

Rauchfreihaltung eines innenliegenden  
Treppenraumes mittels eines  
Druckbelüftungssystems

**T 223**

T 223

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)

Rauchfreihaltung eines innenliegenden Treppenraumes  
mittels eines Druckbelüftungssystems

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

*Absehl. : Juni 77*

*Beauf. : Dipl.-Ing. R. Jochen*

Auftraggeber:  
Institut für Bautechnik, Berlin

DOKUMENTATIONSTELLE FÜR BAUTECHNIK  
IN DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Inventar-Nr. *2023*

Nd. Nr. *223*



## INHALTSVERZEICHNIS

|   | Seite |
|---|-------|
| 1. EINLEITUNG                                   | 1     |
| 2. ZIELSETZUNG DES BRANDVERSUCHES               | 2     |
| 3. ALLGEMEINE BAUBESCHREIBUNG DES BÜROHAUSES    | 2     |
| 4. AUSLEGUNG DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS         | 3     |
| 5. VERSUCHSBEDINGUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG | 4     |
| 5.1. Zustand des Gebäudes                       | 4     |
| 5.2. Brandraum                                  | 4     |
| 5.3. Volumenströme des Druckbelüftungssystems   | 5     |
| 5.4. Meß- und Beobachtungseinrichtungen         | 6     |
| 5.5. Kaltrauchversuch                           | 7     |
| 5.6. Brandversuch                               | 10    |
| 5.6.1. Brandlast                                | 10    |
| 5.6.2. Ablauf des Brandversuches                | 12    |
| 6. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG    | 19    |
| 6.1. Kaltrauchversuch                           | 19    |

|        | Seite  |    |
|--------|--|----|
| 6.2.   | Brandversuch   | 22 |
| 6.3.   | Beurteilung der Wirksamkeit des<br>Druckbelüftungssystems                  | 30 |
| 6.3.1. | Bei dem Brandversuch entstehender<br>Rauchgasvolumenstrom                  | 31 |
| 6.3.2. | Luftvolumenströme durch die Tür-<br>öffnungen 22 und 21                    | 32 |
| 7.     | FOLGERUNGEN AUS DEN VERSUCHS-<br>ERGEBNISSEN                               | 34 |
| 7.1.   | Bedingungen, die die Wirksamkeit des<br>Druckbelüftungssystemes verringern | 34 |
| 10.    | ZUSAMMENFASSUNG  | 39 |
| 11.    | LITERATURVERZEICHNIS   | 41 |
| 12.    | BILDER   | 42 |

! schwarz-weiß Fotos separat ab Seite 49 !

**FRAUNHOFER IRB VERLAG**  
Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau  
Postfach 800469, 70504 Stuttgart  
Telefon 07 11/970-2500 · Telefax 07 11/970-2508  
e-mail: irb@irb.fhg.de

*Eigenhinweis des Verlags*

Rauchfreihaltung eines innenliegenden Treppenraumes  
mittels eines Druckbelüftungssystems.

Bauvorhaben: Hamburg, Großer Burstah 46-48

## 1. EINLEITUNG

In Hamburg, Großer Burstah 46-48, ist ein 8 geschos-  
siges Bürohaus in Massivbauweise errichtet worden; bei  
dem der Treppenraum und die beiden Aufzugsschächte etwa  
in der Mitte des Gebäudes angeordnet sind. Das Gebäude  
schließt seitlich an die bereits bestehenden Gebäude an.  
Auf der Rückseite wird es durch den Mönkedammfleet und  
auf der Vorderseite durch den Großen Burstah begrenzt.  
Um im Brandfall das Eindringen von Rauch und Brandga-  
sen in die Rettungswege zu verhindern, ist in diesem  
Gebäude ein Druckbelüftungssystem installiert, an das  
der Treppenraum und die Hallen in den einzelnen Geschos-  
sen, von denen aus die Büroräume betreten werden, ange-  
schlossen sind.

Die Funktions- und Leistungsfähigkeit dieses Druckbelüf-  
tungssystems sollte durch einen wirklichkeitsnahen Brand-  
versuch nachgewiesen werden. Das Programm für diesen  
Brandversuch wurde von einem dafür eingesetzten Beirat  
"Brandversuch für ein Druckbelüftungssystem", der sich  
aus Vertretern der Baubehörde Hamburg, der Feuerwehr Ham-  
burg, dem Institut für Bautechnik, Berlin, und des TÜV  
Bayern zusammensetzte, in Zusammenarbeit mit der For-  
schungsstelle für Brandschutztechnik festgelegt. Mit der  
Durchführung und Auswertung dieses Versuches wurde die  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik in Zusammenarbeit  
mit der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH vom Bau-  
ordnungsamt der Freien und Hansestadt Hamburg beauftragt.  
Die Finanzierung dieser Untersuchung erfolgte durch das  
Institut für Bautechnik, Berlin.

## 2. ZIELSETZUNG DES BRANDVERSUCHES

Ziel dieses Versuches ist es, die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Druckbelüftungssystems daraufhin zu überprüfen, ob das Eindringen von Rauch und Brandgasen in die Hallen und in den Treppenraum soweit verhindert wird, daß eine einwandfreie Benutzbarkeit dieser Rettungswege im Brandfalle gewährleistet ist. Die Ergebnisse dieser Brandversuche sollen außerdem als Grundlage für bauaufsichtliche Vorschriften bei innenliegenden Treppenträumen mit Druckbelüftungssystemen dienen.

