei einer Versuchszeit von 19 min 45 s wieder auf die volle Leistung geschaltet wurde, ging die optische Rauchdichte im Treppenraum bis auf einen Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  von ca. 0,2 zurück (siehe Bild 34). Zum Zeitpunkt des vollständigen Öffnens der Tür O1/21 ging der in den Treppenraum 2 strömende Frischluftvolumenstrom stark zurück. Die Luftströmung im Treppenraum war dadurch so gering, daß (siehe Bild 34) Rauchgase auch in die Meßstrecke RD3, die unterhalb des Brandgeschosses angeordnet war, gelangen konnten. Dieses Abwärtsströmen von Rauchgasen wurde auch während des Versuches beobachtet.

In der Zeit von 20 min bis 23 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	602 °C
Temperatur im Vorraum in 1,5 m Höhe T9, T10	32 °C
Abgastemperatur T11	313 °C
Temperatur im Treppenraum T15	17,9 °C
T16	15,8 °C
T17	17,0 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	16,3 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C5)	1,37 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 313 °C (C6)	1,59 m <sup>3</sup> /s
" " umgerechnet auf 15 °C	0,78 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	9,8 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	0,9 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1	$\sigma = 0,70^+$
RD2	$\sigma = 0,14^+$
RD3	$\sigma = 0$
RD4	$\sigma = 0,21^+$

<sup>+</sup>Werte für die zweite Hälfte dieses Zeitbereiches.

In diesem Zeitbereich wurde nur an der Meßstelle G3 eine CO<sub>2</sub>-Messung durchgeführt. Die Konzentration lag unterhalb der Ansprechempfindlichkeit des Prüfröhrchens von ca. 0,01 Volumen %. Die in den Treppenraum eingedrungenen Rauchgase führten zu keiner Sichtbehinderung.

Zeit 23 min bis 26 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür 30 cm auf

Tür 01/21 ganz auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 0/21 ganz auf

Tür 2/11 30 cm auf

Alle übrigen Türen in den Treppenträumen 1 und 2 sind geschlossen

Gegenüber dem vorhergehenden Zeitabschnitt ist hier die Tür 2/11 bis auf 30 cm geschlossen worden. Dadurch strömte weniger Luft aus dem Treppenraum 1 ins Freie. Ein unmittelbarer Einfluß auf die Verhältnisse im Treppenraum 2 ist aufgrund der Versuchsergebnisse nicht zu erkennen.

In der Zeit von 23 min bis 26 min ergeben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	661 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9	43 °C
T10	41 °C
Abgastemperatur T11	331 °C
Temperatur im Treppenraum T15	18,5 °C
T16	15,8 °C
T17	17,7 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	17,5 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C5)	3,4 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 331 °C (C6)	1,77 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C	0,84 m <sup>3</sup> /s
Überdruck Treppenraum P2	9,8 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	0,7 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1	$\sigma = 0,54$
RD2	$\sigma = 0,09$
RD3	$\sigma = 0$
RD4	$\sigma = 0,17$

Für diesen Zeitbereich liegen keine Meßwerte für die Konzentration von CO und CO<sub>2</sub> vor. Die optische Rauchgasdichte im Treppenraum fiel in diesem Zeitraum weiter ab. Aufgrund der Meßwerte ergibt sich, daß der Rauchgasaustritt vom Vorraum in den Treppenraum innerhalb dieses Zeitabschnittes eine abnehmende Tendenz aufwies.



Zeit 26 min bis 29 min

Lüftungsanlage volle Leistung  
Brandraumtür 30 cm auf  
Tür 01/21 ganz auf  
Tür 2/21 ganz auf  
Tür 0/21 ganz auf  
Tür 2/11 ganz auf  
Alle übrigen Türen in den Treppen-  
räumen 1 und 2 sind geschlossen.

Diese Stellung der Türen entspricht der in dem Zeitbereich von 19 min bis 23 min. Gegenüber diesem Zeitbereich hat sich nur die Brandraumtemperatur sowie die Temperatur der Abgase nennenswert erhöht.

In der Zeit von 26 min bis 29 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert T1 bis T5)	702 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9, T10	45 °C
Abgastemperatur (T11)	351 °C
Temperatur im Treppenraum T15	19,6 °C
T16	19,7 °C
T17	18,3 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	17,4 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C5)	3,6 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 351 °C (C6)	1,83 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C	0,84 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	11,8 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	1,1 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1 σ =	0,38
RD2 σ =	0,03
RD3 σ =	0
RD4 σ =	0,18

In diesem Zeitbereich wurde an der Meßstelle G2 eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,25 Vol.-% und an der Meßstelle G3 eine von 0,2 Vol.-% gemessen. Meßwerte für CO lagen nicht vor.

Trotz verringertem Zuluftvolumenstrom in den Treppenraum 2 ging die optische Rauchgasdichte im Treppenhaus weiter zurück. Daraus folgt, daß der Rauchgasaustritt vom Vorraum in den Treppenraum weiterhin eine abnehmende Tendenz hatte.

Zeit 29 min bis 33 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür 20 cm auf

Tür 01/21 ganz auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 0/21 ganz auf

Tür 2/11 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenträumen 1 und 2 sind geschlossen

In diesem Zeitbereich war die Temperatur im Brandraum durch das kurzzeitige Besprühen des Brandgutes mit Wasser zurückgegangen (siehe Bild 26). Dadurch sind auch die Temperaturen im Vorraum (siehe Bild 27) abgesunken. Die optische Rauchdichte im Treppenraum ging an allen Meßstrecken nach kurzer Zeit auf 0 zurück (siehe Bild 34 , Kurve 2, 3 und 4). Daraus folgt, daß ab einer Versuchszeit von ca. 31 min keine Rauchgase mehr vom Vorraum in den Treppenraum austraten. In diesem Zeitbereich wurden an der Meßstelle G3 eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,1 Vol.-% gemessen.

In der Zeit von 29 min bis 33 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)	622 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9, T10	46 °C
Abgastemperatur T11	300 °C
Temperatur im Treppenraum T15	18,7 °C
T16	15,6 °C
T17	17,5 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)	17,7 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C5)	5,1 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 300 °C (C6) umgerechnet auf 15 °C	1,71 m <sup>3</sup> /s 0,86 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	10,8 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	1,6 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1 $\sigma =$	0,36
RD2 bis RD4 $\sigma =$	0 ab der 31. Minute

Zeit 33 min bis 38 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür ganz auf

Tür 01/21 ganz auf

Tür 2/21 ganz auf

Tür 0/21 ganz auf

Tür 2/11 ganz auf

Alle übrigen Türen in den Treppenräumen 1 und 2 sind geschlossen

Durch das vollständige Öffnen der Brandraumtür erfolgte ein verstärkter Austausch von Rauchgasen aus dem Brandraum mit dem Rauchgas-Luftgemisch des Vorraumes. Daraus folgt der Anstieg der optischen Rauchdichte im Vorraum (siehe Bild 34, RD1) sowie der Temperaturen im Vorraum an den Meßstellen T9 und T10. Diese Temperaturen stiegen von 44 °C auf 194 °C bzw. 183 °C an. Mit dem Ansteigen der Vorraumtemperatur erfolgte auch ein Rauchgasaustritt vom Vorraum in den Treppen-

raum (siehe Bild 34), da gleichzeitig der dem Treppenraum 2 zugeführte Luftvolumenstrom zeitweise bis auf  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  zurückging (Bild 30, Kurve 2). Aus diesem Grund konnten auch geringe Rauchgasmengen im Treppenraum abwärts strömen bis zur Meßstrecke RD3 (siehe Bild 34, Kurve 3).

In der Zeit von 33 min bis 38 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert aus T1 bis T5)		660 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum	T9	138 °C
	T10	141 °C
Abgastemperatur	T11	298 °C
Temperatur im Treppenraum	T15	23,2 °C
	T16	15,6 °C
	T17	21,6 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)		17,6 $\text{m}^3/\text{s}$
Zuluftstrom im Treppenraum 2 (C5)		1,10 $\text{m}^3/\text{s}$
Abgasvolumenstrom bei 298 °C (C6)		1,73 $\text{m}^3/\text{s}$
" umgerechnet auf 15 °C		0,87 $\text{m}^3/\text{s}$
Überdruck im Treppenraum	P2	9,2 $\text{N}/\text{m}^2$
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)		1,4 $\text{N}/\text{m}^2$
Optische Rauchdichte	RD1 $\sigma =$	1
	RD2 $\sigma =$	0,085
	RD3 $\sigma =$	0,0005
	RD4 $\sigma =$	0,0300
CO <sub>2</sub> -Konzentration Meßstelle G3		0,1 Vol.-%
CO-Konzentration Meßstelle G3		0 Vol.-%

Zeit 38 min bis 42 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür ganz auf

Alle Türen in den Treppenräumen 1 und 2 sind ganz geöffnet

Wesentliches Merkmal in diesem Zeitbereich war es, daß durch das Öffnen aller Türen der Druck im Treppenraum sowie im Brandraum und im Vorraum um ca.  $8 \text{ N/m}^2$  bis  $12 \text{ N/m}^2$  absank (siehe Bild 31 und 32). In diesem Zeitbereich ging der dem Treppenraum 2 zugeführte Zuluftvolumenstrom bei konstantem gesamten Zuluftvolumenstrom für ca. 2 min bis auf 0 zurück (Bild 30). Die optische Rauchdichte an der Meßstrecke RD2 (siehe Bild 34) verringerte sich jedoch deutlich, nachdem der Zuluftvolumenstrom in den Treppenraum 2 wieder zugenommen hatte.

In der Zeit von 38 min bis 42 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandtemperatur (Mittelwert T1 bis T5)		634 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9		182 °C
T10		188 °C
Ablufttemperatur T11		297 °C
Temperatur im Treppenraum T15		25,8 °C
T16		15,4 °C
T17		24,0 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C7)		17,5 m <sup>3</sup> /s
Zuluftstrom im Treppenraum 2 (C5)		2,77 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 297 °C (C6)		1,61 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C		0,81 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2		-0,3 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)		3,6 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1	σ =	-
RD2	σ =	0,065
RD3	σ =	0,009
RD4	σ =	0,030
CO <sub>2</sub> -Konzentration Meßstelle G2		0,5 Vol.-%
Meßstelle G3		0,15 Vol.-%
CO-Konzentration Meßstelle G2		0 Vol.-%

Zeitbereich 42 min bis 52 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür ganz auf

Tür 0/11 geschlossen

Tür 2/11 geschlossen

Alle übrigen Türen in den Treppenträumen  
1 und 2 sind ganz offen

Das Schließen der Türen 01/11 und 2/11 im Treppenraum 1 bewirkte keinen nennenswerten Einfluß auf die Verhältnisse im Treppenraum und im Vorraum. Der Druck im Treppenraum stieg nach dem Schließen geringfügig an. Die Zunahme des Zuluftvolumenstromes in dem Treppenraum 2 von  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  auf durchschnittlich  $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$  kann nicht ausschließlich auf das Schließen der beiden Türen zurückgeführt werden, da im vorhergehenden Zeitabschnitt der gleiche Anstieg des Volumenstromes gemessen wurde, ohne daß ein Anlaß dafür bekannt war.

In der Zeit von 42 min bis 52 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandtemperatur (Mittelwert T1 bis T5)	488 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9	145 °C
T10	126 °C
Abgastemperatur T11	244 °C
Temperatur im Treppenraum T15	32,2 °C
T16	15,2 °C
T17	22,2 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C5)	$17,6 \text{ m}^3/\text{s}$
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C7)	$5,53 \text{ m}^3/\text{s}$
Abgasvolumenstrom bei 224 °C (C6)	$1,35 \text{ m}^3/\text{s}$
" umgerechnet auf 15 °C	$0,78 \text{ m}^3/\text{s}$
Überdruck im Treppenraum P2	$0,9 \text{ N/m}^2$
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	$2,2 \text{ N/m}^2$

Optische Rauchdichte RD1	$\sigma$	=	-
	RD2	$\sigma$	= 0,0305
	RD3	$\sigma$	= 0,0100
	RD4	$\sigma$	= 0,0250
CO <sub>2</sub> -Konzentration Meßstelle G2		=	0,25 Vol.-%
	G3		= 0,15 Vol.-%
CO-Konzentration Meßstelle G2		=	500 ppm
	G3		= 10 ppm

Zeitbereich 52 min bis 55 min

Lüftungsanlage volle Leistung  
Brandraumtür ganz auf  
Tür 2/11 30 cm geöffnet  
Tür 0/11 30 cm geöffnet (ab der Versuchszeit 53 min)  
Alle übrigen Türen in den Treppenträumen 1 und 2  
sind geöffnet

Durch das teilweise Öffnen der Türen 2/11 und 0/11 wurden praktisch keine darauf zurückführenden Veränderungen im Treppenraum sowie im Vorraum registriert. Die Abnahme der Temperaturen im Vorraum und in der Türöffnung 01/21 (Treppenraum/Vorraum) sind auf die absinkende Brandtemperatur zurückzuführen.

In der Zeit von 52 min bis 55 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandtemperatur (Mittelwert T1 bis T5)		377 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9		103 °C
	T10	84 °C
Abgastemperatur T11		172 °C
Temperatur im Treppenraum T15		30,0 °C
	T16	15,2 °C
	T17	19,1 °C
Gesamter Zuluftvolumenstrom (C5)		17,7 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom in Treppenraum 2 (C7)		6,16 m <sup>3</sup> /s

Abgasvolumenstrom bei 172 °C (C6)	1,16 m <sup>3</sup> /s
" umgerechnet auf 15 °C	0,75 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	0,60 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/ Vorraum (P2-P4)	0,8 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1 σ =	-
RD2 σ =	0,0175
RD3 σ =	0,0500
RD4 σ =	0,0125
CO <sub>2</sub> -Konzentration Meßstelle G2	0,25 Vol.-%
CO-Konzentration Meßstelle G2	500 ppm

Zeit 55 min bis 60 min

Lüftungsanlage volle Leistung

Brandraumtür ganz auf

Alle Türen in den Treppenräumen 1 und 2  
sind ganz geöffnet

Das wiederholte vollständige Öffnen der Tür 0/11 und 2/11 ergab keinen sichtbaren Einfluß auf die Verhältnisse im Treppenraum 2 und im Vorraum. Die Temperaturen in diesen Räumen wurden durch die abnehmbare Brandintensität im Brandraum bestimmt. Die optische Rauchdichte an allen Meßstellen im Treppenraum erreichte am Ende dieses Zeitbereiches den Wert 0.

In der Zeit von 55 min bis 60 min ergaben sich folgende zeitlichen Mittelwerte:

Brandraumtemperatur (Mittelwert T1 bis T5)	338 °C
Temperatur in 1,5 m Höhe im Vorraum T9	85 °C
T10	73 °C
Abgastemperatur T11	148 °C
Temperatur im Treppenraum T15	27,5 °C
T16	15,2 °C
T17	18,5 °C



Gesamter Zuluftvolumenstrom (C5)	17,9 m <sup>3</sup> /s
Zuluftvolumenstrom im Treppenraum 2 (C7)	6,89 m <sup>3</sup> /s
Abgasvolumenstrom bei 148 °C (C6)	1,12 m <sup>3</sup> /s
" " umgerechnet auf 15 °C	0,77 m <sup>3</sup> /s
Überdruck im Treppenraum P2	2,5 N/m <sup>2</sup>
Druckdifferenz Treppenraum/Vorraum (P2-P4)	0,7 N/m <sup>2</sup>
Optische Rauchdichte RD1 σ =	-
RD2 σ =	0,0105
RD3 σ =	0,0045
RD4 σ =	0,0105
CO <sub>2</sub> -Konzentration Meßstelle G2	0 Vol.-%
Meßstelle G3	0,1 Vol.-%
CO-Konzentration Meßstelle G2	325 ppm
Meßstelle G3	10 ppm

## 8. BEURTEILUNG DER WIRKSAMKEIT DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS

### 8.1 Wirksamkeit im Auslegungsbereich des Druckbelüftungssystems

Entsprechend den Anforderungen muß das Druckbelüftungssystem das Eindringen von Rauchgasen in die Treppenträume im Falle eines Brandes bei einer Brandraumtemperatur von 400 °C verhindern, wenn folgende Türen ganz bzw. teilweise offenstehen:

Im 2. Obergeschoß Türen Treppenraum/Fluchtbalkon ganz geöffnet,  
im Erdgeschoß alle Türen zwischen Treppenraum und freier Umgebung ganz geöffnet und  
im Brandgeschoß alle Türen zwischen Treppenraum und Brandraum 30 cm auf.

Um diesen Forderungen zu genügen, hätten bei der Versuchsdurchführung folgende Türen ganz bzw. teilweise offenstehen müssen:

Im 2. Obergeschoß Tür 2/11 und 2/21 ganz auf (siehe Bild 15),  
im Erdgeschoß Tür 0/11 und 0/21 ganz auf (siehe Bild 13),  
im Brandgeschoß (1. Untergeschoß) die Tür 01/21 sowie die Brandraumtür 30 cm auf (siehe Bild 12).

Bei dem Brandversuch waren die Türen 2/11 und 2/21 in ihrem endgültigen Einbauzustand vorhanden. Im Erdgeschoß waren entgegen dem endgültigen Ausbauzustand (siehe Bild 13) nur die Türen 0/11 und 0/21 vorhanden. Die Türen in den entlüfteten Vorräumen fehlten (siehe Bild 6). Dadurch erhöht sich entsprechend den Berechnungen der durch diese Türen abströmende Luftvolumenstrom um ca. 70 %. Ebenso er-

gab sich im 2. und 3. Untergeschoß (siehe die Bilder 11 und 10) ein erhöhter Luftvolumenstrom aus dem Treppenraum, wenn die Türen zu den Treppenträumen geöffnet wurden, da infolge der fehlenden Türen eine direkte Verbindung mit der freien Umgebung (Tiefgarage) entstand.

Die geforderte Stellung der Türen bei der der Treppenraum durch das Druckbelüftungssystem rauchfrei gehalten werden soll, war u.a. für den Treppenraum 2 in der Versuchszeit von 9 min bis 15 min sowie beide Treppenträume u.a. in der Zeit von 16 min bis 19 min gegeben. In diesen Zeiten sowie in den Zeitbereichen 42 min bis 52 min und 52 min bis 55 min lag der zeitliche Mittelwert des arithmetischen Mittelwertes der Brandraumtemperaturen T1 bis T5 bei ca. 400 °C. In Tabelle 1 sind die für die Beurteilung der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems wichtigen Versuchswerte zusammengestellt. In den in dieser Tabelle angegebenen Zeitbereichen waren die Versuchswerte etwa konstant. Zusätzlich zu den Versuchswerten sind in Tabelle 1 auch die berechneten Werte mit aufgeführt.

Bei voller Leistung ist der Zuluftvolumenstrom größer als der berechnete Wert von 14,4 m<sup>3</sup>/s. Der in den Treppenraum 2 strömende Anteil entspricht in dem Zeitbereich von 12,5 min bis 15 min etwa dem berechneten Anteil. Damit entspricht die Lüftungsanlage bei voller Leistung den geforderten Werten. Bei halber Leistung der Lüftungsanlage liegen die Volumenströme erheblich darunter.

Im Treppenraum 2 wurde bei voller Leistung eine wesentlich höhere Druckdifferenz als der berechnete Wert gemessen (Zeitbereich 12,5 min bis 15 min). Diese hohe Druckdifferenz ist auf den Strömungswiderstand des Luftvolumenstromes beim Durchströmen des Treppenraumteiles, der oberhalb des Brandraumes liegt, zurückzuführen. Berechnet wurde nur die minimale Druckdifferenz zwischen Treppenraum und freier Umgebung, bei der ein Rauchgasaustritt in dem Fall verhindert wird, wenn der Brandraum eine große Öffnung zur freien Umgebung hat.