## 3. ALLGEMEINE BAUBESCHREIBUNG DES BÜROHAUSES

Das Bürohaus hat eine Länge von ca. 13 m, eine Tiefe von ca. 29 m und eine Höhe von ca. 24 m. Es besitzt ein Kellergeschoß, ein Erdgeschoß, fünf gleichartige Obergeschosse sowie ein Staffelgeschoß. Den Grundriß eines Normalgeschosses zeigt Bild 1, Bild 2 gibt den Querschnitt dieses Gebäudes wieder. Die fünf Normalgeschosse werden als Büroräume genutzt. Im Erdgeschoß ist der Eingang, der zum Treppenraum und zu den beiden Aufzügen führt. Ein getrennter Eingang führt zu der im Erdgeschoß vorhandenen Ladenfläche. Der Büroraum ist über eine Halle vom Treppenraum oder von den Aufzügen zu erreichen. Zwischen Vorraum und Treppenraum ist eine selbstschließende, einflügelige, feuerhemmende Tür angeordnet. Zwischen Halle und Büroraum befindet sich eine zweiteilige Glastür mit einem Standflügel, die ebenfalls eine Selbstschließeinrichtung besitzt. Die 5 Normalgeschosse können entweder als ein zusammenhängender Büroraum oder mittels einer Unterteilung als 2 ca. gleichgroßer Büroräume verwendet werden. Bei einer Unterteilung ändert sich der Abschluß zwischen den Büroräumen und der Halle. Die Büroräume sind voll klimatisiert.

#### 4. AUSLEGUNG DES DRUCKBELÜFTUNGSSYSTEMS

Das Druckbelüftungssystem besteht aus zwei getrennten Ventilatoren und Zuleitungen für den Treppenraum und für die Hallen. Die Luft wird in die Hallen durch je ein Eintrittssieb über den Toilettentüren und in den Treppenraum durch Eintrittsöffnungen in Höhe jeder Geschoßebene zugeführt. Zu dem Druckbelüftungssystem gehören außerdem zwei senkrechte Schächte, die durch das ganze Gebäude laufen und die im Brandfall das Geschoß entlüften, in dem der Brand ausgebrochen ist. Bei einer Teilung des Bürogeschosses kann jede Geschoßhälfte getrennt durch je einen Schacht entlüftet werden.

Die Betriebsweise des Druckbelüftungssystems ist wie folgt:

Im Normalfall, d.h. während der Arbeitszeit werden die Gebläse so betrieben, daß im Treppenraum und in der Halle ein Überdruck von ca.  $15 \text{ N/m}^2$  aufrechterhalten wird. Im Brandfall wird durch einen Rauchmelder die im Brandraum vorhandene Klappe des Entlüftungsschachtes geöffnet, die Feuerklappen der Klimaanlage geschlossen und beide Gebläse des Druckbelüftungssystems vom Normalbetrieb auf Notbetrieb umgeschaltet. Dadurch stellt sich entsprechend den Auslegungsdaten des Druckbelüftungssystems im Treppenraum und in allen Hallen ein Überdruck von 50 bis  $60 \text{ N/m}^2$  gegenüber der Umgebung ein.

Nach Sanderson [1] ist zum Erreichen dieses Überdruckes im Treppenraum ein Luftvolumenstrom von  $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$  und für alle Hallen ein Luftvolumenstrom von  $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$  bei geschlossenen Türen erforderlich. Werden alle Türen vom Treppenraum zu den Hallen und von den Hallen zu den Büroräumen geöffnet, so sinkt der Überdruck auf ca. 0 ab und die zugeführten Volumenströme nehmen die Werte  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $2,88 \text{ m}^3/\text{s}$  an.

## 5. VERSUCHSBEDINGUNGEN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

### 5.1. Zustand des Gebäudes

Der Versuch wurde am 4. April 1976 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war das Gebäude im Rohbau fertig. Es waren in allen Geschossen die Türen zwischen Treppenraum und den Hallen und im Brandgeschoß auch die Türe zwischen Halle und Büroraum eingebaut. Alle anderen Türen und Öffnungen innerhalb des Gebäudes waren bis auf die Öffnungen in diesen Trennwänden, mit denen die Spaltöffnungen der vorgesehenen Türen und Abschlußteile simuliert werden sollten, abgemauert bzw. verschlossen. Die Zuluftleitungen waren bis auf die Installation der Austrittsgitter vollständig fertiggestellt. Auch waren die beiden Entlüftungsschächte einschließlich der Absperrorgane installiert.

### 5.2. Brandraum

Der Brandraum befand sich im zweiten Obergeschoß des Gebäudes. Durch das Errichten von Ziegelmauerwänden wurde der eigentliche Brandraum von dem übrigen Büroraum des Geschosses abgeteilt. Die Abmessungen des Brandraumes und seine Lage innerhalb des Gebäudes ergeben sich aus Bild 3. Die Fensteröffnung auf der Fleetseite hatte eine Breite von 920 mm und eine Höhe von 1700 mm und war mit einer Isolierglasscheibe verschlossen, wie sie für dieses Haus vorgesehen sind. Die Decke des Versuchsraumes war mit Asbestzementplatten geschützt. Die Betonstützen und Wände im Bereich des Brandraumes waren mit davor aufgemauerten Gasbetonsteinen verkleidet. Der Boden im Bereich der Brandlast war durch eine Lage Gasbetonsteine geschützt. Im übrigen Teil des Brandraumes war auf dem Boden Sand aufgeschüttet. In die Mauer des Brandraumes zur Straßenseite waren Fenster eingebaut, durch die der Brandablauf beobachtet werden konnte.

### 5.3. Volumenströme des Druckbelüftungssystems

Vor den Versuchen wurden die von den Gebläsen des Druckbelüftungssystems gelieferten Luftvolumenströme in der Betriebsstufe "Notbetrieb" gemessen. Bei diesen Messungen betrug der atmosphärische Druck  $10.271 \text{ N/m}^2$  und die Lufttemperatur  $12^\circ \text{ C}$ .

Die Luftvolumenströme bei geschlossenen Türen in die Hallen lagen zwischen  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  (im 3. Obergeschoß) und  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$  (im 2. Obergeschoß). Der Mittelwert aller ermittelten Luftvolumenströme in die Hallen betrug  $0,38 \text{ m}^3/\text{s} \pm 8,5 \%$ . In den Treppenraum strömte insgesamt  $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$  Luft. Die einzelnen gemessenen Luftvolumenströme in den Auslaßquerschnitten des Treppenraumes in Höhe jedes Geschosses lagen zwischen  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  (im 7. Obergeschoß) und  $0,096 \text{ m}^3/\text{s}$  (im 1. Obergeschoß).

Bei diesen Volumenströmen wurden folgende Druckdifferenzen zwischen den beiden Seiten der geschlossenen Türen im 2. Obergeschoß gemessen.

Tür Treppenraum/Halle ca.  $5 \text{ N/m}^2$

Tür Halle/Bürraum ca.  $80 \text{ N/m}^2$

Bei geöffneter Tür Halle/Bürraum ergab sich zwischen den beiden Seiten der Tür Treppenraum/Halle eine Druckdifferenz von  $45 \text{ N/m}^2$ . Die Geschwindigkeit der durch die offene Tür Halle/Bürraum in den Bürraum einströmende Luft wurde dabei mit ca.  $0,47 \text{ m/s}$  ermittelt. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung eines angenommenen Faktors von  $0,8$  für das Verhältnis von gemessener Geschwindigkeit zur mittleren Geschwindigkeit über die ganze Querschnittsfläche der Tür ein Volumenstrom von  $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Hier und im Folgenden wird als positive Richtung stets das Druckgefälle und damit die Strömung vom Treppenraum in die Halle bzw. von der Halle in den Bürraum angesetzt.

Waren die Türen Treppenraum/Halle und Halle/Büroraum im 2. OG. geöffnet, so wurden folgende Strömungsgeschwindigkeiten in den Türöffnungen gemessen:

In der Türöffnung Treppenraum/Halle 0,54 m/s,

in der Türöffnung Halle/Büroraum 0,58 m/s

Waren zusätzlich die Türen im Erdgeschoß geöffnet (Eingangstür, Tür Treppenraum/Eingangshalle) so ergaben sich die folgenden Strömungsgeschwindigkeiten:

In der Türöffnung Treppenraum/Halle - 0,1 m/s,

in der Türöffnung Halle/Büroraum 0,32 m/s

#### 5.4. Meß- und Beobachtungseinrichtungen

Die Anordnung der Meßstellen für die Bestimmung der Temperaturen, der Drücke, der CO- und CO<sub>2</sub>- Gehalte in der Luft sowie der optischen Rauchdichte und die Standorte der Beobachter und der Kameras gehen aus den Bildern 4 und 5 hervor.

An 14 Stellen (T1 bis T14) wurden mit Chromel- Alumel- Mantelthermoelementen von 1,6 mm Durchmesser, über deren Enden 10 mm breite Blechstreifen von 0,7 mm Dicke U-förmig zusammengebogen waren, die Temperaturen gemessen und mit Kompensationsgeräten registriert.

Die 11 Druckmeßstellen lagen örtlich zum Teil unmittelbar neben den Temperaturmeßstellen und wurden deshalb mit den gleichen Nummern wie die zugehörigen Temperaturmeßstellen bezeichnet. Zusätzlich zu den Messungen der statischen Drücke bzw. Druckdifferenzen wurden an den Stellen T7, T8, T11 und T12 die dynamischen Drücke mit Prandtlrohren gemessen, um damit die Strömungsgeschwindigkeiten C1 bis C4 in den Türen Halle/Brandraum und Treppenraum/Halle in 2 Höhen berechnen zu können.

An den Stellen G1 und G2 wurde über Membranpumpen Rauchgase bzw. Luft abgesaugt, die mit Prüfröhrchen auf ihren CO- und CO<sub>2</sub>-Gehalt untersucht wurden. Bei der Meßstelle G 3 wurde der CO- und CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft direkt mit dem Prüfröhrchen ermittelt. An den 3 Meßstellen RD 1 bis RD 3 in der Halle, im Treppenraum oberhalb der Tür sowie 1/2 Treppe unterhalb des Brandgeschosses wurde die optische Rauchdichte gemessen. Die meteorologischen Daten wie Außentemperatur, Windstärke und Windrichtung wurden in ca. 3 m Höhe über dem Dach des Bürogebäudes ermittelt.

Während des Versuches wurden die Vorgänge im Brandraum (Kamera 1) sowie in der Halle (Kamera 2) fotografiert.

Der Versuchsablauf wurde von 4 Personen, die sich bei den beiden Kameras, im Treppenraum, sowie vor dem Fenster des Brandraumes aufhielten, beobachtet und protokolliert.

#### 5.5. Kaltrauchversuch

Vor dem Brandversuch wurde zur Überprüfung der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems ein Kaltrauchversuch durchgeführt.

Beim Kaltrauchversuch wurde in dem Brandraum bei geschlossenen Türen und Normalbetrieb des Druckbelüftungssystems Rauchpulver entzündet. Nach 1 min wurde das Druckbelüftungssystem manuell auf Notbetrieb umgeschaltet. Danach wurden mit verschiedenen Zeitdifferenzen die Türen in der Reihenfolge 22, 21, 01, 02, 12, 32, 11, und 31 geöffnet.

Bei der Kennzeichnung der Türen bedeutet

die 1. Ziffer die Geschoßzahl: 0: Erdgeschoß  
1: 1. Obergeschoß,  
2: 2. Obergeschoß,  
usw. und

die 2. Ziffer der Ort der Tür: 1: Tür Treppenraum/  
Halle  
2: Tür Halle/Büro-  
raum.

Im Erdgeschoß führt die Tür 02 ins Freie (Eingangstür).