Wesentlich für die Rauchfreihaltung des Treppenraumes ist jedoch die Druckdifferenz  $\Delta P_{TV}$  zwischen Treppenraum und Vorraum. Die bei voller als auch halber Leistung in den Zeitbereichen 12,5 min bis 15 min und 16,5 bis 19 min gemessene Druckdifferenz von  $2,8 \text{ N/m}^2$  hat den Rauchgas-eintritt in den Treppenraum verhindert. Der gemessene Wert liegt in beiden Fällen geringfügig über dem berechneten Wert von  $2,4 \text{ N/m}^2$ . Da bei halber Leistung des Zuluftventilators die Druckdifferenz  $\Delta P_{TU}$  in Höhe des Brandgeschosses stark zurückging, ergeben sich auch wesentlich geringere Luftvolumenströme durch die geöffneten Türen im Erdgeschoß sowie im 2. Obergeschoß. Deshalb hat auch in diesem Fall der wesentlich geringere Zuluftvolumenstrom ausgereicht, um den Treppenraum rauchfrei zu halten. Der hohe Zuluftvolumenstrom ist erforderlich, wenn ein Brand im 1. Obergeschoß ausbricht, um dann trotz offenstehender Türen im Erdgeschoß noch einen ausreichend hohen Druck im Treppenraum in Höhe des 1. Obergeschosses zu erhalten.

Der in der Tabelle 1 aufgeführte Abgasvolumenstrom bei  $15^\circ\text{C}$  entspricht etwa dem Zuluftvolumenstrom durch die Tür Treppenraum/Vorraum. Wie ein Vergleich mit dem berechneten Wert von  $1,05 \text{ m}^3/\text{s}$  zeigt, liegen die Versuchswerte um ca. 30 % niedriger.

Das installierte Druckbelüftungssystem entspricht aufgrund der bei dem Versuch erhaltenen Versuchswerte sowie der Beobachtungen der Forderung, den Treppenraum unter den genannten Bedingungen rauchfrei zu halten.

## 8.2 Wirksamkeit bei Bedingungen, die über den Auslegungsbereich des Druckbelüftungssystems hinausgehen.

Nach einer Versuchszeit von 19 min wurden durch das Ansteigen der Brandraumtemperatur sowie durch ein weiteres Öffnen von Türen, die Anforderung an das Druckbelüftungssystem z.T. wesentlich erhöht.

Wie aus den Werten für die einzelnen Zeitbereiche (siehe Abschnitt 7.2) hervorgeht, sind unter diesen ungünstigen Bedingungen nur so geringe Rauchgasvolumenströme in den Treppenraum eingedrungen, daß infolge der Verdünnung mit der durch den Treppenraum strömenden Luft keine gesundheitlichen Gefahren durch hohe CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auftraten.

Eine Sichtbehinderung im Treppenraum ergab sich aufgrund der Versuchswerte (siehe Bild 34) für wenige Minuten unmittelbar nach dem vollständigen Öffnen der Tür 01/21 bei einer Versuchszeit von 19 min. Da dabei auch der Luftvolumenstrom in den Treppenraum 2 auf 0 m<sup>3</sup>/s zurückging (siehe Bild 30), wurden die eindringenden Rauchgase nicht verdünnt. Ab einer Versuchszeit von 25 min lag der Extinktionskoeffizient  $\sigma$  für die Meßstrecke RD4 wieder unter 0,1. Von Watanaba wird in /3/ als zulässiger Wert für die Lichtschwächung in Rettungswegen ein Extinktionskoeffizient  $\sigma$  von 0,1 bis 0,5 angegeben. Daraus folgt, daß auch unter den wesentlich erschwerten Bedingungen für die Rauchfreihaltung des Treppenraumes mit Ausnahme der Zeit von 19 min bis 22 min keine Sichtbehinderung in Treppenraum 2 auftrat.

Bei der Beurteilung der Verhältnisse im Treppenraum ab der Versuchszeit von 19 min ist noch zu berücksichtigen, daß bis zur Versuchszeit von 50 min starke Schwankungen bei dem Luftvolumenstrom in dem Treppenraum 2 auftraten. Der anfangs gemessene Luftvolumenstrom von 8,6 m<sup>3</sup>/s wurde dabei weit unterschritten.

Für diese starken Schwankungen des Zuluftvolumenstromes in den Treppenraum 2 sind aufgrund der übrigen Versuchsergebnisse keine Ursachen zu erkennen. Es ist jedoch möglich, daß sich aufgrund der zum Teil noch fehlenden Türen und der dadurch bedingten geringeren Strömungswiderstände Schwingungen beim unkontrollierten Öffnen von Türen im

Treppenraum 1 ergeben haben. Diese Schwingungen werden sich jedoch wesentlich verringern, bzw. ganz beseitigt werden, wenn in dem Gebäude alle Türen, die den Luftaustritt aus dem Treppenraum beeinflussen, eingebaut sind.

#### 9. AUSWIRKUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUF KÜNFTIGE BE- RECHNUNGEN

Der Brandversuch hat gezeigt, daß die bei der Auslegung dieses Druckbelüftungssystems angewendeten Berechnungsverfahren größere Volumenströme ergeben, als sie in diesem Fall zur Rauchfreihaltung erforderlich waren. Die Ursache für diese Abweichung liegt im wesentlichen in der nicht vollständigen und gleichmäßigen Mischung der Frischluft mit den Rauchgasen im Vorraum. Während die Temperatur der Abgase etwa dem berechneten Wert entsprach (siehe Tabelle 1), ergaben sich jedoch erhebliche Abweichungen von dieser Temperatur im unteren Teil des Vorräumens durch die bereits erwähnte unvollständige Mischung (siehe Bild 27). Diese unvollständige Mischung der Frischluft mit den Rauchgasen wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da sie von der Geometrie des Vorräumens sowie von den Eintrittsstellen der Zuluft und der Rauchgase und von der Lage der Abgasöffnung abhängen.

Bei der Berechnung des Überdruckes im Treppenraum ist davon ausgegangen worden, daß der Brandraum eine große Öffnung zur freien Umgebung hat und daß dadurch die Druckverhältnisse im Brandraum und im Vorraum bestimmt werden. Bei dem hier durchgeführten Versuch war der Brandraum praktisch von der freien Umgebung abgeschlossen und der Druck wurde durch den Druck im Vorraum bestimmt. Dadurch, daß Rauchgase nur über den Abgaskanal abgeführt wurden, ist der Druck im Treppenraum ebenfalls vom Druck im Vorraum abhängig.

Der Austritt von Rauchgasen wird verhindert, wenn an der Oberkante der Tür zum Treppenraum der gleiche Druck wie im Vorraum herrscht. In Höhe der Meßstellen P2 und P4, die 0,5 m unterhalb der Oberkante der Türöffnung lagen, ergäbe sich theoretisch bei einer Vorraumtemperatur von 186 °C eine Druckdifferenz von 2,4 N/m<sup>2</sup>. Ein Vergleich mit den entsprechenden Werten in Tabelle 1 zeigt, daß die berechnete Druckdifferenz gut mit den gemessenen Druckdifferenzen  $\Delta P_{TV}$  übereinstimmt.

Im Bild 36 sind die gemessenen Druckdifferenzen (Kurve 1) über der Versuchszeit aufgetragen. Als Kurve 2 sind die für die gemessenen Abgastemperaturen T11 theoretisch erforderlichen Druckdifferenzen aufgetragen. Liegen die gemessenen Druckdifferenzen über den theoretisch erforderlichen Werten, so treten keine Rauchgase in den Treppenraum ein. Im umgekehrten Fall strömen Rauchgase vom Vorraum in den Treppenraum.

Ein Vergleich mit Bild 34 zeigt eine gute Übereinstimmung.

#### 10. LEISTUNGSGRENZEN DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS

Bei dem vorliegenden Druckbelüftungssystem ist die Grenzbedingung bis zu der das Eindringen der Rauchgase in den Treppenraum verhindert wird, durch die Abführung der Abgase gegeben. Hat ein Brandraum keine im Verhältnis zu seiner Brandlast große Verbindungsöffnung zur freien Umgebung, so liegt der abgeführte Abgasvolumenstrom entsprechend den Versuchsergebnissen bei maximal ca. 0,8 m<sup>3</sup>/s Abgas bezogen auf 15 °C. Dieser Abgasvolumenstrom reicht aus, wenn die Tür Treppenraum/Vorraum ca. 30 cm offen steht. Bei größerer Öffnungsbreite wäre ein entsprechend größerer Abgasvolumenstrom erforderlich. Da der Abgasvolumenstrom durch den Schacht begrenzt ist, treten Rauchgase in den Treppenraum ein wie die Versuchsergebnisse zeigen.

Besteht eine große Öffnung zwischen Brandraum und freier Umgebung, so wird der Rauchgaseintritt in den Treppenraum nur durch den Zuluftvolumenstrom in den Treppenraum sowie dem Druck im Treppenraum begrenzt. Wie die Versuchsergebnisse bei der Versuchszeit zwischen 12,5 min und 15 min zeigen, betrug die Druckdifferenz  $\Delta P_{TU}$  35 N/m<sup>2</sup> bei 8,6 m<sup>3</sup>/s Zuluftvolumenstrom in dem Treppenraum. Diese hohe Druckdifferenz kann bis auf 5,5 N/m<sup>2</sup> abfallen, ohne daß unter den bei der Berechnung zugrunde gelegten Bedingungen ein Raucheintritt in den Treppenraum folgt. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, daß in diesem Fall auch bei vollständig geöffneter Tür Treppenraum/Vorraum keine Rauchgase in den Treppenraum eindringen.

## 11. ZUSAMMENFASSUNG

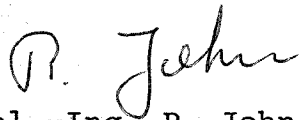
In einem Neubau eines Verwaltungsgebäudes in Hamburg befinden sich 2 innenliegende Treppenträume, die vom 3. Untergeschoß bis zum 2. Obergeschoß führen. Um im Brandfall die Treppenträume vor einem Rauchgaseintritt zu schützen, wurde ein Druckbelüftungssystem zum Schutz dieser Treppenträume eingebaut. Die Auslegungsdaten für dieses Druckbelüftungssystem wurden aufgrund von Daten berechnet, die durch theoretische Untersuchungen sowie durch Versuche ermittelt wurden. Die Funktions- und Leistungsfähigkeit dieses Druckbelüftungssystems wurde durch einen der Wirklichkeit entsprechenden Brandversuch überprüft.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß das Eindringen von Rauchgasen - unter den bei der Berechnung zugrunde gelegten Bedingungen - auch bei reduzierter Leistung des Zuluftvolumenstromes verhindert wird. Wurden die für die Auslegung angenommenen Bedingungen bezüglich der Rauchfreihaltung der Treppenträume verschärft, so ergab sich bei dem Versuch ein Rauchgaseintritt in den Treppenraum. Die in den Treppenraum einge-

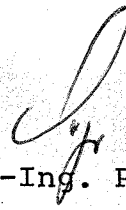


tretenen Rauchgase waren jedoch so gering, daß der Treppenraum während der ganzen Versuchsdauer als Rettungsweg benutzbar blieb, wie die unmittelbare Beurteilung von Beobachtern während des Brandversuches sowie die Versuchswerte ergeben haben.

Karlsruhe, den 24. 2.1981



(Dipl.-Ing. R. John)  
Sachbearbeiter



(Dr.-Ing. P.G. Seeger)  
Leiter der Forschungsstelle

LITERATURVERZEICHNIS

/1/ John, R.

Maßnahmen zum Schutz der Rettungswege gegen Rauchgaseintritt  
VFDB-Zeitschrift 27 (1978),  
H1, S. 34 - 36, H2, S. 56 - 58

/2/ John, R.

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe.  
Teil 2 und Teil 4: Ermittlung der Volumenströme durch Türöffnungen zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen. Forschungsberichte Nr. 35 (Okt. 1978) und Nr. 39 (Jan. 1980) der Arbeitsgemeinschaft der Innenminister der Bundesländer, Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten".

/3/ Watanaba, A.

Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der automatischen Brandentdeckung in Japan  
VFDB-Zeitschrift 20 (1971),  
H2, S. 56 - 60, H3, S. 85 - 93.

Tabelle 1: Zeitlicher Mittelwert der Meßwerte für verschiedene Zeitbereiche

Zeitbereich in min	12,5 bis 15	16,5 bis 19	42 bis 52	52 bis 55	Berechneter Wert
Lüftungsanlage	voll	halb	voll	voll	
$\dot{V}_{zu}$ m <sup>3</sup> /s	16,19	6,79	17,61	17,67	14,4
$\dot{V}_T$ m <sup>3</sup> /s	8,62	2,30	5,53	6,16	8,8
$\dot{V}_A$ m <sup>3</sup> /s	1,17	1,12	1,35	1,16	1,85
$\dot{V}_{A15}$ m <sup>3</sup> /s	0,88	0,68	0,78	0,75	1,16
$\Delta P_{TU}$ N/m <sup>3</sup>	35,3	5,1	0,9	0,6	5,5
$\Delta P_{VU}$ N/m <sup>3</sup>	31,9	1,7	-2,6	-1,3	0
$\Delta P_{TV}$ N/m <sup>2</sup>	2,8	2,8	2,2	0,8	2,4
Mittelw. T1 bis T5	365	421	488	377	400
T11	108	204	224	172	186
T9; T10	23,6; 26,9	22,5; 25,8	145; 126	103; 84	-
T15; T17	16,3; 16,8	15,8; 15,8	32,2; 22,2	30,0; 19,1	20
$\sigma_{RD2}$	0	0	0,031	0,018	-
$\sigma_{RD3}$	0	0	0,010	0,05	-
$\sigma_{RD4}$	0	0	0,025	0,013	-

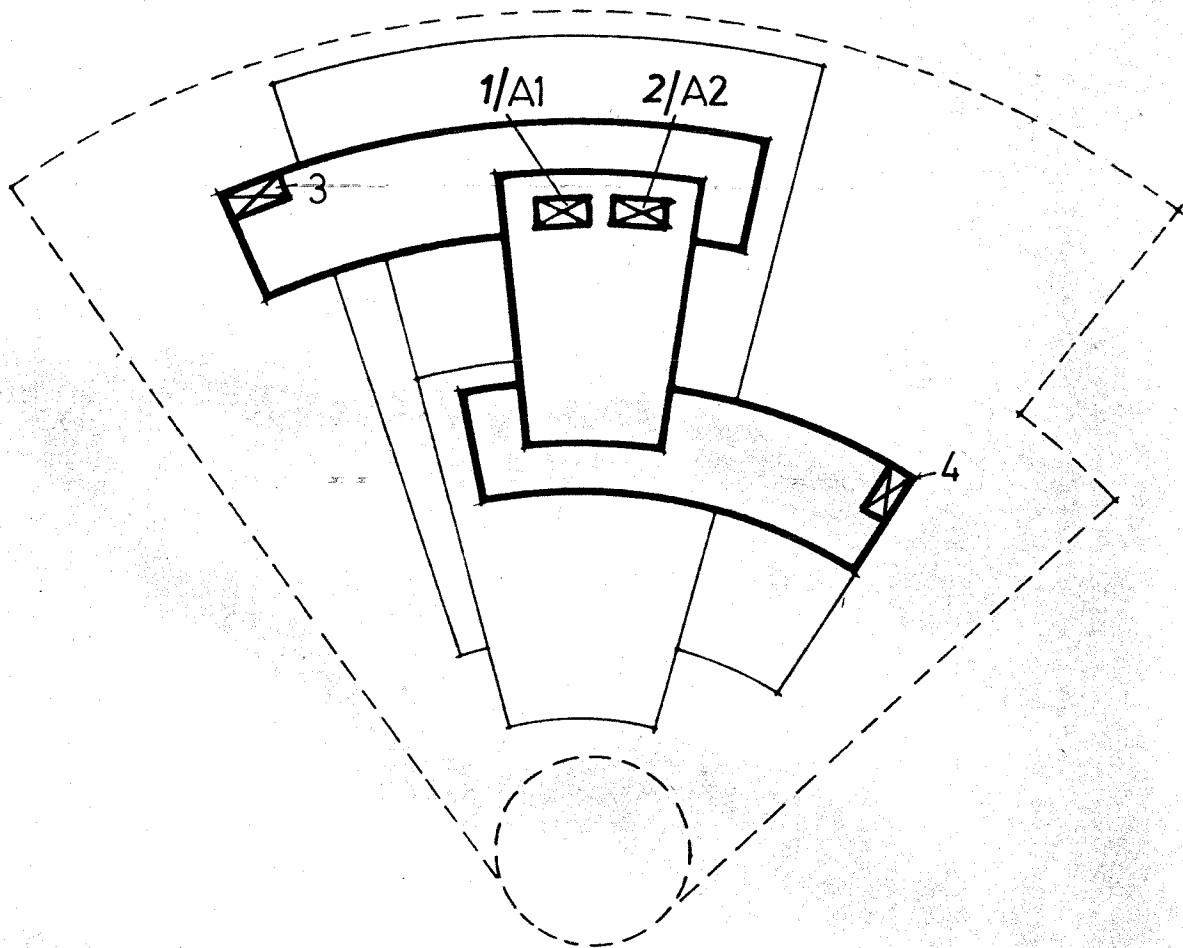


Bild 1 Schematischer Grundriß des Gebäudes

- 1,2 Innentreppenträume im Kernbereich
- 3. Untergeschoß bis 2. Obergeschoß
- A1,A2 Außentreppenträume im Kernbereich
- 2. Obergeschoß bis 21/22. Obergeschoß
- 3 Außentreppenraum
- Erdgeschoß bis 22. Obergeschoß
- 4 Außentreppenraum
- 3. Untergeschoß bis 19. Obergeschoß



Bild 2 Ansicht des Verwaltungsgebäudes z.Zt. des  
Brandversuches

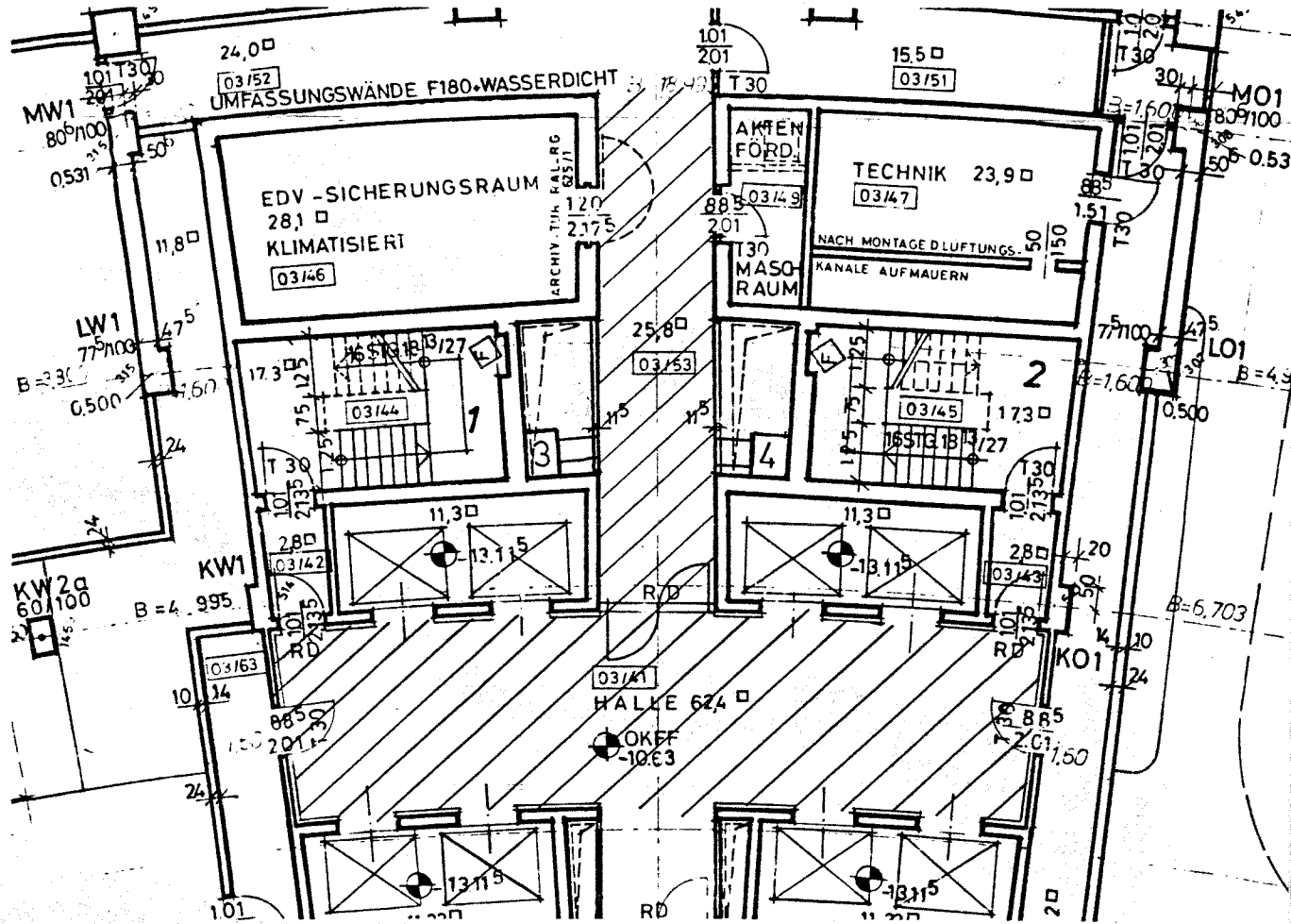


Bild 3 3. Untergeschoß ( Ebene 03 )  
Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2