Die bei diesem Versuch ermittelten Temperaturen sind in Bild 6 über der Versuchszeit aufgetragen. Bild 7 gibt den zeitlichen Verlauf der für die Beurteilung der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystemes wesentlichen Druckdifferenzen wieder, die zwischen den in Bild 5 eingezeichneten Druckmeßstellen ermittelt wurden. In beiden Bildern sind die Öffnungszeiten der einzelnen Türen sowie der Umschaltzeitpunkt des Druckbelüftungssystemes von Normalbetrieb auf Notbetrieb mit angegeben.

Eine Änderung der optischen Dichte der Luft durch eindringende Rauchgase im Bereich der Meßstrecken RD1 bis RD3 ist bei diesem Versuch nicht eingetreten. An der Meßstrecke RD1 (Halle), siehe Bild 5, ist bei einer Versuchszeit von 3,5 min der Wert  $I/I_0$  von 1,0 auf 0,95 abgesunken und nach einer weiteren Minute wieder auf 1,0 angestiegen. Eine Messung der CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte bei diesem Versuch nicht. Die Bilder 8.1 und 8.2 zeigen den Brandraum kurze Zeit nach dem Entzünden des Rauchpulvers.

Die Außentemperaturen während dieses Versuches betrug ca. 9 °C. Während des Versuches wurden folgende, in chronologischer Reihenfolge aufgeführte Beobachtungen gemacht:

| Versuchszeit | Beobachtungen   |
|--------------|---|
| 0 Minuten    | Zündung   |
| 1. Minute    | Druckbelüftungssystem wird von Normalbetrieb auf Notbetrieb umgeschaltet. Der Brandraum ist zu dieser Zeit vollständig verqualmt. |
| 2. Minute    | Der Rauch strömt von oben nach unten an dem Fenster auf der   |

Fleetseite vorbei. Der Brandraum ist nahezu vollständig verqualmt. Es besteht nur noch eine geringe Sicht durch die Fensterscheibe in den Brandraum.

3. Minute

Bei einer Versuchszeit von 2 min 40 s wird die Tür 22 geöffnet. Die Fensterscheibe ist so stark beschlagen, daß keine Sicht im Brandraum möglich ist.

4. Minute

Bei einer Versuchszeit von 3 min 40 s wird die Tür 21 geöffnet. Rauch dringt durch den Fensterahmen nach außen.

5. Minute

Ganz leichter Rauchgeruch im Treppenraum wahrnehmbar. Rauch dringt trotz offenstehender Tür 22 nicht in die Halle ein. Rauch dringt verstärkt durch den Fensterrahmen und durch das Mauerwerk an der Fleetseite nach außen.

6. Minute

Bei einer Versuchszeit von 5 min 20 s wird die Tür 01 geöffnet.

7. Minute

Im Brandraum wird weiteres Rauchpulver entzündet. Kein Eindringen von Rauch in die Halle, kein Rauch in der Halle und im Treppenraum feststellbar.

9. Minute

Bei einer Versuchszeit von 8 min 20 s wird die Tür 02 (Eingangstür) geöffnet.

| Versuchszeit | Beobachtungen  |
|--------------|--|
| 10. Minute   | Rauchaustritt am Fenster (Fleetseite) wird schwächer. Die Halle und der Treppenraum sind rauchfrei.  |
| 11. Minute   | Die Türen 12 und 32 werden geöffnet.   |
| 13. Minute   | Die Türen 11 und 31 werden geöffnet. Kein Rauch in Halle und Treppenraum feststellbar. Die Verqualmung des Brandraumes geht langsam zurück. Vom Beobachtungsfenster beträgt die Sichtweite in den Brandraum ca. 3 m. |
| 20. Minute   | Der Versuch wird beendet. Bis zu diesem Zeitpunkt kein Rauch in die Halle und den Treppenraum eingedrungen.  |

Bei dem Kaltrauchversuch waren die Zeiten zwischen dem Öffnen der einzelnen Türen sehr kurz, sodaß sich wahrscheinlich nicht immer konstante Strömungsverhältnisse bei den jeweiligen Türstellungen ergeben haben.

## 5.6. Brandversuch

### 5.6.1 Brandlast

Als Brandlast wurden bei diesem Versuch zwei Brandlastpaletten verwendet. Der Aufbau einer Brandlastpalette, der in Anlehnung an den vom TÜV Bayern vorgelegten Vorschlag erfolgte, ist in Bild 9 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, die nur bei einer der beiden verwendeten Brandlastpaletten vorhanden ist, 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 Styropor P Platten (ohne Brandschutzausrüstung). Die Styroporplatten 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 mit einer Dicke von 3 mm und mit einem Nadelfilzteppich 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 Vorhänge 11 aus Baumwolle oder Baumwollmischgewebe mit maximal 50% Synthetikanteil angebracht sind. Die Brandlast einer einzelnen Palette setzt sich wie folgt zusammen. Die Ziffern in den Klammern beziehen sich auf die Zeichnungen in Bild 9.

|                 |          |
|-----------------|----------|
| 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   |

Bei der Brandlastpalette, die entzündet wird, kommt zusätzlich hinzu:

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| Zündkrippe aus Holz (4) | 12,0 kg und |
| Brennspiritus           | 0,4 kg      |

Das Gesamtgewicht einer Brandlastpalette beträgt 175,1 kg und als Zündpalette 187,5 kg.

Die Brandlast bei dem Versuch setzte sich aus 2 Brandlastpaletten zusammen und betrug 362,6 kg. Der Heizwert wies einen Betrag von insgesamt 6 260 MJ auf. Bezogen auf die Fläche des Brandraumes von 54 m<sup>2</sup> ergab sich damit eine mittlere Brandbelastung von 116 MJ/m<sup>2</sup>.

Wie Vorversuche in einem ca. 12 m<sup>2</sup> 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 m x 1 m oder größer) beträgt für eine Brandlastpalette mit Zündkrippe in der stationären Brandphase 6,4 kg/min.