////////// Entlüfteter Bereich  
3, 4 Abluftschacht

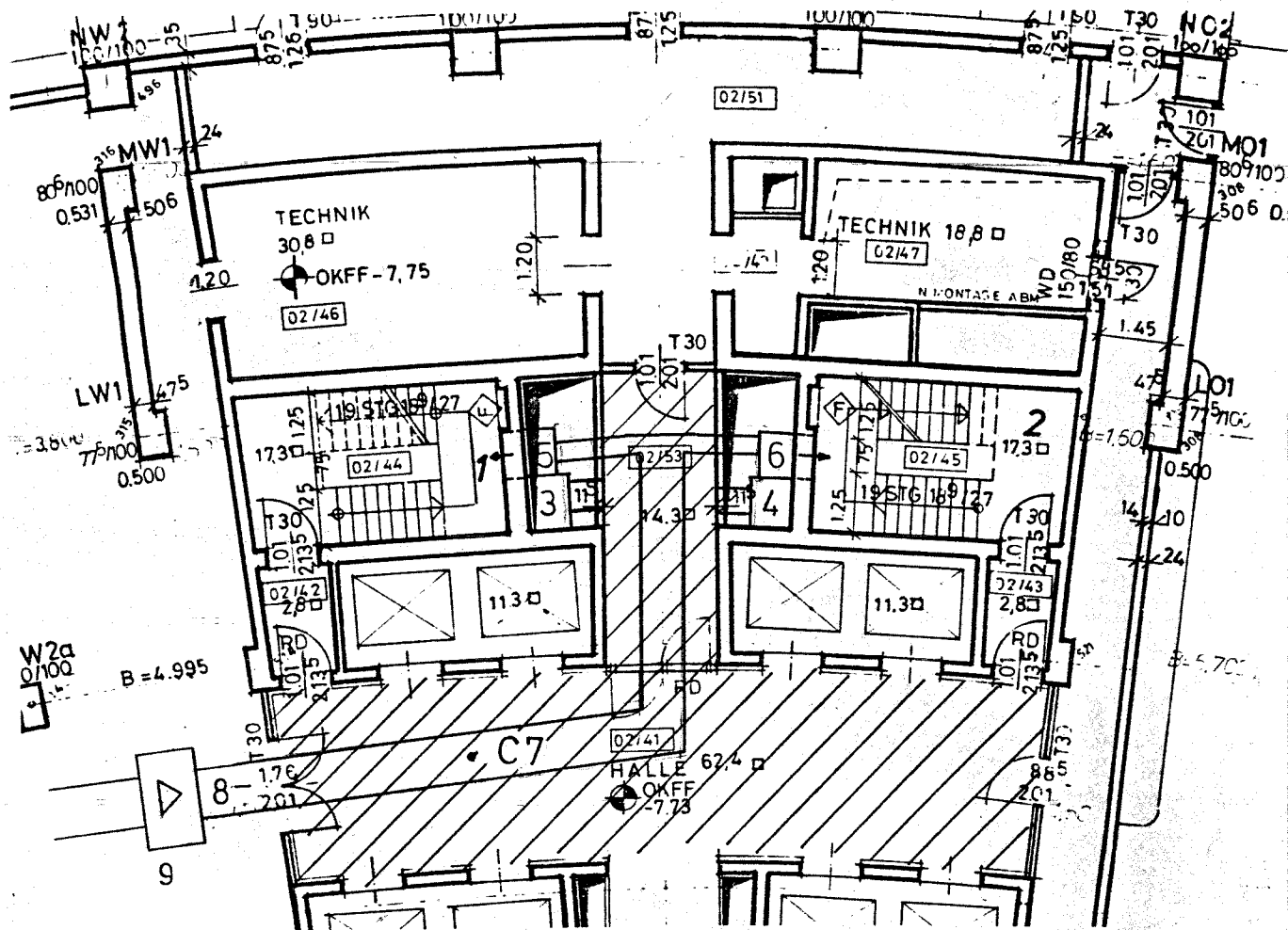


Bild 4 2. Untergeschoß ( Ebene 02 )  
Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2

- ////////// Entlüfteter Bereich
- 3, 4 Abluftschacht
  - 5, 6 Zuluftschacht
  - 8 Zuluftkanal
  - 9 Zuluftventilator

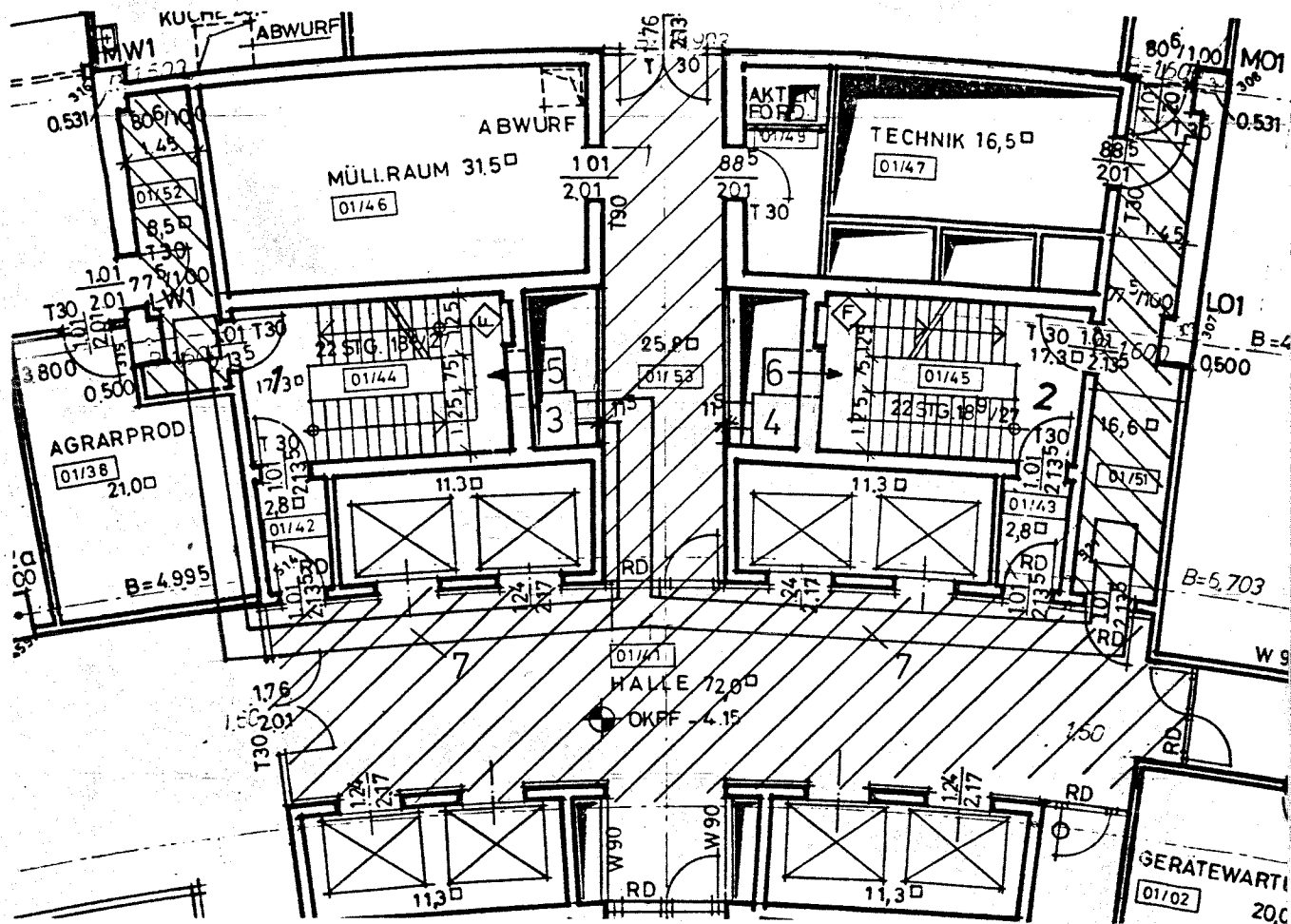


Bild 5 1. Untergeschoß ( Ebene 01 )  
Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2

- ////////// Entlüftete Bereiche
- 3, 4 Abluftschacht
  - 5, 6 Zuluftschacht
  - 7 Abluftkanal



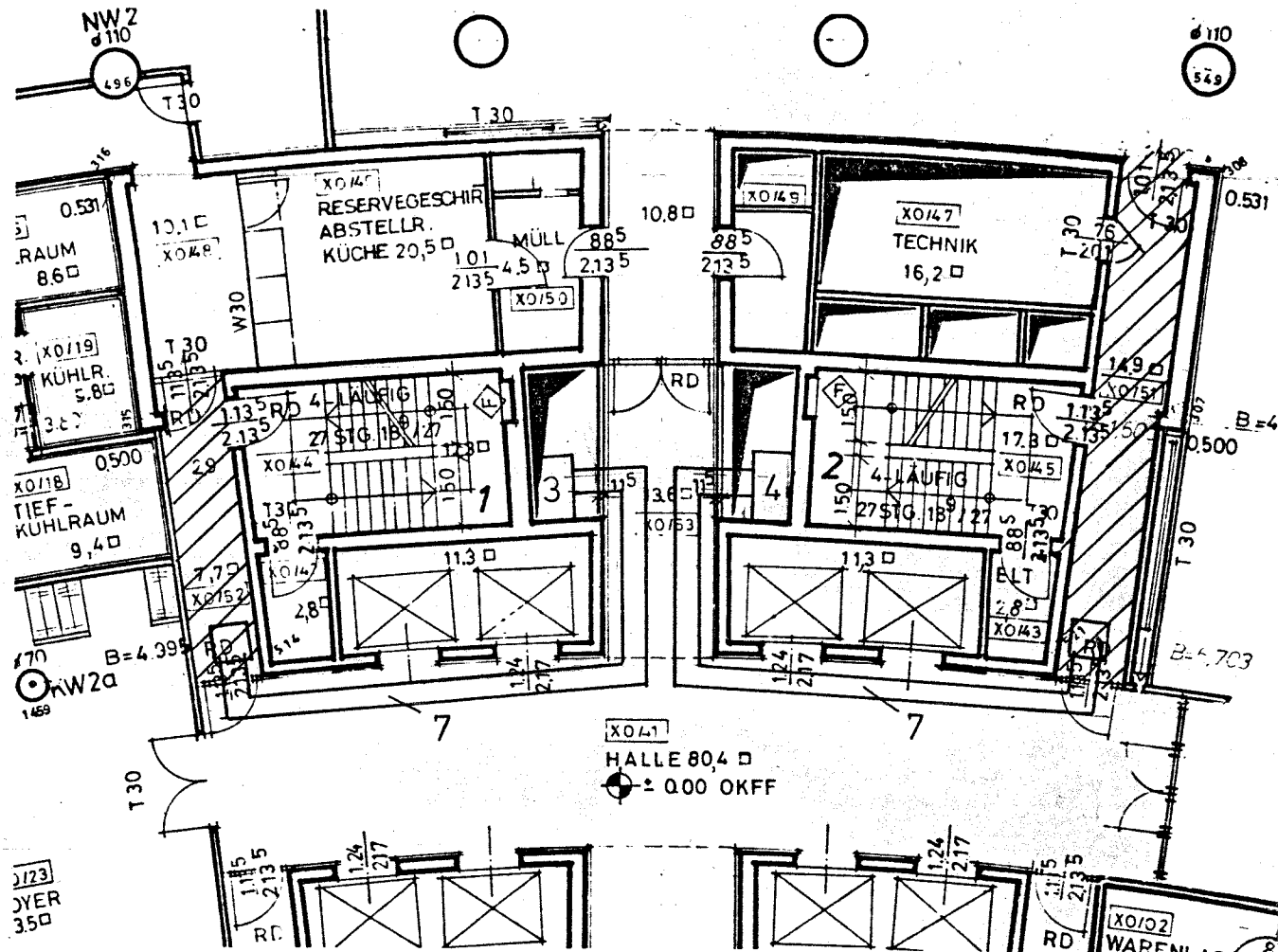


Bild 6 Erdgeschoß ( Ebene 0 )  
 Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2

- ////////// Entlüftete Bereiche
- 3, 4 Abluftschacht
- 7 Abluftkanal

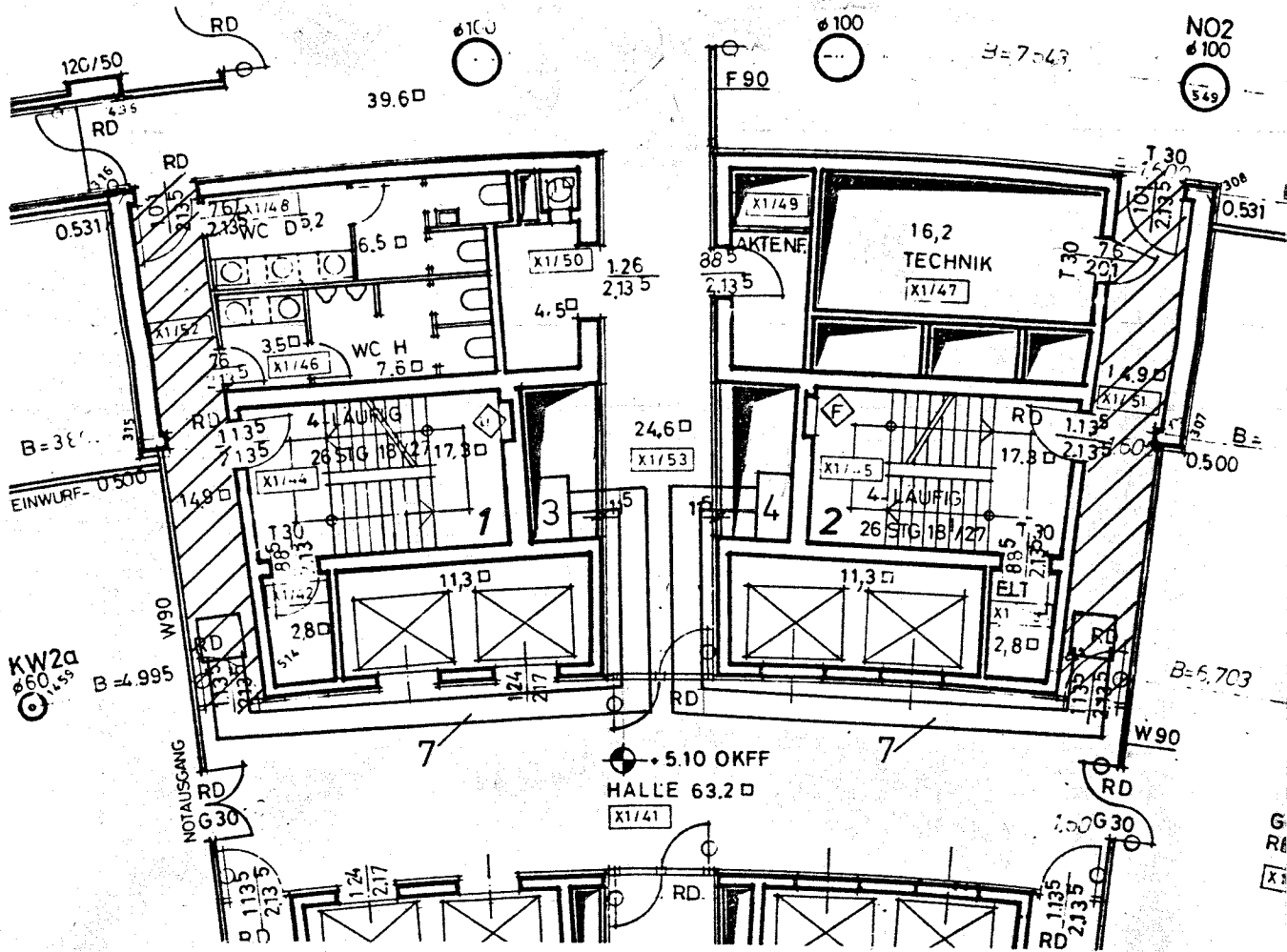


Bild 7 1. Obergeschoß ( Ebene 1 )  
 Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2

- ////////// Entlüftete Bereiche
- 3, 4 Abluftschacht
- 7 Abluftkanal

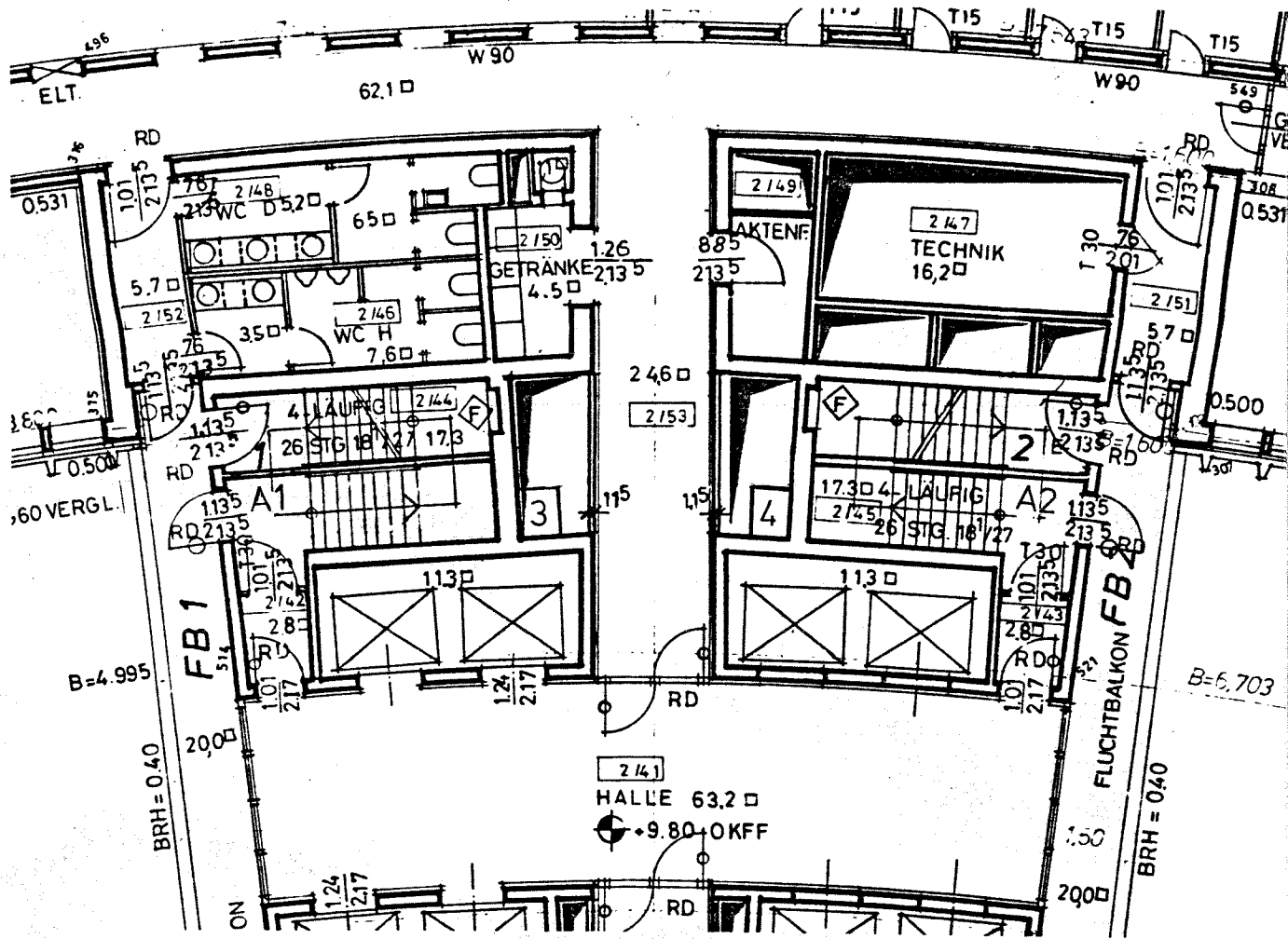


Bild 8 2. Obergeschoß ( Ebene 2 )  
Grundriß im Bereich der Treppenträume 1 und 2 .

- A1,A2 außenliegender Treppenraum
- FB1,FB2 Fluchtbalkon
- 3,4 Abluftschacht

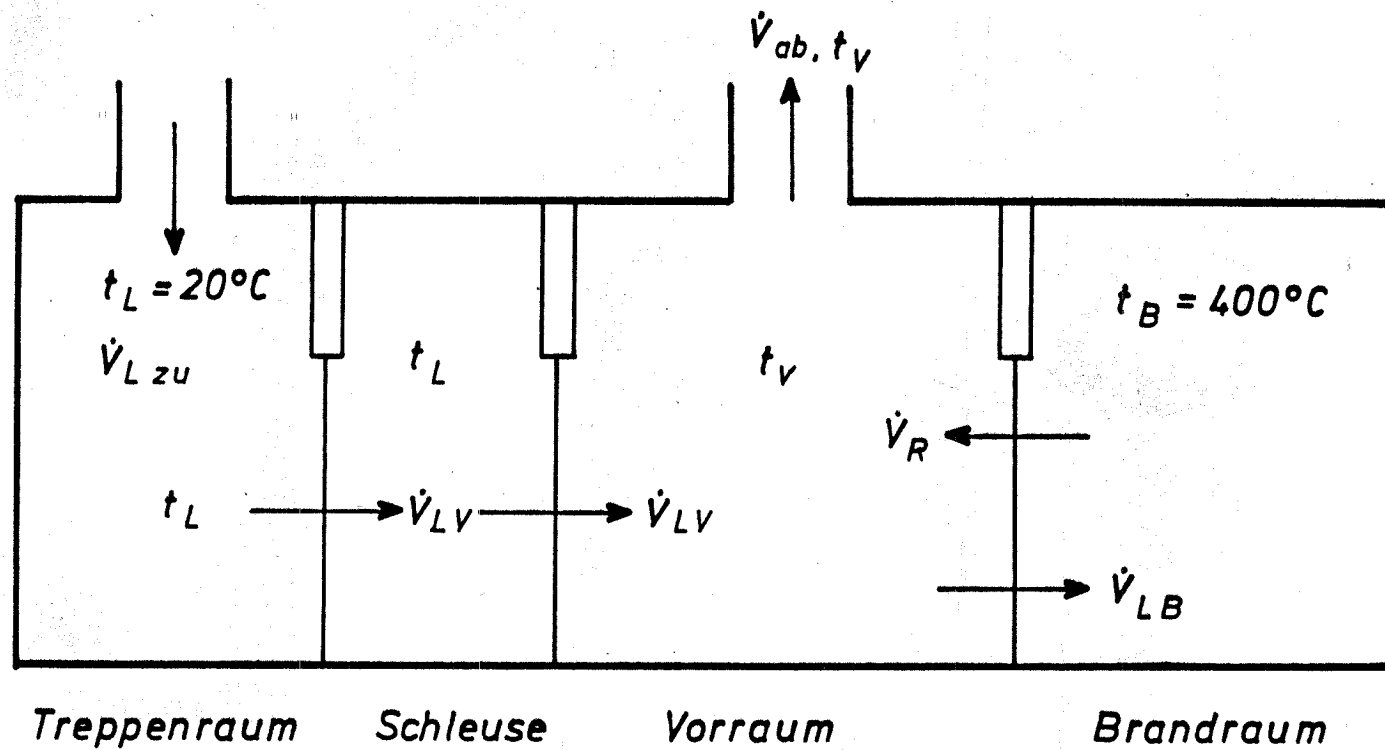


Bild 9 Volumenströme und Temperaturen bei der Rauchfreihaltung des Treppenraumes

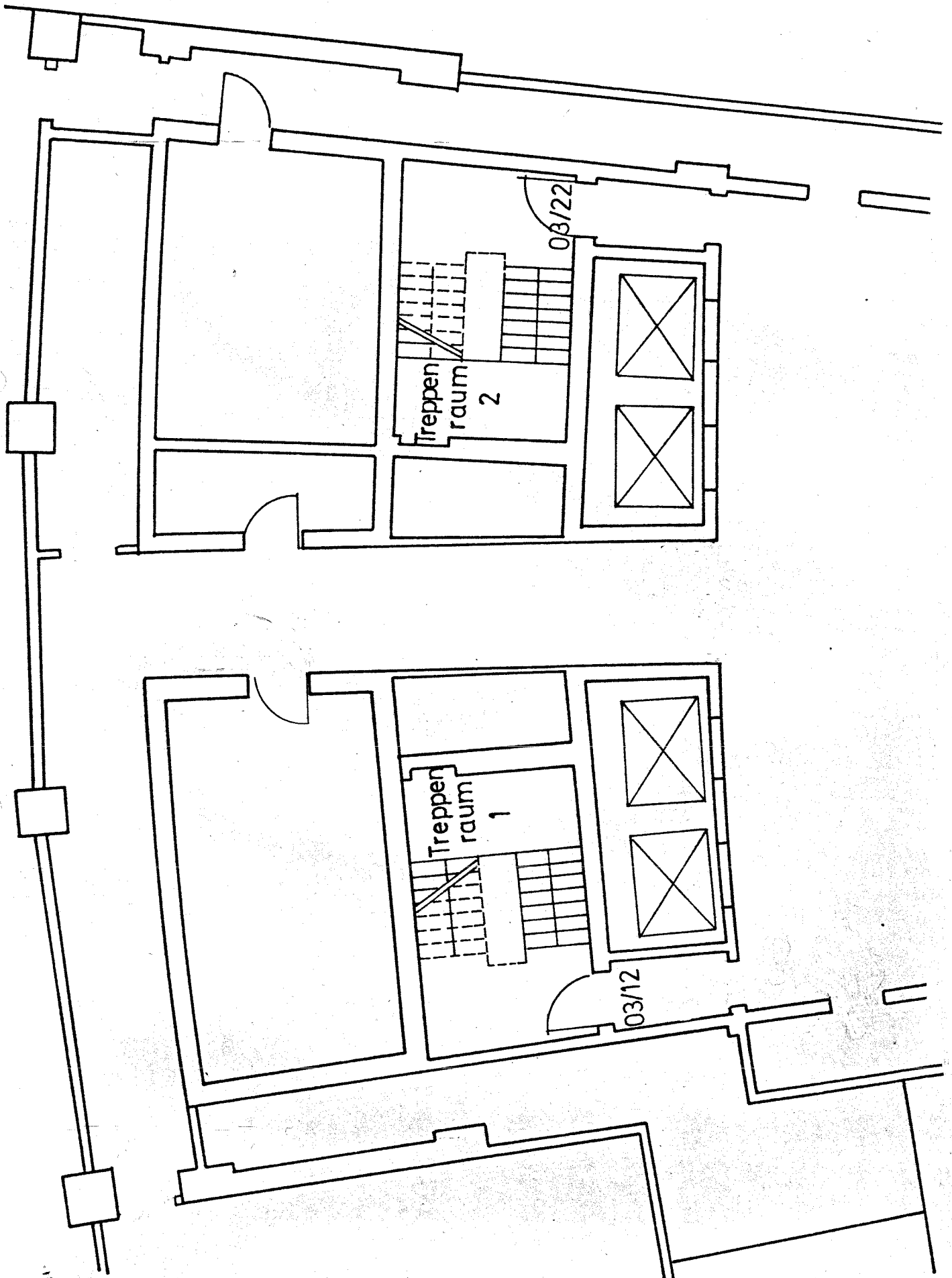


Bild 10 3.Untergeschoß, eingebaute Türen beim Brandversuch

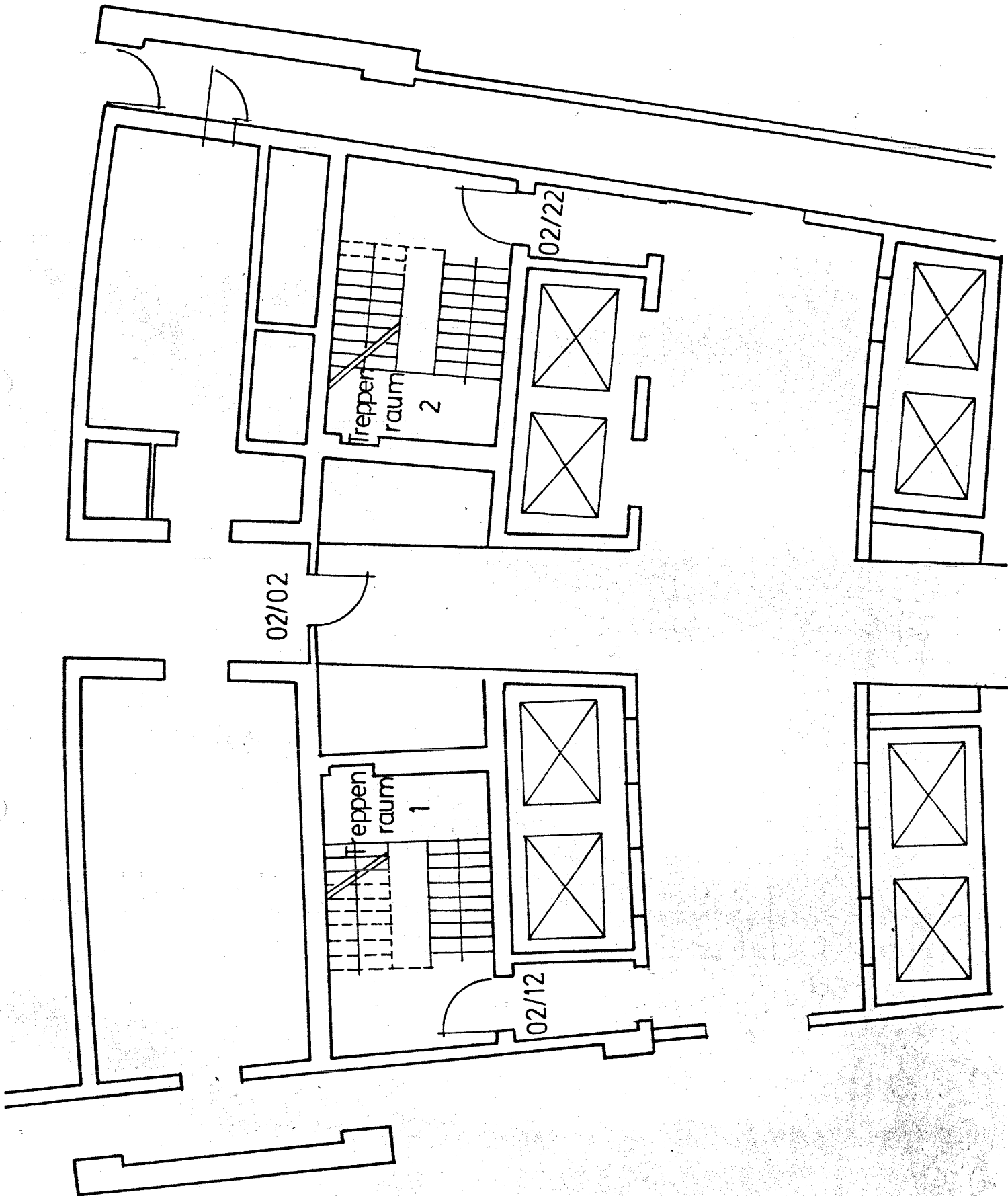


Bild 11 2.Untergeschoß, eingebaute Türen beim Brandversuch

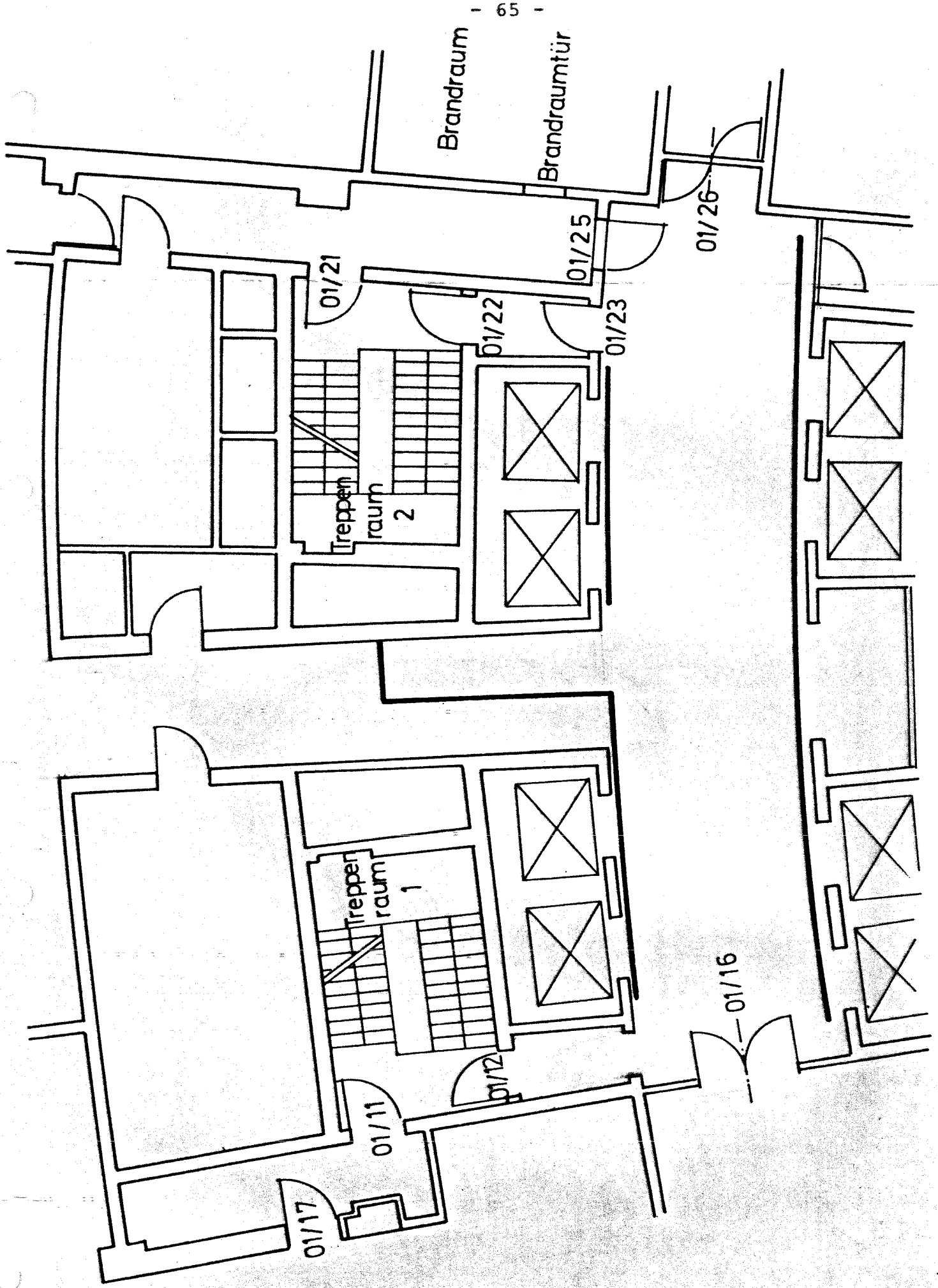


Bild 12 1. Untergeschoß, eingebaute Türen beim Brandversuch  
— Trennwände aus Gipskartonplatten

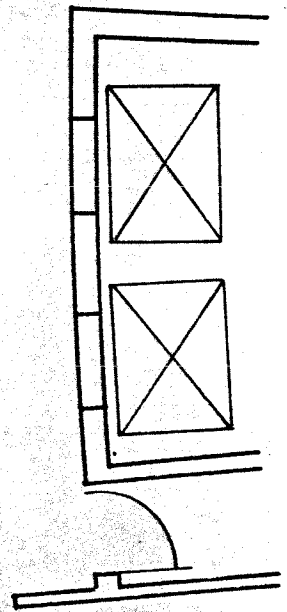
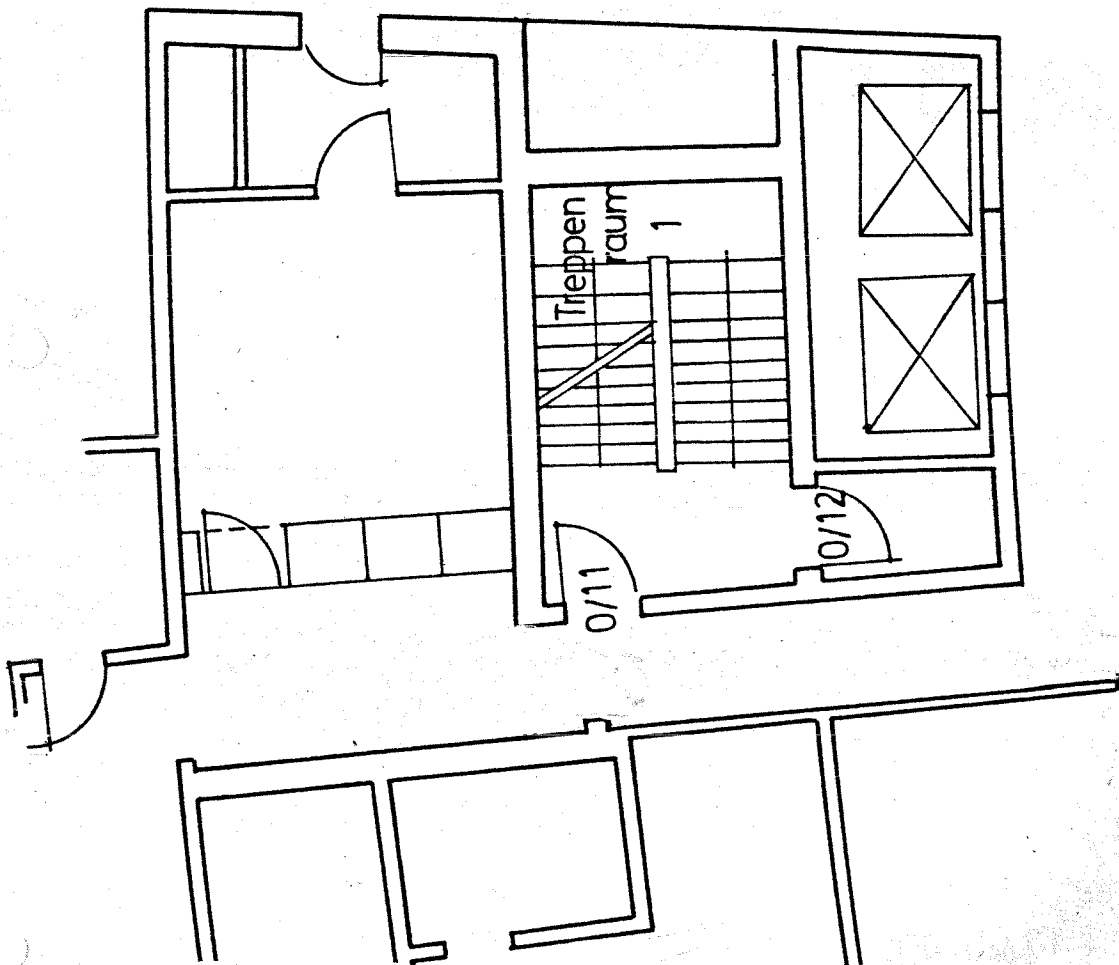
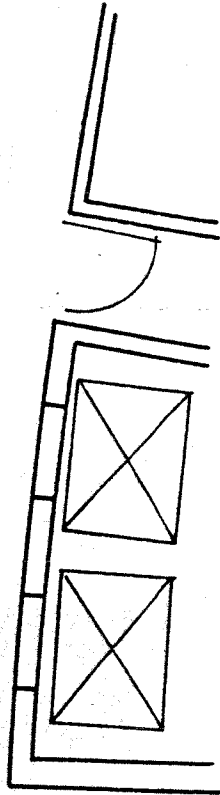
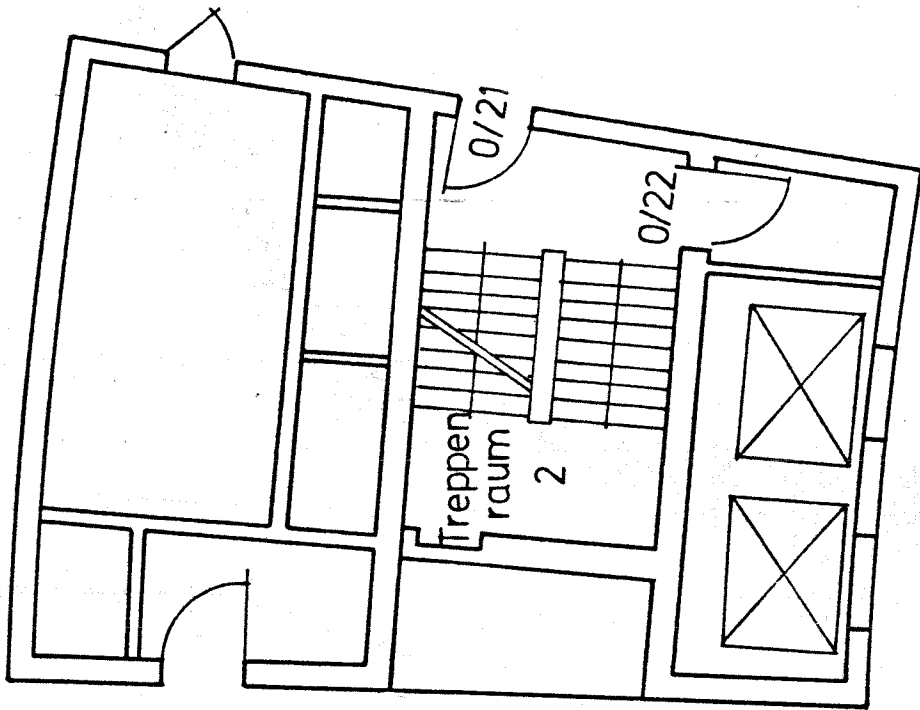