Bei dem Brandversuch wurden die zwei Brandlastpaletten in der in Bild 3 gezeigten Anordnung aufgestellt. Die Abstände zwischen beiden Paletten betragen 290 mm. Die Brandlastpalette I enthielt die Zündkrippe. Bild 10 zeigt eine Aufnahme der beiden Brandlastpaletten und deren Anordnung im Brandraum. Bild 11 zeigt die Anordnung der Zündkrippe und der Zündwanne.

#### 5.6.2 Ablauf des Brandversuches

Bei Beginn des Versuches waren, wie beim Kaltrauchversuch, alle Türen geschlossen. Die Stellung der Türen (auf/zu) wurden bei diesem Versuch durch Türkontakte überwacht und der Zeitpunkt des Öffnens oder Schließens der einzelnen

Türen registriert. Das Druckbelüftungssystem lief zur Zeit der Zündung in Normalbetrieb. Aufgrund der Aufzeichnungen der 4 Beobachter ergibt sich nachstehend der chronologische Ablauf des Versuches. Bild 12 zeigt in schematischer Anordnung die Lage der einzelnen Holzkrippen auf den beiden Brandlastpaletten mit einer entsprechenden Nummerierung, auf die sich im Folgenden bezogen wird.

| Versuchszeit | Beobachtung   |
|--------------|---|
| 0            | Zündung des Brennspritus in der Zündwanne unter dem Zündstapel (Zeit 12:02 Uhr)   |
| 1. Minute    | Der Brand entwickelt sich ohne wesentliche Rauchbildung an der Zündkrippe.  |
| 2. Minute    | Bei einer Versuchszeit von 2 min 6 s wird das Druckbelüftungssystem manuell von Normalbetrieb auf Notbetrieb umgeschaltet. Die Flammen erreichen nach 2 min die Decke. Der Abbrand erfolgt ohne wesentliche Rauchbildung. Die Sicht in den Brandraum ist gut. |
| 3. Minute    | Der Zündstapel brennt fast vollständig, Rauch kommt aus dem Entlüftungsschacht I (siehe Bild 4).  |
| 4. Minute    | Bei einer Versuchszeit von 3 min 40 s entzündet sich die Krippe 1   |
| 5. Minute    | Das Feuer hat auf das Styropor neben der Krippe 1 übergreifen.  |

Versuchszeit

Beobachtungen

6. Minute

Bei einer Versuchszeit von 5 min 37 s wird die Tür 22 geöffnet. Die Brandintensität und die Verqualmung nehmen zu. Die Gardinen entzünden sich. Der Rauchaustritt aus dem Entlüftungsschacht I verstärkt sich nach dem Öffnen der Tür 22. Im Treppenraum sind keine Brandgase wahrnehmbar.

7. Minute

Der Brand hat sich weiter ausgedehnt. Es brennt jetzt auch Krippe 2. Die Sicht im Brandraum verbessert sich etwas. Große Rußflocken wirbeln durch den Raum, was auf eine starke Luftströmung schließen läßt. Die Halle vor dem Brandraum ist etwas verqualmt. Rauch tritt jetzt auch aus dem Entlüftungsschacht II.

8. Minute

Bei einer Versuchszeit von 7 min 15 s wird die Tür 21 geöffnet. Nach 7 min 30 s geht die Verqualmung der Halle und des Brandraumes zurück. Die innere Scheibe des isolierverglasten Fensters ist gesprungen.

9. Minute

Bei einer Versuchszeit von 8 min 57 s wird die Tür 01 geöffnet. Bis jetzt brennen nur die Zündkrippe sowie die Krippen 1, 2 und 4. Die Gardinen der Zündpalette sind verbrannt. Die Verqualmung des Brandraumes geht weiter zurück. Die Halle ist weiterhin rauchfrei.

Versuchszeit

Beobachtungen

10. Minute

Der Brand hat jetzt auch Krippe 6 erfaßt. Der Brandraum ist bis in einer Höhe von ca. 1,5 m rauchfrei. Halle und Treppenraum sind weiterhin rauchfrei.

11. Minute

Das Feuer hat sich auf die Krippen 7 und 8 ausgebreitet. Der Rauchaustritt aus den Entlüftungsschächten nimmt ab. Der Brandraum wird von zwei Feuerwehrleuten kurz betreten.

13. Minute

Bei einer Versuchszeit von 12 min 18 s wird die Tür O2 geöffnet. In der Fensterscheibe entstehen weitere Sprünge. Die Verqualmung des Brandraumes steigt stark an. Auch der Rauchaustritt aus den beiden Entlüftungsschächten nimmt wieder zu. Halle und Treppenraum sind weiterhin rauchfrei.

15. Minute

Das Feuer hat sich auf die 2. Brandlastpalette ausgedehnt. Nachdem sich die Sichtverhältnisse in dem Brandraum verbessert hatten, erfolgt ab einer Versuchszeit von 14 min 30 s eine schnell zunehmende Verqualmung bis zur völligen Sichtbehinderung. An der inneren Scheibe des isolierverglasten Fensters bilden sich weitere Risse. Der Rauchaustritt durch die Entlüftungsschächte verstärkt sich weiter, Funken treten mit aus. Treppenraum und Halle sind rauchfrei.

Versuchszeit

Beobachtungen

16. Minute

Die Tür 12 wird bei einer Versuchszeit von 15 min 6 s und die Tür 32 wird bei einer Versuchszeit von 15 min 12 s geöffnet. Ab einer Versuchszeit von 15 min 30 s tritt eine leichte Verqualmung der Halle ein. Der Treppenraum ist weiterhin rauchfrei.

17. Minute

An den Beobachtungsfenstern schlägt sich Ruß nieder. Durch den Rahmen des Fensters auf der Fleetseite tritt Rauch aus. Der Treppenraum ist weiterhin rauchfrei.

19. Minute

Die Tür 11 wird bei einer Versuchszeit von 18 min 24 s und die Tür 31 bei einer Versuchszeit von 18 min 27 s geöffnet. Die Sicht im Brandraum wird besser. Die Flammenentwicklung und Strömung im Brandraum verstärkt sich wesentlich.