Bild 13 Erdgeschoß, eingebaute Türen und Ausbauzustand beim Brabdiversuch



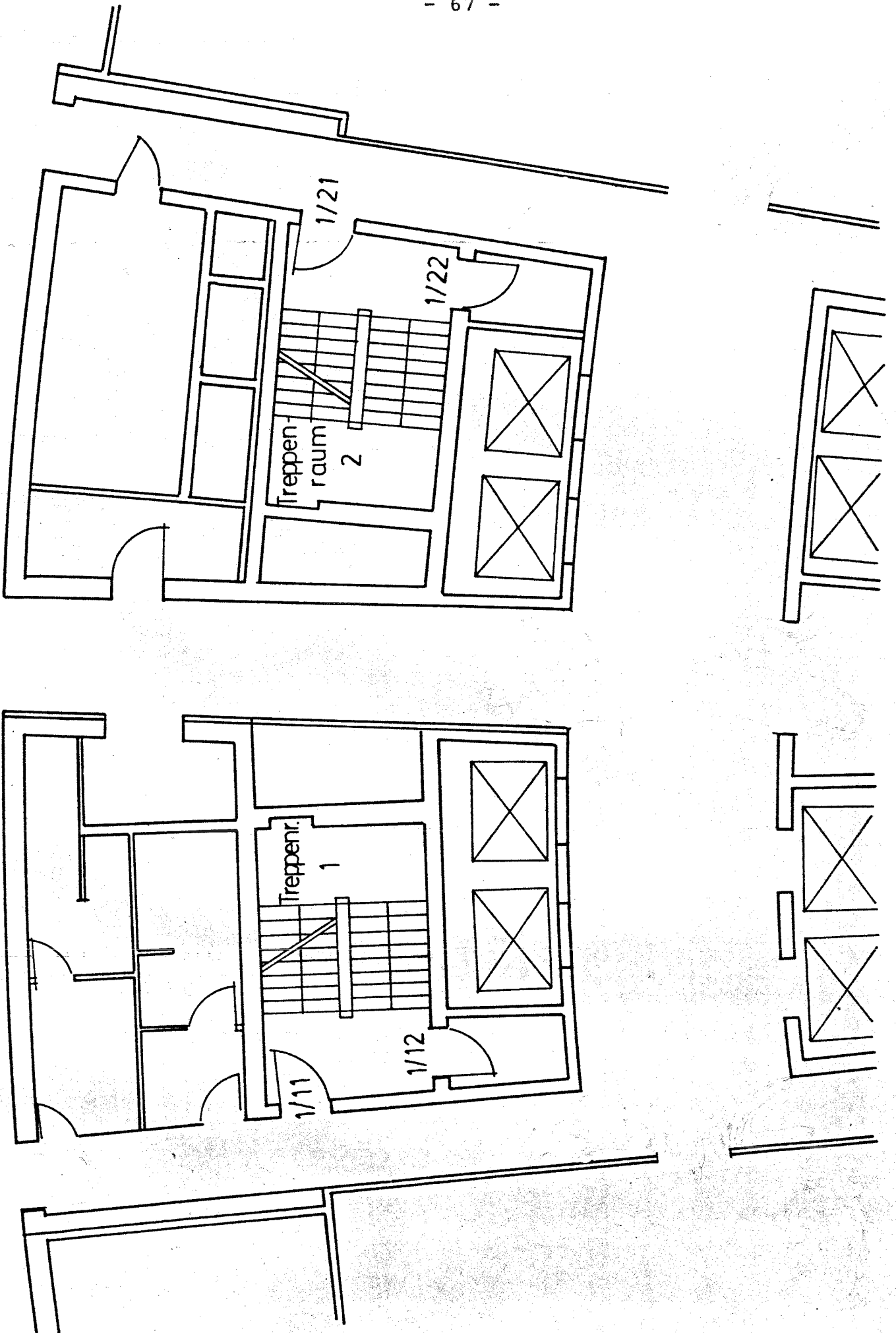


Bild 14 1.Obergeschoß, eingebaute Türen beim Brandversuch

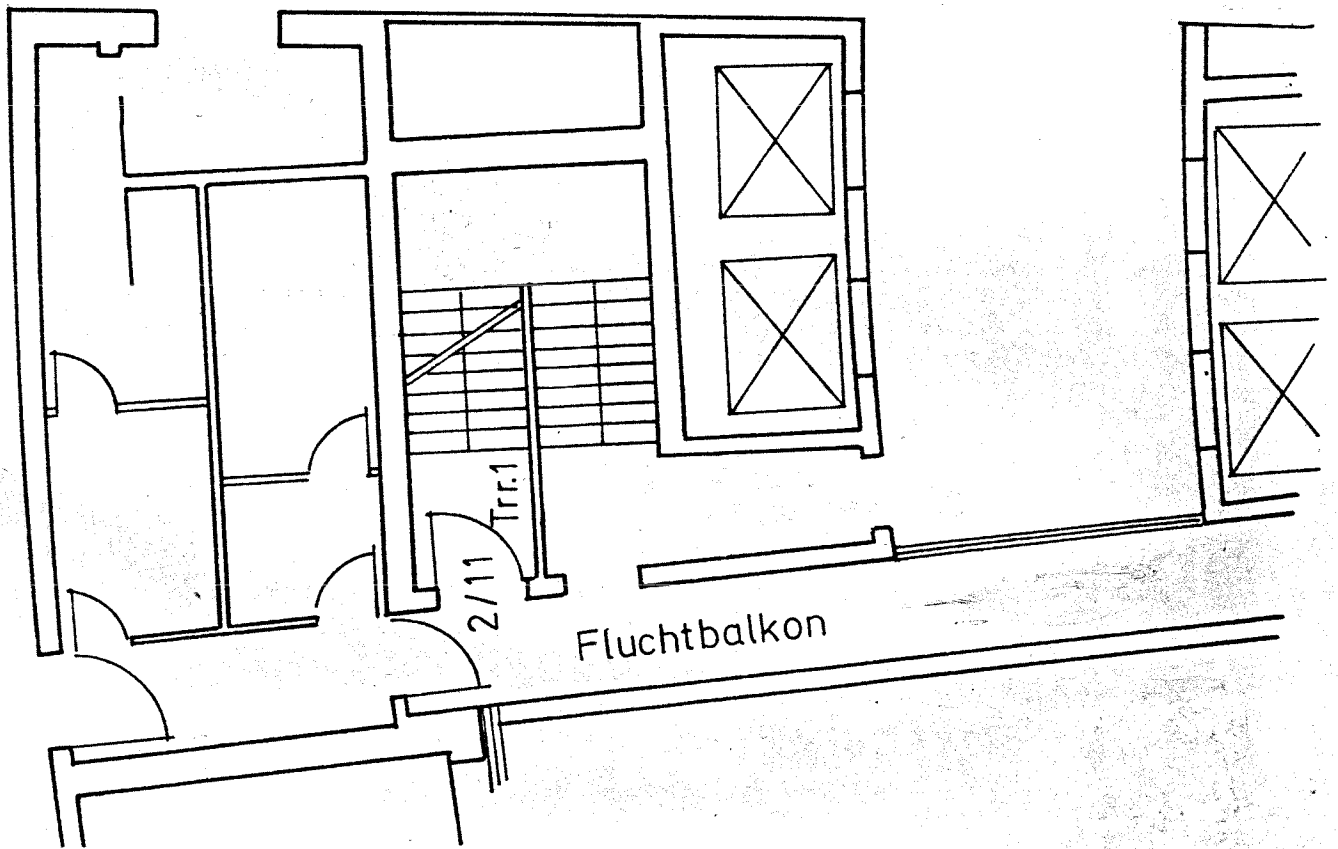
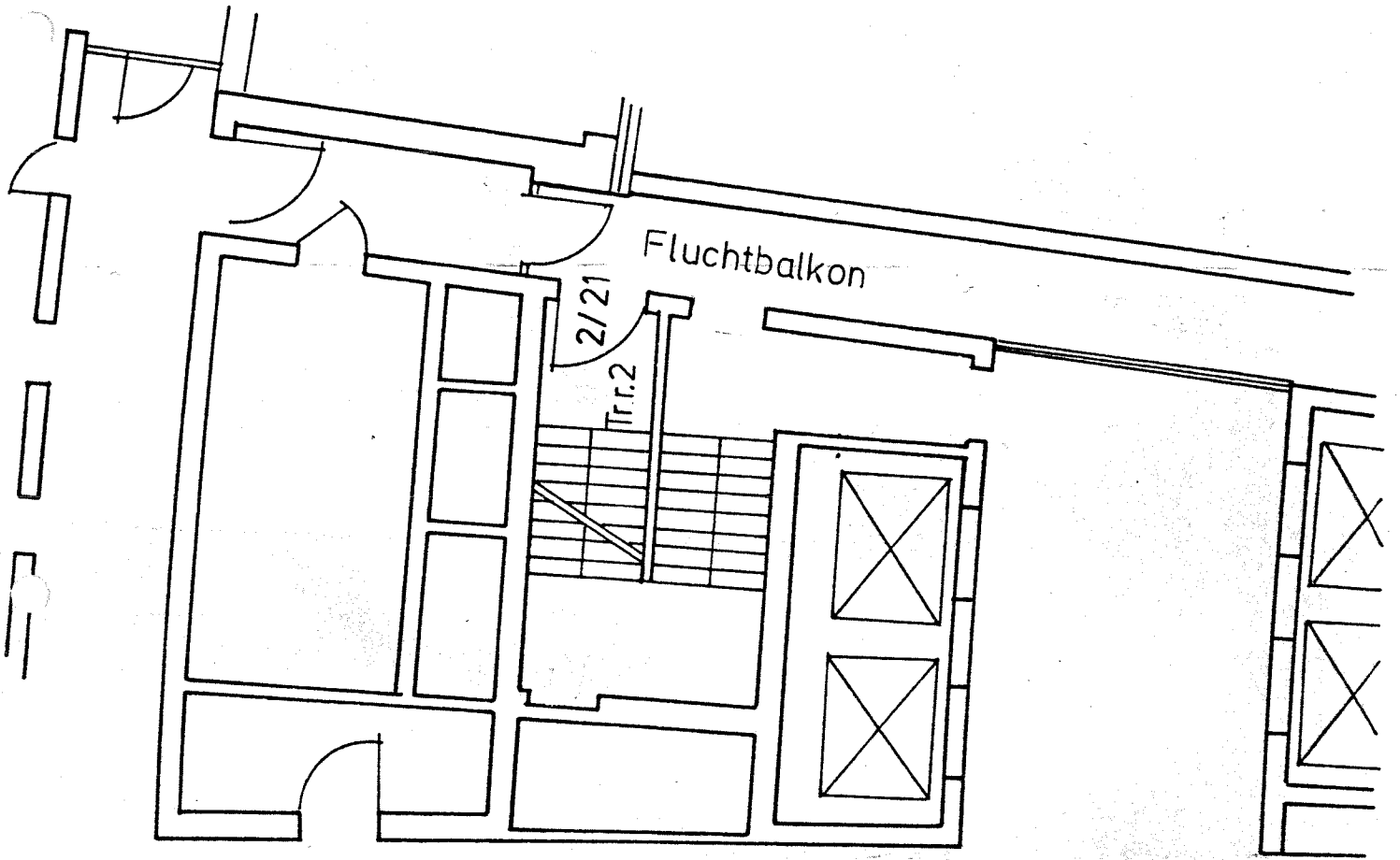


Bild 15 2.Obergeschoß, eingebaute Türen beim Brandversuch



Bild 16 Luftaustrittsöffnung im Treppenraum 2  
Der freie Austrittsquerschnitt wurde entsprechend  
dem Stömungswiderstand des Austrittsgitters  
verkleinert

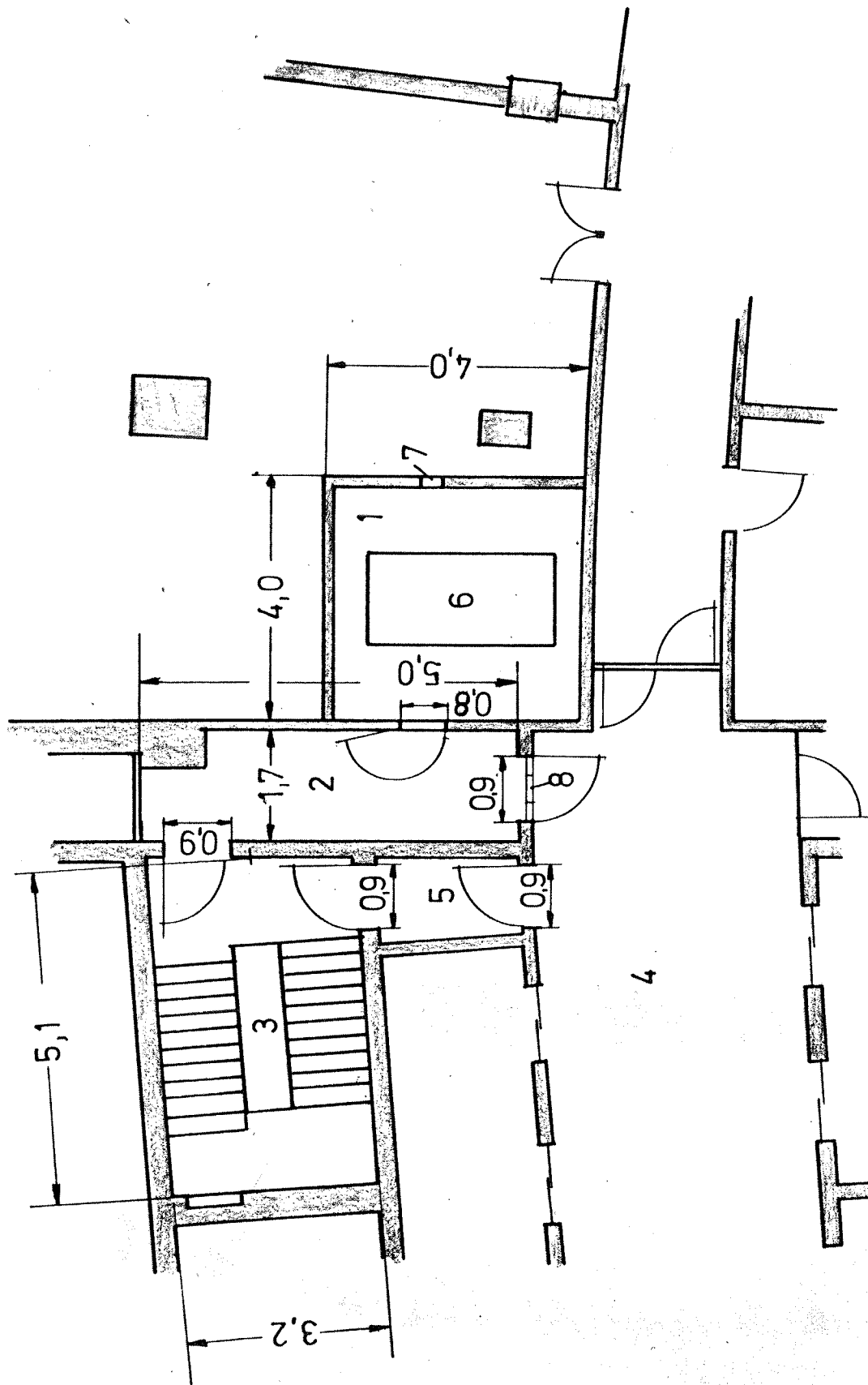


Bild 17 Anordnung und Größe des Brandraumes

- 1 Brandraum
- 2 Vorraum
- 3 Treppenraum
- 4 Halle
- 5 Schleuse
- 6 Brandlastpalette
- 7 Beobachtungsfenster Brandraum
- 8 Beobachtungsfenster Vorraum



Bild 18 Mit Gipskartonplatten verkleideter Vorraum

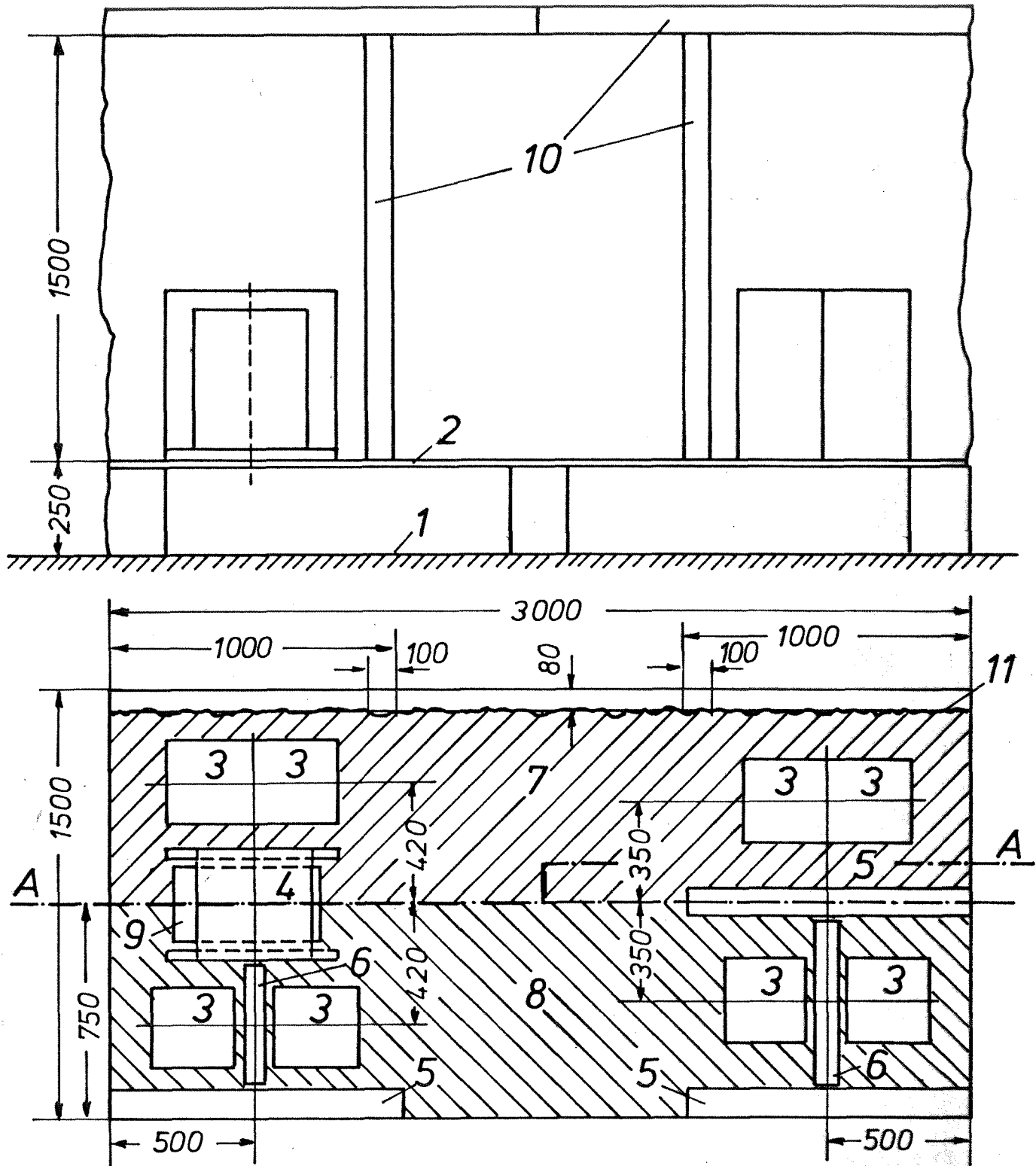


Bild 19 Aufbau einer Brandlastpalette mit Zündkrippe

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| 1 Boden des Brandraumes      | 7 Linoleum             |
| 2 Boden der Brandlastpalette | 8 Nadelfilz-Bodenbelag |
| 3 Holzkippen                 | 9 Zündwanne            |
| 4 Zündkrippe                 | 10 Holzrahmen          |
| 5,6 Styropor P               | 11 Vorhänge            |



Bild 20 Brandlastpalette im Brandraum

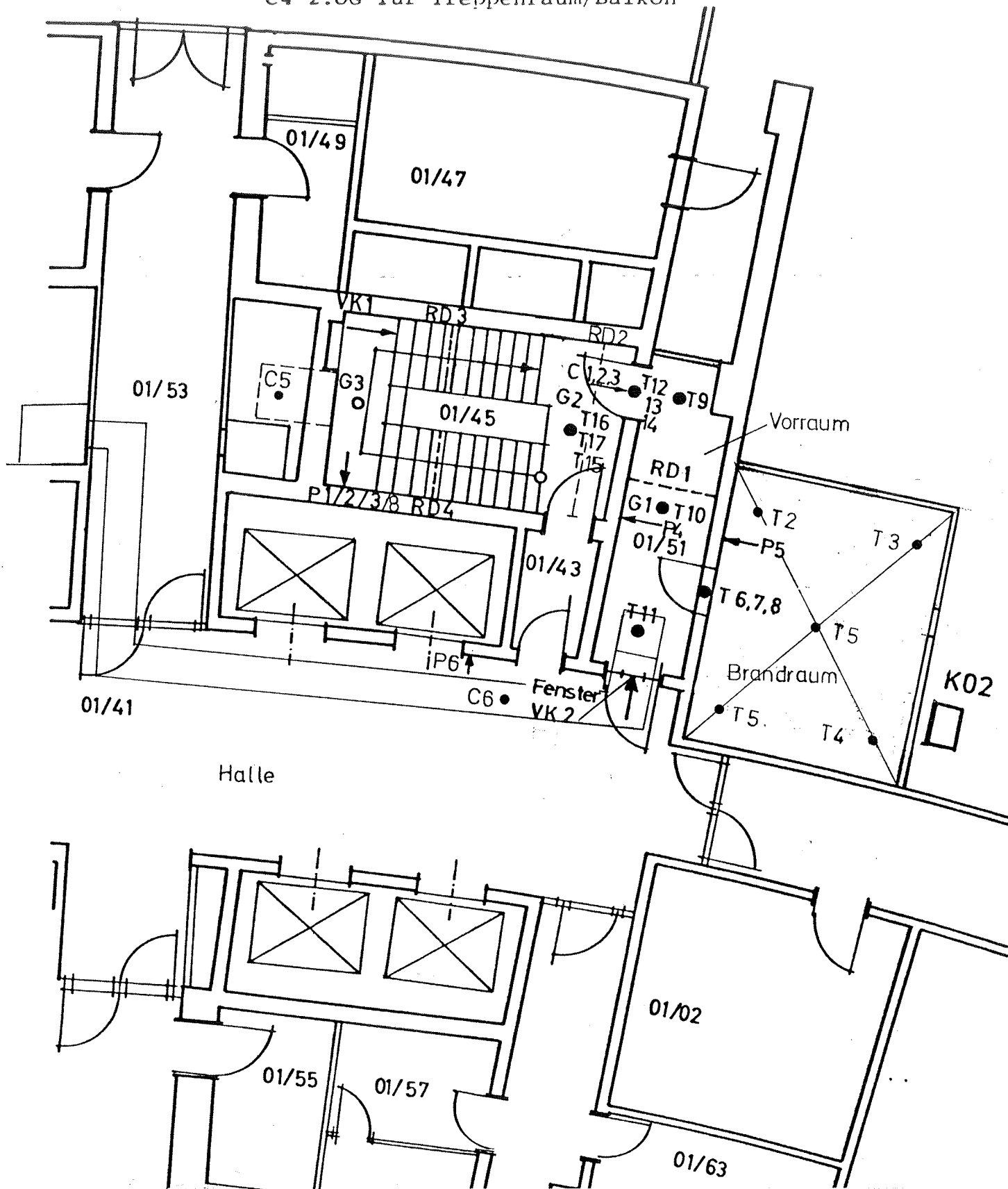


Bild 21 Anordnung der Meßstellen beim Brandversuch

- C Meßstellen für Stömungsgeschwindigkeiten
- G Entnahmestellen für Gasproben
- P Druckmeßstellen
- T Temperaturmeßstellen
- RD Meßstrecken zur Bestimmung der optischen Rauchdichte
- VK Aufstellungsort von Videokamaras



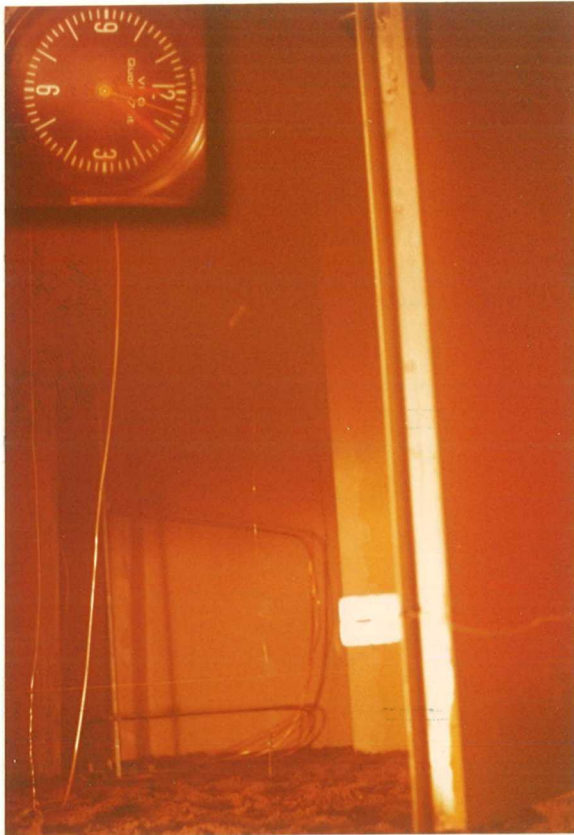


Bild 22a  
Versuchszeit 6 min 3 s



Bild 22b  
Versuchszeit 10 min 20 s

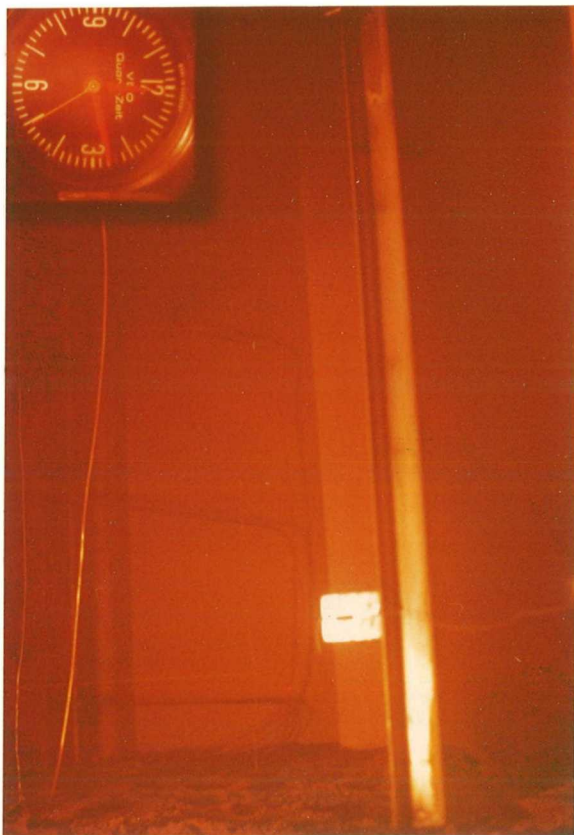


Bild 22c  
Versuchszeit 14 min 25 s

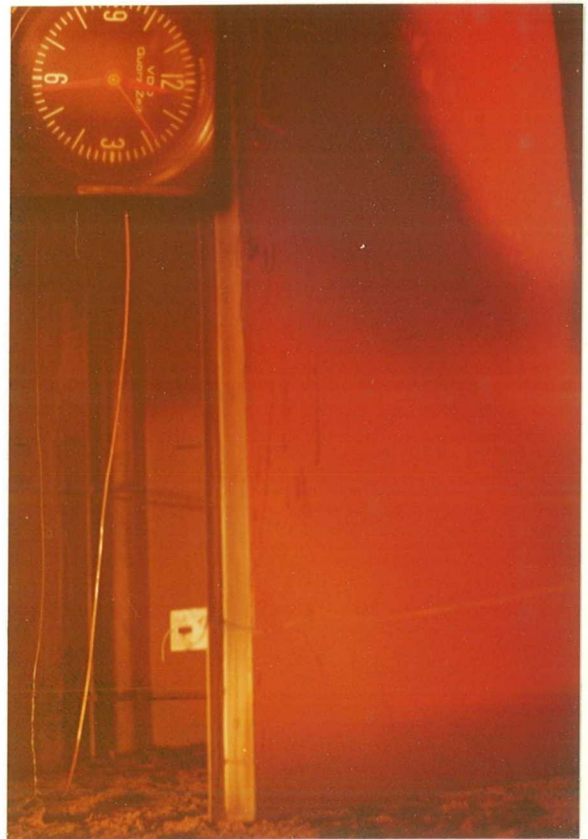


Bild 22d  
Versuchszeit 28 min 9 s

Bild 22a bis 22d Der Vorraum während des Brandversuches

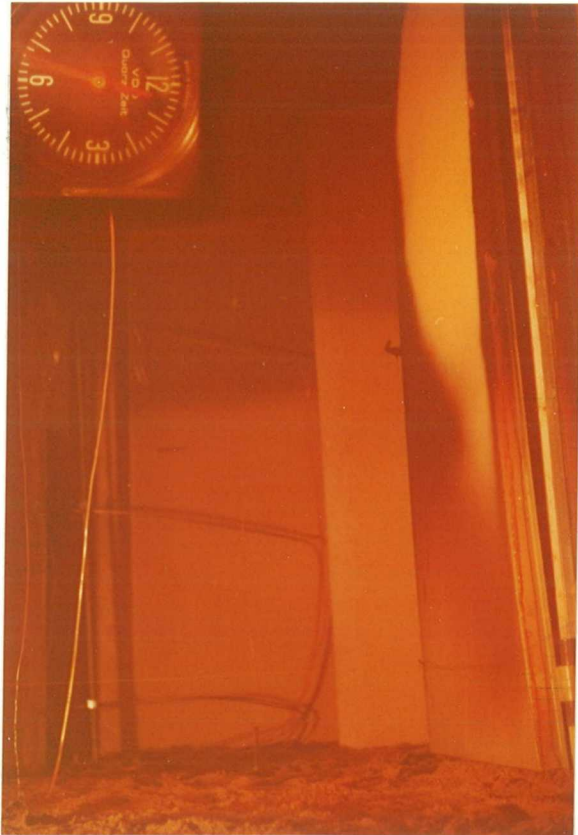


Bild 22e  
Versuchszeit 32 min 32 s

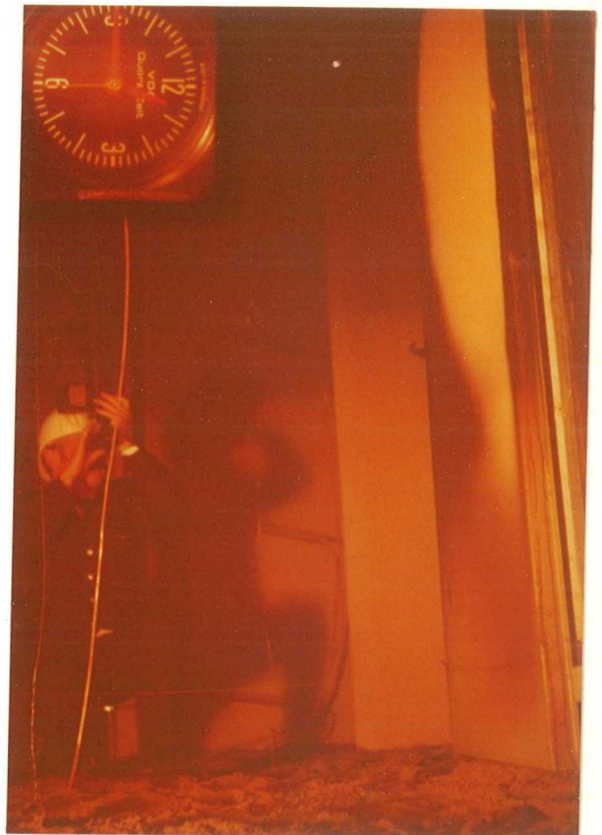


Bild 22f  
Versuchszeit 44 min 30 s

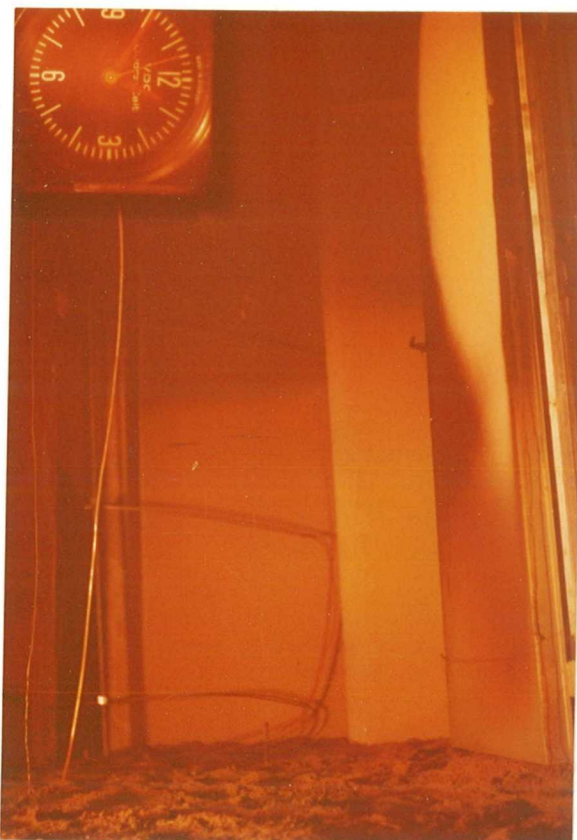


Bild 22g  
Versuchszeit 44 min 57 s

Bild 22e bis 22g Der Vorraum während des Brandversuches

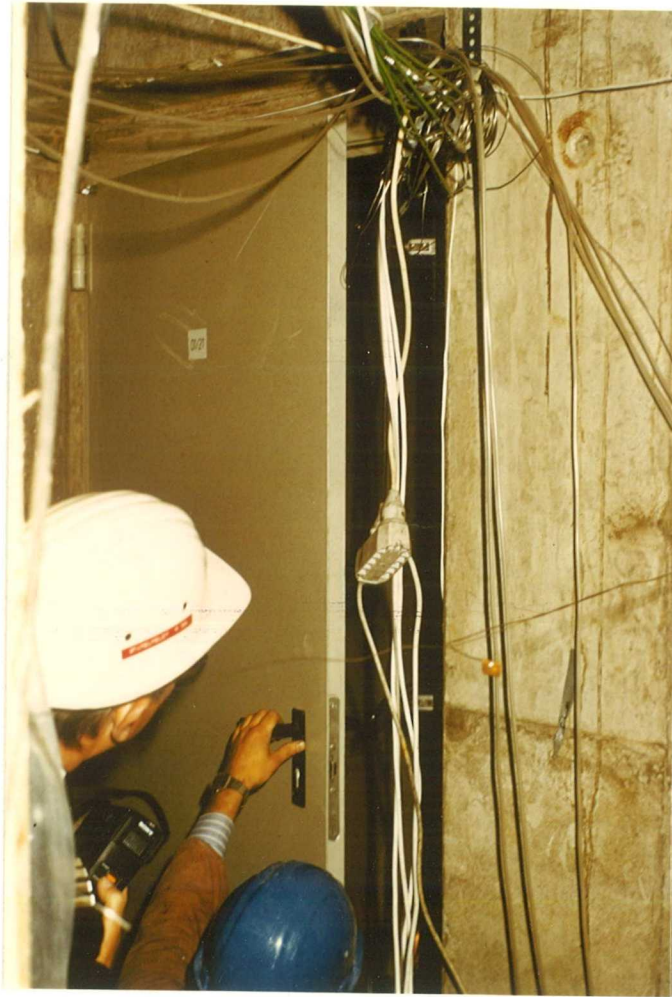


Bild 23a  
Tür Treppenraum/Vorraum  
wird auf eine Spaltbreite  
von 30 cm geöffnet

Bild 23b  
Tür Treppenraum/Vorraum  
ist ganz geöffnet  
Versuchszeit ca 30 min



Bild 23a und 23b Tür Treppenraum/Vorraum während des  
Brandversuches



Bild 24a

Bild 24b



Bild 24a und 24 b Der Brandraum während des Versuches  
Versuchszeit ca 44 min



Bild 25a  
Vorraum

Bild 25b  
Tür Vorraum/Brandraum  
mit Blick in den  
Brandraum



Bild 25a und 25b Nach dem Brandversuch

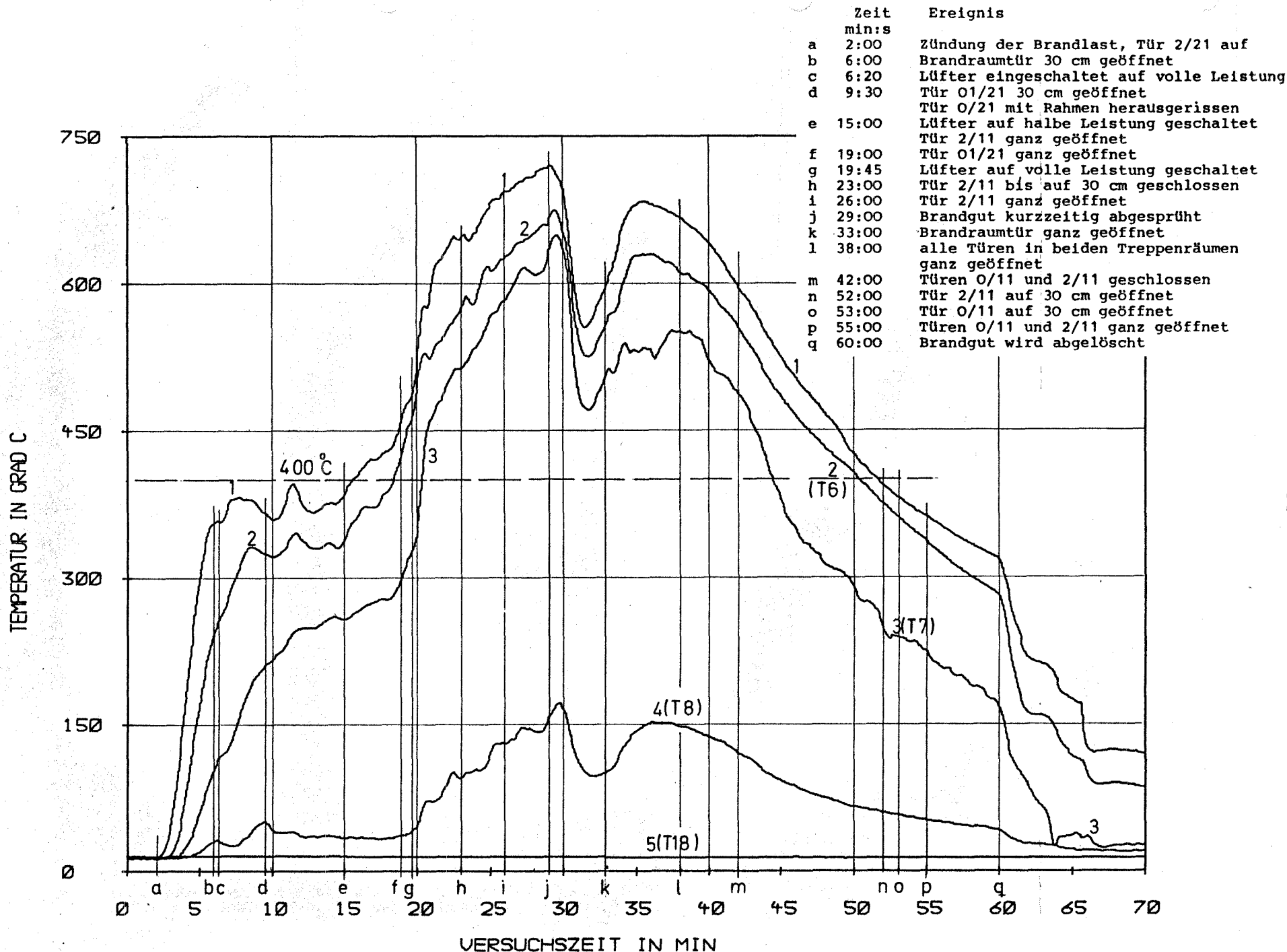


Bild 26 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Brandraum  
 1 Mittelwert der Brandraumtemperaturen T1 bis T5