22. Minute

Der Brand verläuft jetzt ohne Rauchbildung. Alle Kunststoffe sind verbrannt. Zum Teil fallen ausgebrannte Krippen zusammen. Die äußere Scheibe der Isolierversglasung des Fensters ist gesprungen. Bei einer Versuchszeit von 21 min 42 s wird die Tür 02 und bei einer Versuchszeit von 21 min 54 s die Tür 01 geschlossen. Der Rauchaustritt durch die Entlüftungsschächte geht zurück.

| Versuchszeit | Beobachtungen   |
|--------------|---|
| 24. Minute   | Bei einer Versuchszeit von 23 min 54 s wird die Tür 41 und bei einer Versuchszeit von 24 min die Tür 51 geöffnet. Der Treppenraum ist weiterhin rauchfrei.  |
| 26. Minute   | Der Vorraum ist leicht verqualmt. Der Treppenraum ist rauchfrei. Ab einer Versuchszeit von 25 min 30 s ist auch die Halle wieder rauchfrei.   |
| 28. Minute   | Die Tür 52 wird bei einer Versuchszeit von 27 min 30 s und die Tür 42 bei einer Versuchszeit von 27 min 42 s geöffnet. Die Zündkrippe sowie die Krippen 1 und 2 sind ausgebrannt und fallen zum Teil zusammen. Die äußere Scheibe der Isolierverglasung hat weitere Sprünge bekommen. Der Aufenthalt unmittelbar vor der Scheibe ist gut möglich. |
| 31. Minute   | Die Türen 01 und 02 werden bei einer Versuchszeit von 30 min 24 s bzw. 30 min 31 s wieder geöffnet.   |
| 35. Minute   | Die Brandintensität geht weiter zurück. Die Flammen erreichen eine Höhe von maximal 1 m über den Krippen.   |
| 39. Minute   | Tür zwischen Brandraum und Halle ist geschlossen.   |
| 40. Minute   | Der Versuch wird abgebrochen. Die brennenden Reste der Brandlast werden mit einem Sprühstrahl abgelöscht.   |

Den Ablauf des Brandversuches geben die Bilder 13.1 bis 13.19 und 14.1 bis 14.15 wieder.

Die Bilder 13.1 bis 13.19 zeigen die Halle mit dem Eingang zum Büro (Brandraum). Zur zusätzlichen Beurteilung der optischen Rauchdichte ist eine Säule mit 7 durch 25 W Glühlampen beleuchteten Fenstern aufgestellt.

Die Bilder 14.1 bis 14.15 zeigen den Brandverlauf im Brandraum. Da nach ca. 12 min Versuchszeit die Kamera wegen der starken Wärmestrahlung vom Beobachtungsfenster entfernt werden mußte, ist bei der nachfolgenden Aufnahme eine Spiegelung des Beobachtungsraumes im Beobachtungsfenster eingetreten.

Während des Brandversuches betrug die Außentemperatur ca.  $8^{\circ}$  C. Der Wind kam aus Süd-Südost mit einer Windgeschwindigkeit bei Versuchsbeginn von ca. 1,8 m/s, die bis auf 2,9 m/s bei Versuchsende anstieg. Während der gesamten Versuchsdauer herrschte Sonnenschein.

Die bei diesem Brandversuch registrierten Daten sind in den folgenden Bildern über der Versuchszeit aufgetragen. Der zeitliche Temperaturverlauf, der an den 14 Meßstellen (siehe Bilder 4 und 5) gemessen wurde, ist in den Bildern 15, 16 und 17 wiedergegeben. Der zeitliche Druckverlauf an den 11 Meßstellen ist aus den Bildern 18 und 19 ersichtlich. Der zeitliche Verlauf der bei dem Versuch bestimmten Gaskonzentrationen ist zusammen mit den gemessenen Werten für die optische Rauchdichte, die durch das Verhältnis  $(1-I/I_0) \cdot 100$  ausgedrückt sind, im Bild 20 dargestellt. Der zeitliche Verlauf der in den Öffnungen der Türen 22 und 21 ermittelten Geschwindigkeiten ist im Bild 21 aufgetragen.

## 6. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG

### 6.1. Kaltrauchversuch

Wie aus Bild 6 zu entnehmen ist, sind die Temperaturen im Brandraum und in den Entlüftungsschächten durch die Verbrennung des Rauchpulvers angestiegen. Die maximale Temperatur von  $68^{\circ}$  C wurde nach ca. 2 min an der Meßstelle T 13 registriert. Die Temperaturen sind in der 8. Minute nochmals angestiegen, als weiteres Rauchpulver entzündet wurde. Der zeitliche Verlauf der Druckdifferenzen, die die Rauchausbreitung vom Brandraum in die Halle und in den Treppenraum wesentlich beeinflussen, sind in Bild 7 aufgetragen.

1. Versuchsphase: Zeit 0 min bis 1 min:

Alle Türen sind geschlossen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Normalbetrieb geschaltet.

Der Druck im Brandraum an der Meßstelle P 7 liegt etwas über dem Umgebungsdruck  $P_{\infty}$ . Die Druckdifferenz  $P 9 - P 7$  an der Tür 22 beträgt ca.  $32 \text{ N/m}^2$  und die Druckdifferenz  $P 16 - P 11$  an der Tür 21 ca.  $7 \text{ N/m}^2$ .