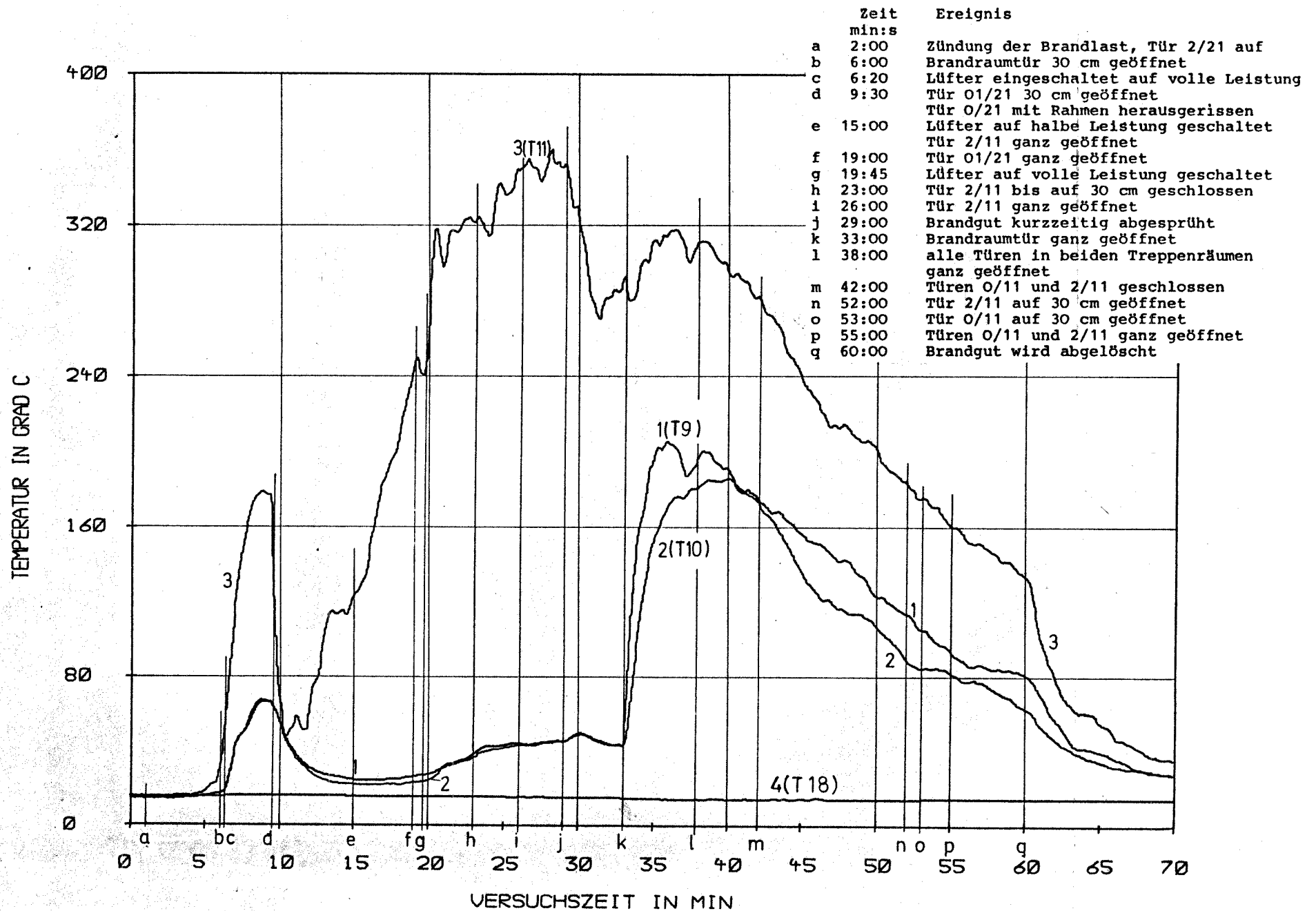


Bild 27 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Vorraum(1,2), der Abgase(3) sowie der Umgebung(4)

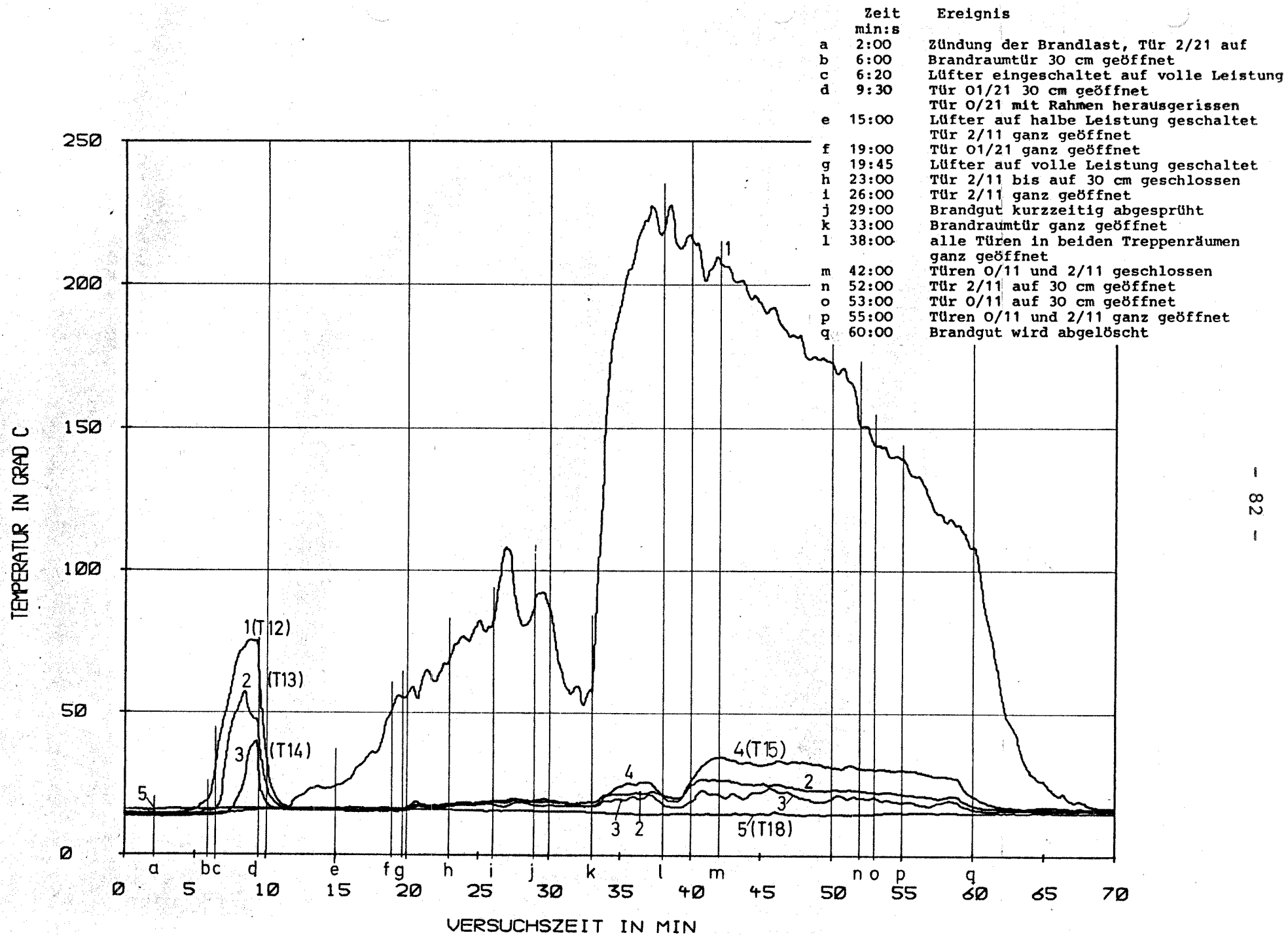


Bild 28 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in der Türöffnung Treppenraum/Vorraum(1 bis 3), im Treppenraum(4) sowie der Umgebung(5)



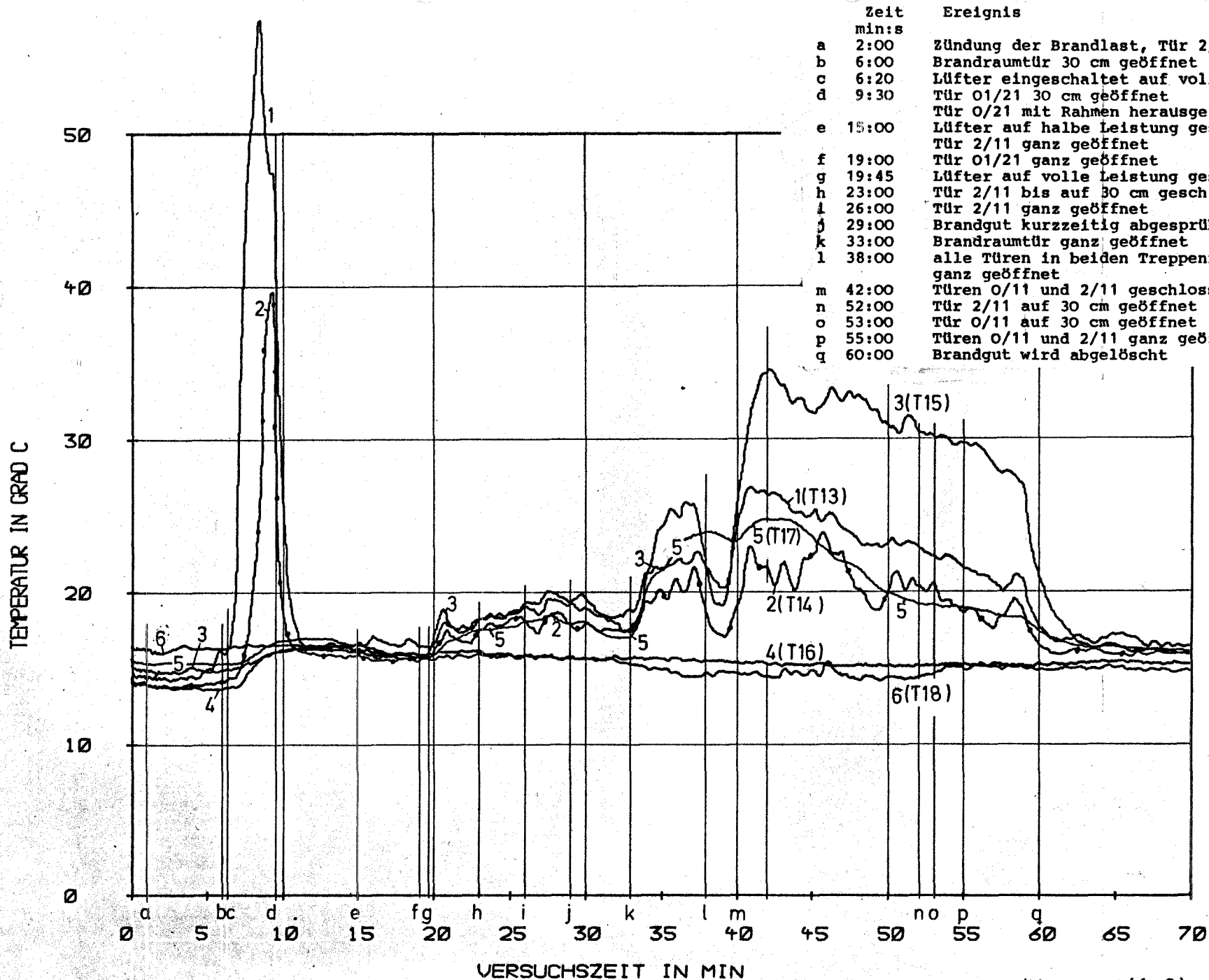


Bild 29 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in der Türöffnung Treppenraum/Vorraum(1,2), im Treppenraum(3 bis 5) sowie der Umgebungstemperatur(5)

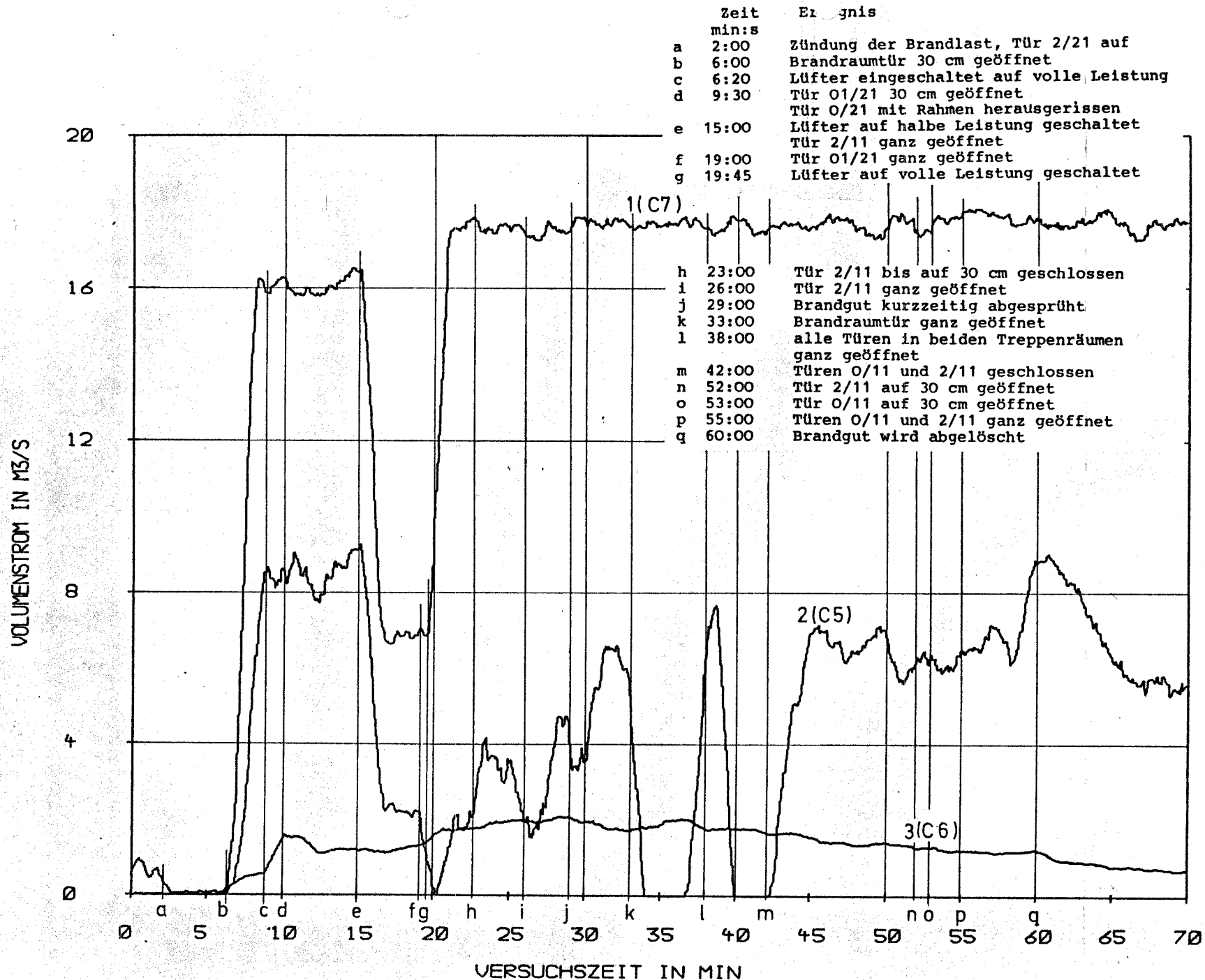


Bild 30 Zeitlicher Verlauf der aus den dynamischen Drücken ermittelten Volumenströme der gesamten Zuluft(1), der Zuluft in den Treppenraum 2 (2) und der Abgase (3)

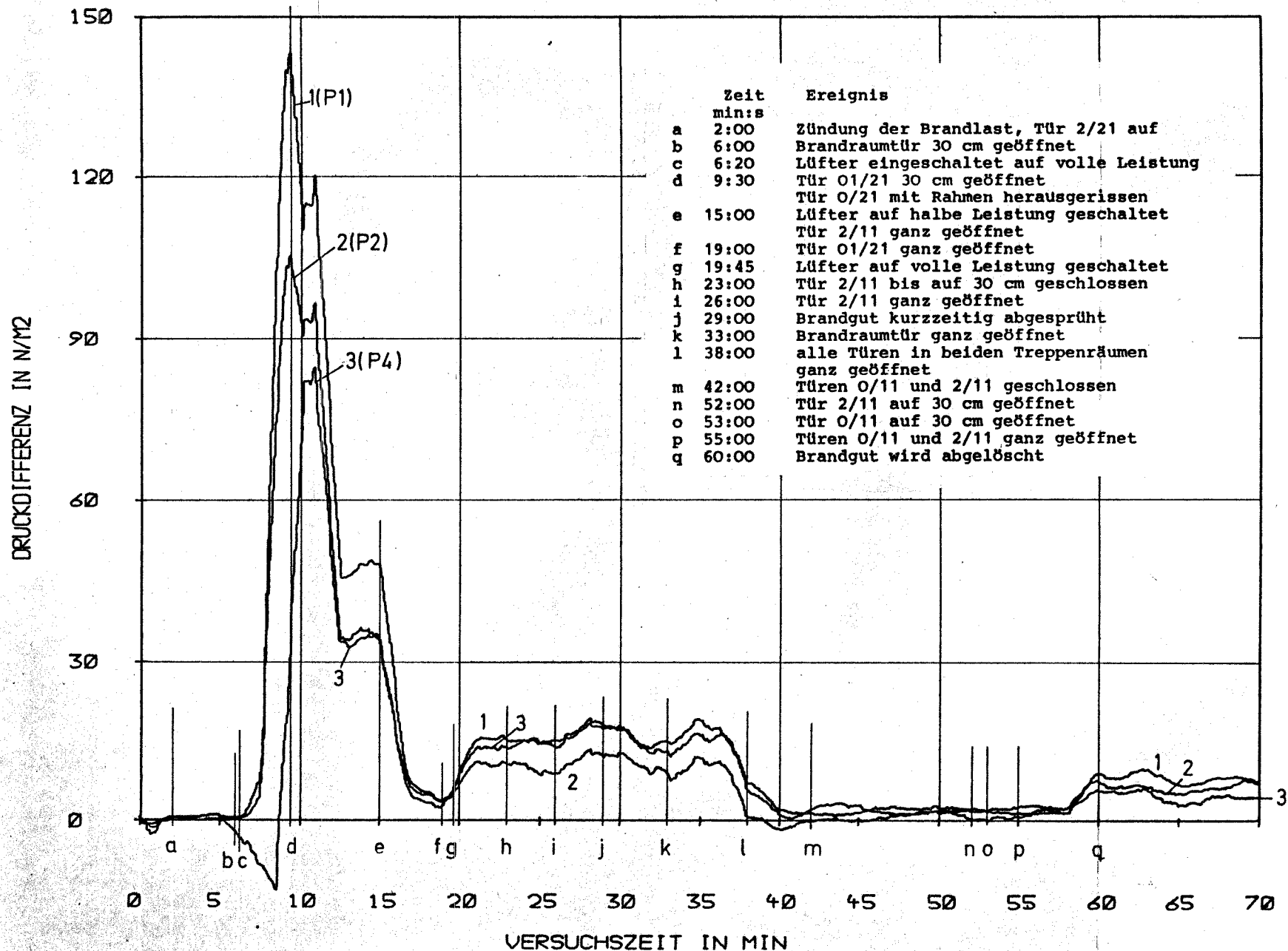


Bild 31 Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen zwischen folgenden Meßstellen und der Atmosphäre Treppenraum 3.UG(1), Treppenraum 1.UG(2), Vorraum(3)