In der Halle und im Treppenraum liegt der Druck um ca.  $40 \text{ N/m}^2$  bzw.  $47 \text{ N/m}^2$  über dem Druck der Umgebung ( $P_{\infty}$ )

2. Versuchsphase: Zeit 1 min bis 2,6 min

Alle Türen sind geschlossen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Der Druck im Brandraum (Meßstelle P 7) sinkt beim Öffnen der Abluftklappen in

den Entlüftungsschächten unter den Umgebungsdruck  $P_{\infty}$ . Die Druckdifferenz  $P_9 - P_7$  an der Tür 22 steigt auf ca.  $88 \text{ N/m}^2$  an, die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 sinkt auf ca.  $4,5 \text{ N/m}^2$  ab. Der Druck in der Halle (P 3) und im Treppenraum (P 16) steigt bis auf  $75 \text{ N/m}^2$  bzw.  $81 \text{ N/m}^2$  gegenüber dem Umgebungsdruck ( $P_{\infty}$ ) an.

3. Versuchsphase: Zeit 2,6 min bis 3,6 min  
Die Tür 22 steht offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Beim Öffnen der Tür 22 bricht die Druckdifferenz an dieser Tür zusammen. Die Druckdifferenz  $P_7 - P_{\infty}$  zwischen Brandraum und Umgebung steigt in dieser Versuchsphase von  $-19 \text{ N/m}^2$  auf  $0 \text{ N/m}^2$  an. Die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 beträgt im Durchschnitt ca.  $55 \text{ N/m}^2$ . Der Druck in der Halle (P 3) sinkt bis auf  $4,5 \text{ N/m}^2$  unter den Umgebungsdruck  $P_{\infty}$  ab, während der Druck in Treppen ca.  $50 \text{ N/m}^2$  über dem Umgebungsdruck  $P_{\infty}$  liegt.

4. Versuchsphase: Zeit 3,6 min bis 5,6 min  
Die Türen 21 und 22 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 sinkt auf ca.  $1,5 \text{ N/m}^2$  ab. Der Überdruck im Brandraum gegenüber der Umgebung  $P_7 - P_{\infty}$  beträgt in dieser Versuchsphase ca.  $6 \text{ N/m}^2$ . Der Differenzdruck  $P_9 - P_7$  an der Tür 22 liegt bei  $1 \text{ N/m}^2$ . Der Druck in der Halle (P 3) und

im Treppenraum (P 16) liegt um ca.  $5,5 \text{ N/m}^2$  bzw.  $6,5 \text{ N/m}^2$  über dem Umgebungsdruck  $P_\infty$ .

5. Versuchsphase:

Zeit 5,6 min bis 8,3 min

Die Türen 21, 22, 01 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Mit dem Öffnen der Tür 01 steigen die Drücke an den Meßstellen P 7 und P 16 gegenüber der Umgebung an. Der Druck im Brandraum liegt ca.  $9 \text{ N/m}^2$  über dem Druck der Umgebung. An den Türen 22 und 21 wird eine Druckdifferenz im oberen Teil von  $1 \text{ N/m}^2$  bis  $2 \text{ N/m}^2$  gemessen. Der Überdruck an der Meßstelle P 16 gegenüber der Umgebung steigt von ca.  $6 \text{ N/m}^2$  auf etwa  $12 \text{ N/m}^2$  an. Ein ähnlicher Druckanstieg wird auch in der Halle (P 3) gemessen.

6. Versuchsphase:

Zeit 8,3 min bis 10,5 min

Die Türen 21, 22, 01, 02 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Beim Öffnen der Tür 01 (Eingangstür im Erdgeschoß) sinken die Druckdifferenzen  $P 7 - P_\infty$ ,  $P 3 - P_\infty$  und  $P 16 - P_\infty$  auf ca.  $0 \text{ N/m}^2$  ab. Die Druckdifferenzen  $P 9 - P 7$  und  $P 16 - P 11$  an den Türen 22 und 21 fallen ebenfalls auf den Wert 0 ab. Während im ganzen weiteren Versuchsablauf diese Druckdifferenzen an den Türen etwa  $0 \text{ N/m}^2$  betragen, steigen die Druckdifferenzen  $P 7 - P_\infty$ ,  $P 3 - P_\infty$  und  $P 16 - P_\infty$  in dieser Versuchsphase

wieder auf einen Wert von ca.  $2 \text{ N/m}^2$  an. Im weiteren Verlauf ergeben sich für diese Druckdifferenzen Werte von maximal  $5 \text{ N/m}^2$  bzw.  $4 \text{ N/m}^2$ .

Das Öffnen weiterer Türen nach 10,5 min und nach 12,7 min führt zu keinen meßbaren Veränderungen bei den Druckdifferenzen.

Der Druck im Entlüftungsschacht (P 15) sowie der Druck im Brandraum (P 7) lagen bei diesem Versuch ab einer Versuchszeit von ca. 4 min. bzw. 3,6 min stets über dem Druck der Umgebung.

Im Vergleich zum Brandversuch können bei diesem Versuch die Temperaturerhöhungen mit Ausnahme der in den Entlüftungsschächten auftretenden Temperaturerhöhungen, die eine Kaminwirkung verursacht, vernachlässigt werden.

## 6.2. Brandversuch

Für den Brandversuch wird der zeitliche Temperaturverlauf durch die Bilder 15, 16 und 17 wiedergegeben. Die für die Rauchausbreitung wichtigen Druckdifferenzen ergeben sich aus den Bildern 18 und 19.

1. Versuchsphase: Zeit 0 min bis 2,1 min  
Alle Türen sind geschlossen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Normalbetrieb geschaltet.

Bis zum Ende der 1. Versuchsphase steigen die Temperaturen an den Meßstellen T 13 und T 14 auf  $50^\circ \text{C}$  bzw.  $30^\circ \text{C}$  an. Die Temperatur über der Mitte der Brandlast (Meßstelle T 1) erreicht  $110^\circ \text{C}$ . Die Druckdifferenz P 9 - P 7 an der

Tür 22 beträgt ca.  $20 \text{ N/m}^2$  und die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 ca.  $8 \text{ N/m}^2$ . Der Druck in der Halle ( $P_3$ ) liegt um ca.  $43 \text{ N/m}^2$  und im Treppenraum ( $P_{16}$ ) um ca.  $52 \text{ N/m}^2$  über dem Druck  $P_\infty$  der Umgebung.