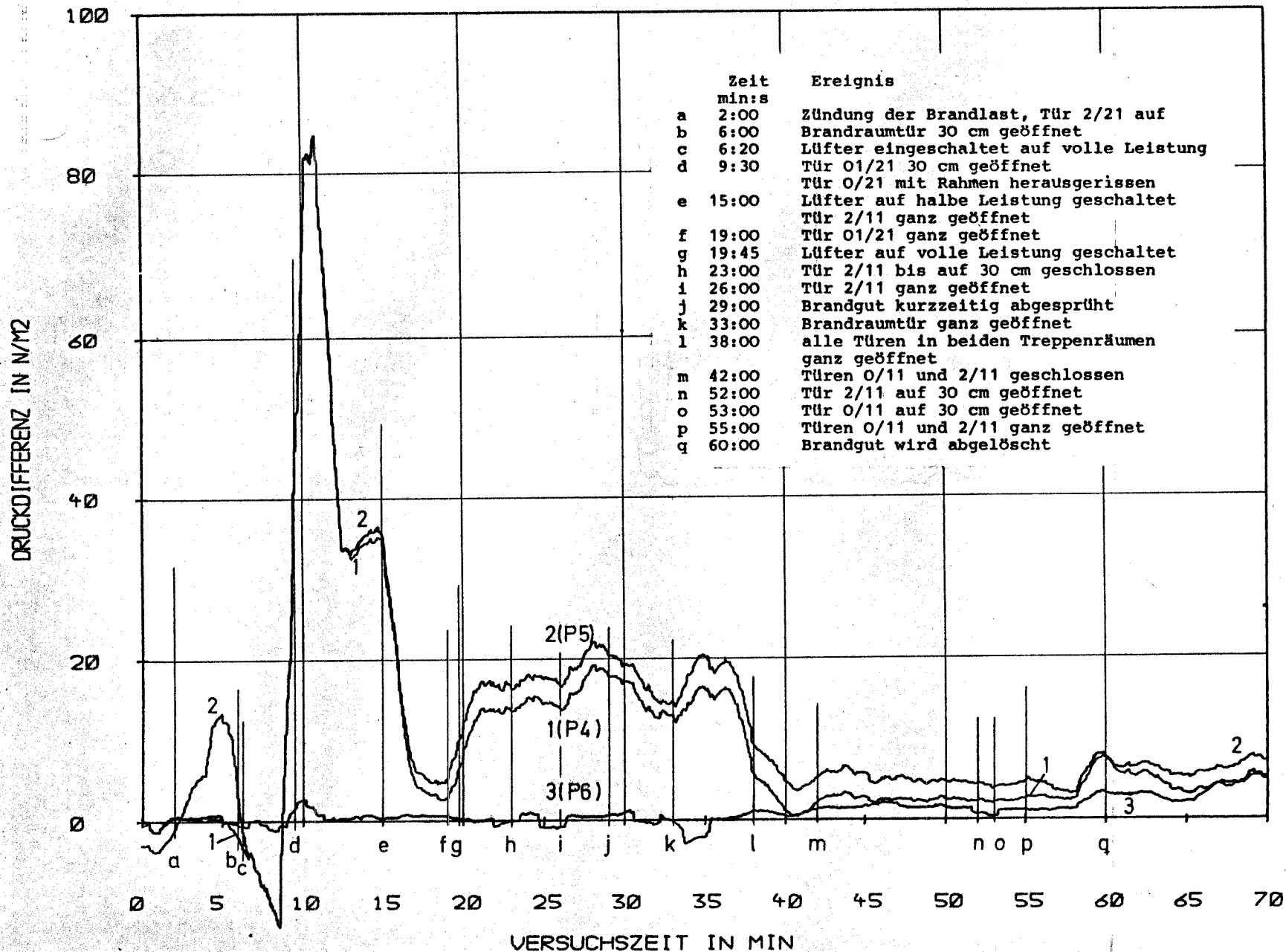


Bild 32 Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenz zwischen folgenden Meßstellen und der Atmosphäre  
Vorraum (1), Brandraum (2), Halle (3)

STROMUNGSGESCHWINDIGKEIT IN M/S

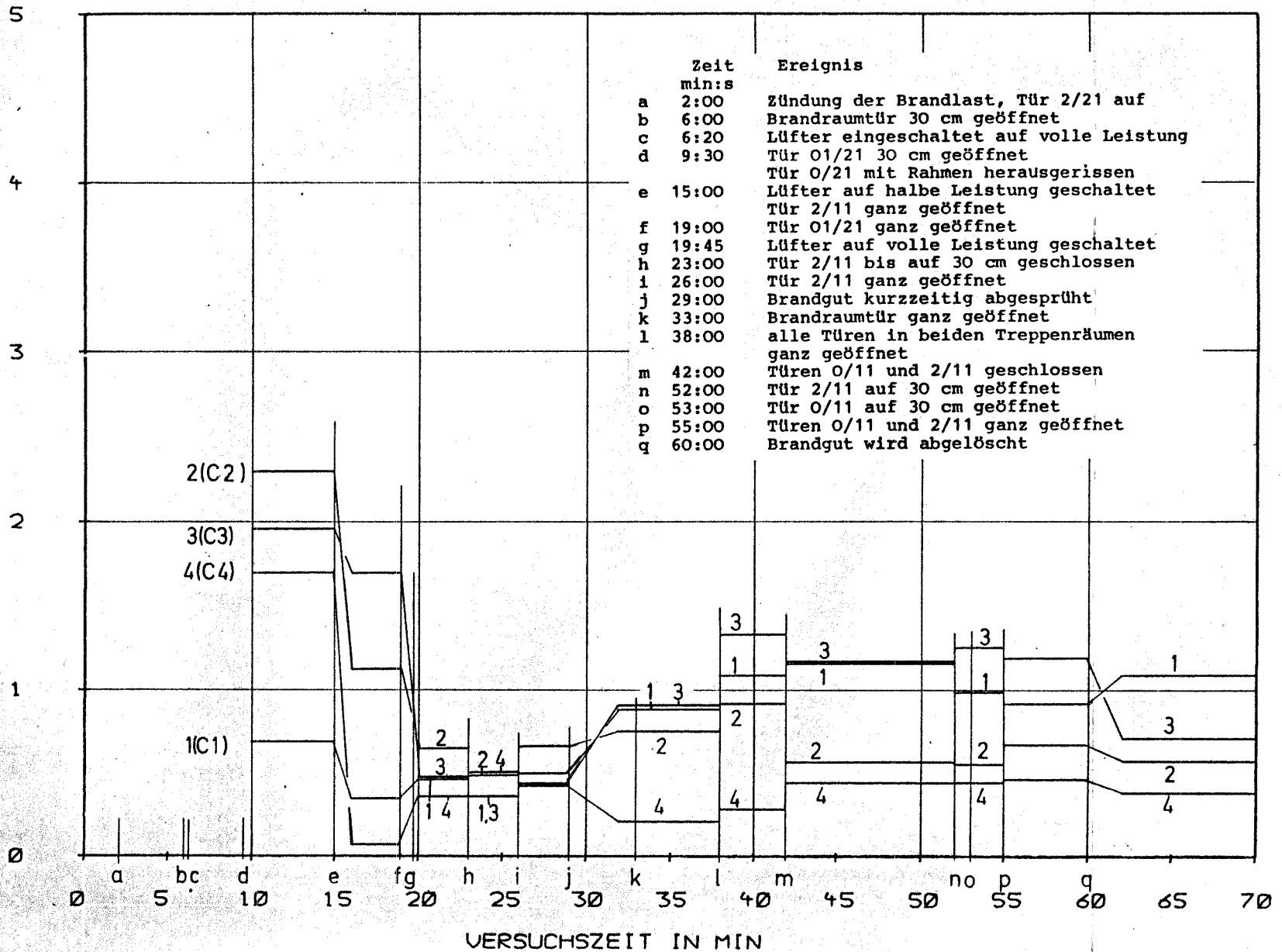


Bild 33 Zeitlicher Verlauf der aus den dynamischen Drücken berechneten Strömungsgeschwindigkeiten in den Türen Treppenraum/Vorraum und Treppenraum/Fluchtbalkon

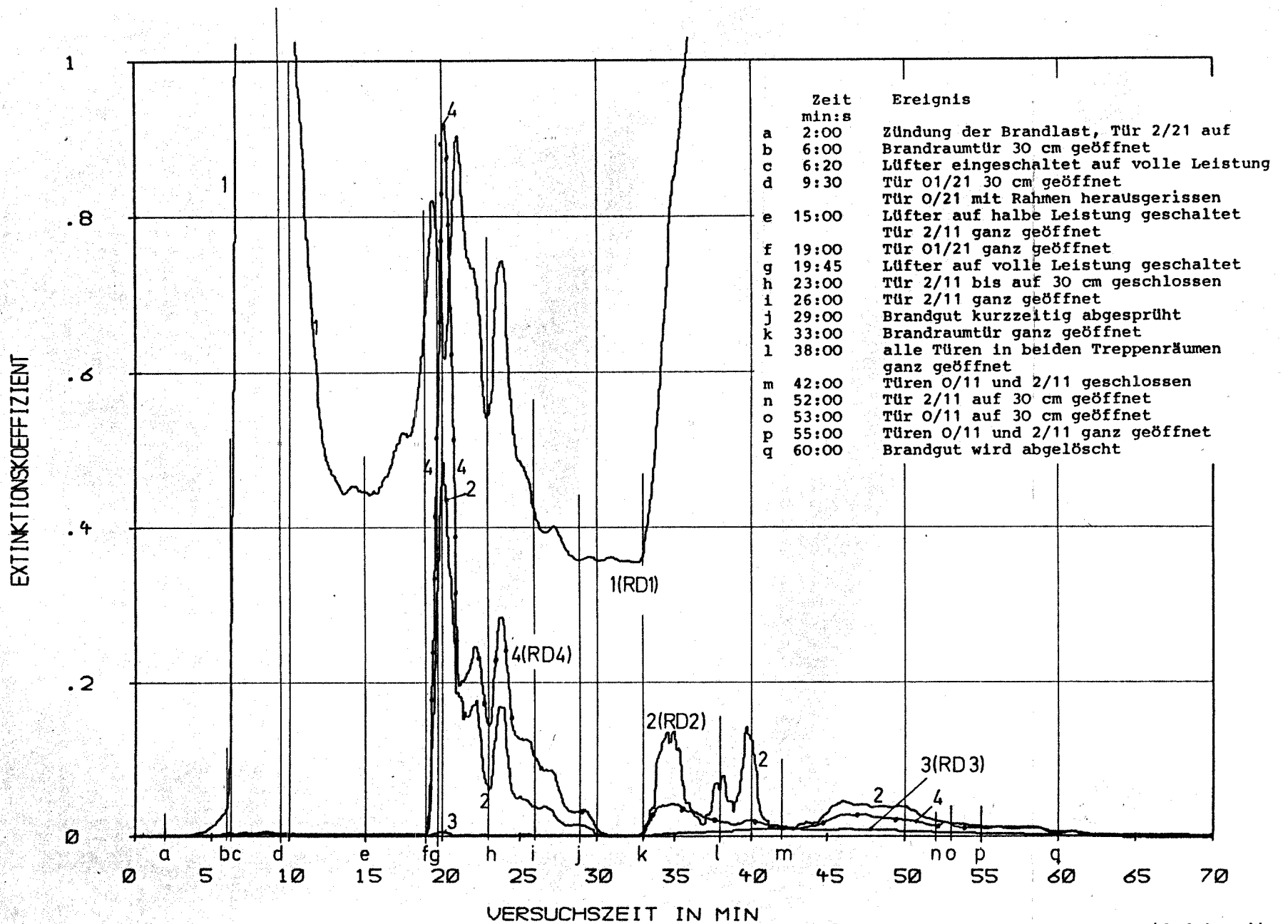


Bild 34 Zeitlicher Verlauf der optischen Rauchdichte im Vorraum(1) sowie im Treppenraum(2 bis 4)

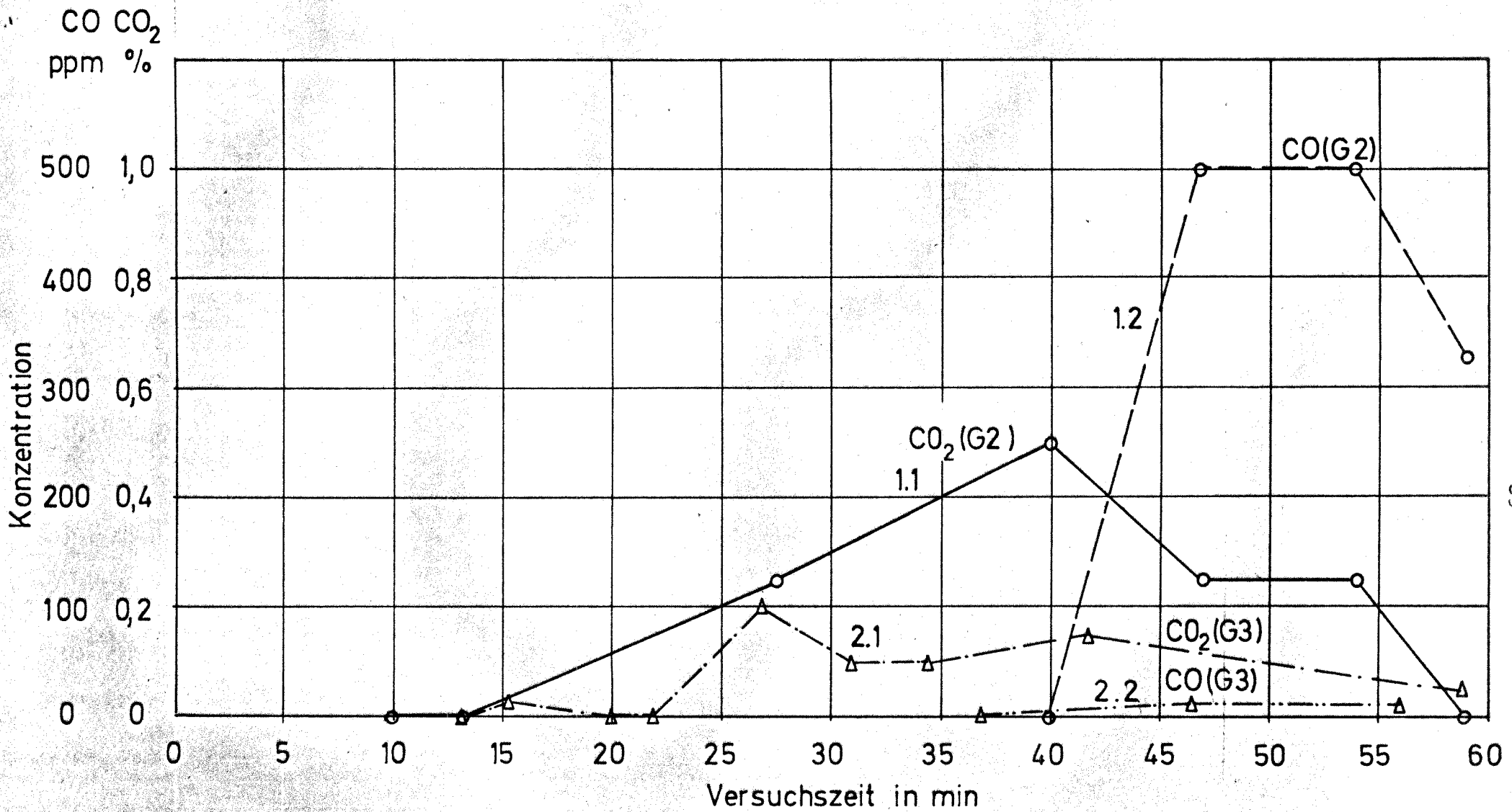


Bild 35 Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentration vor der Tür Treppenraum/Vorraum (1) sowie im Treppenraum (2)

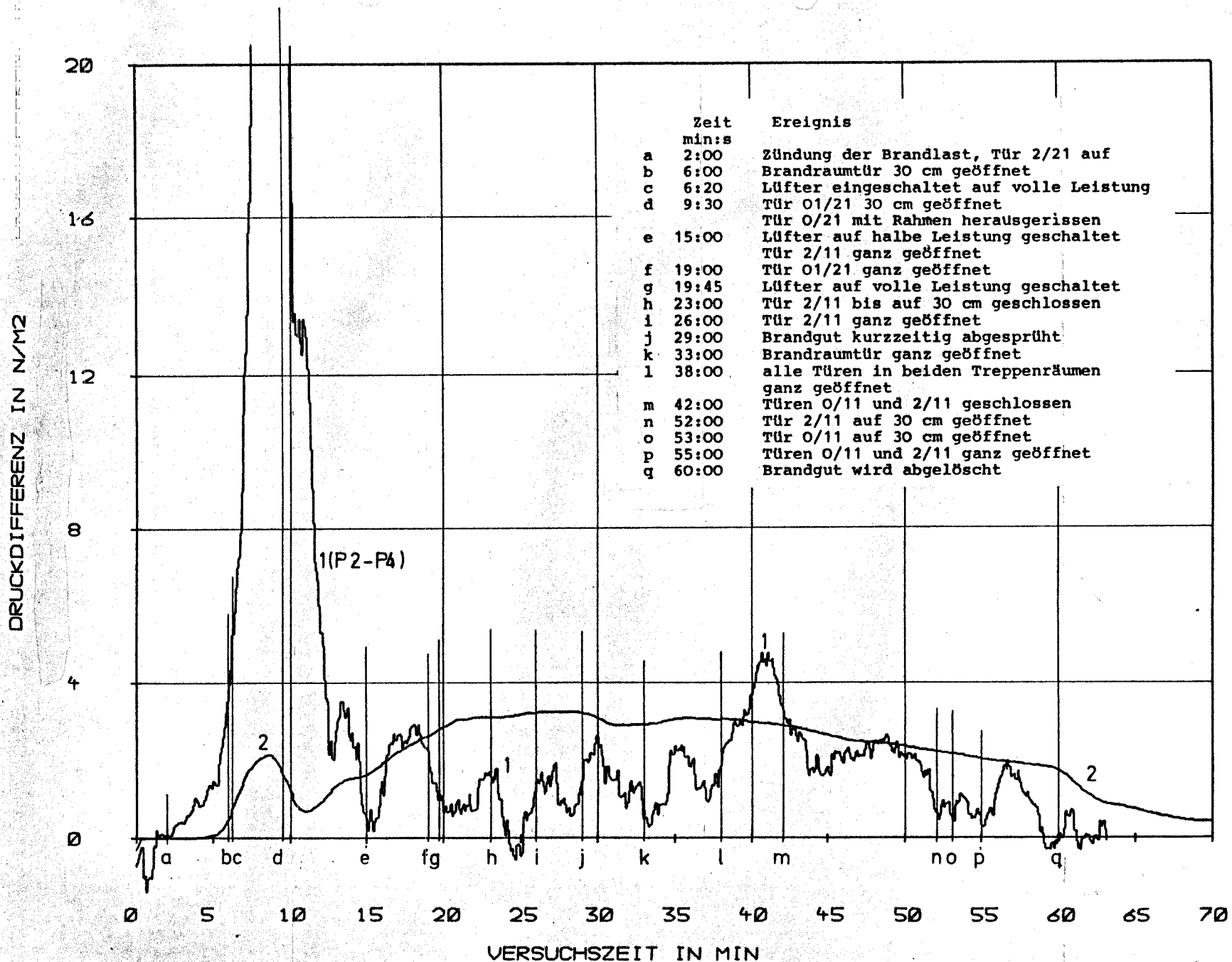


Bild 36 Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Vorraum  
 1 gemessene Werte 2 berechnete Werte