2. Versuchsphase:

Zeit 2,1 min bis 5,6 min

Alle Türen sind geschlossen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Aufgrund des Verlaufes der Temperatur an der Meßstelle T 5 ergibt sich zusammen mit der Druckmessung, daß durch den Entlüftungsschacht I (siehe Bild 4) sofort nach dem Öffnen der Abluftklappen Rauchgase abziehen. Durch den Entlüftungsschacht II strömt während der ganzen Versuchsphase 2 kalte Umgebungsluft in den Brandraum, wie der Verlauf der Temperatur an den Meßstellen T 6 und T 14 erkennen läßt.

Da die Meßstelle P 15 im Entlüftungsschacht II angeordnet war, entspricht die in Bild 19 eingezeichnete Druckdifferenz  $P_{15} - P_\infty$  in dieser Versuchsphase den Verhältnissen im Entlüftungsschacht II, die durch den in den Brandraum einströmenden Frischluftvolumenstrom entstehen. Da die Luft in den Brandraum gesaugt wird, liegt die Druckdifferenz  $P_{15} - P_\infty$  über dem Wert von  $P_7 - P_\infty$ . Die Druckdifferenz  $P_7 - P_{15}$  entspricht dem Strömungswiderstand in der Abluftöffnung.

Die Druckdifferenz an der Tür 22 ist nach dem Umschalten des Druckbelüftungs-

systems, auf Notbetrieb auf ca.  $90 \text{ N/m}^2$  angestiegen. Die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 beträgt ca.  $6,5 \text{ N/m}^2$ . Der Druck im Brandraum an der Meßstelle  $P_7$  liegt während dieser Versuchsperiode im Mittel um ca.  $15 \text{ N/m}^2$  unter dem Umgebungsdruck. Die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{\infty}$  zwischen Treppenraum und Umgebung beträgt in dieser Versuchsphase ca.  $84 \text{ N/m}^2$ , und die Druckdifferenz  $P_3 - P_{\infty}$  zwischen Halle und Umgebung ca.  $78 \text{ N/m}^2$ .

3. Versuchsphase: Zeit 5,6 min bis 7,2 min.

Die Tür 22 steht offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Mit dem Öffnen der Tür 22 fällt die Druckdifferenz  $P_9 - P_7$  zwischen Halle und Brandraum auf ca.  $0 \text{ N/m}^2$  ab. Da dadurch auch der Druck in der Halle absinkt, steigt die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  an der Tür 21 auf max.  $96 \text{ N/m}^2$  an. Da beim Öffnen der Tür 22 plötzlich ein großes Luftvolumen in den Brandraum strömt, steigt die Druckdifferenz  $P_7 - P_{\infty}$  im Brandraum von  $-23,5 \text{ N/m}^2$  auf  $-3,5 \text{ N/m}^2$  an. Durch diesen Druckanstieg kehrt sich die Strömungsrichtung im Entlüftungschacht II um, sodaß jetzt über beide Schächte Rauchgas abgeführt wird. Mit dem Anstieg der Temperatur in den Entlüftungschächten, Meßstellen T 5, T 6 sowie an der Meßstelle T 14, infolge der zunehmenden Brandraumtemperatur (Meßstellen T 1, T 13) verstärkt sich auch die Kaminwirkung in den Entlüftungschächten, was zu großen Druckdifferen-

zen  $P_{15} - P_{\infty}$  zwischen Entlüftungsschacht und Umgebung führt.

Aufgrund des Temperaturverlaufes an den Meßstellen T 7, T 8, T 9 und T 10 ergibt sich, daß durch den unteren Teil der Türöffnung Luft aus der Halle in den Brandraum und durch den oberen Teil der Türöffnung heißes Rauchgas aus dem Brandraum in die Halle strömt. Dies führt zu der beobachteten Verqualmung der Halle (Bilder 13.3 bis 13.6). Der Brandraum ist in dieser Versuchsphase völlig verqualmt. Die Temperaturen haben bis zu der Versuchszeit von ca. 7 min ihr erstes Maximum erreicht und fallen danach wieder ab.

Der Druck in der Halle (P 3) ist bei einer Versuchszeit von 7 min auf seinen niedrigsten Wert von  $43 \text{ N/m}^2$  unter dem der Umgebung. Der Druck im Treppenraum (P 16) liegt um ca.  $50 \text{ N/m}^2$  über dem Druck der Umgebung.

#### 4. Versuchsphase:

Zeit 7,2 min bis 8,9 min

Die Türen 22 und 21 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Mit dem Öffnen der Tür 21 fällt die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  auf ca.  $5 \text{ N/m}^2$  ab. Die Druckdifferenz  $P_{10} - P_8$  unten an der Tür 22 beträgt in dieser Versuchsphase ca.  $1,5 \text{ N/m}^2$ . In der Halle steigt der Druck (P 3) etwa auf den Wert im Treppenraum an, der an der Meßstelle P 16 bei ca.  $16 \text{ N/m}^2$  über dem Umgebungsdruck liegt. Im Brandraum herrscht ein Unterdruck von  $20 \text{ N/m}^2$  gegenüber dem Umgebungsdruck.

Nach einer Versuchszeit von ca. 8 min hat sich die Strömungsrichtung der Rauchgase im oberen Teil der Türöffnung 22 umgekehrt, d.h. es strömt Luft von da ab auch durch den oberen Teil der Türöffnung von der Halle in den Brandraum. Die Verqualmung der Halle geht daraufhin schnell zurück. Die Temperaturen im Brandraum fallen weiter ab, was auch zu einem leichten Rückgang des Unterdruckes im Entlüftungsschacht II führt.

5. Versuchsphase: Zeit 8,9 min bis 12,3 min  
Die Türen 22, 21 und 01 stehen offen.  
Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Mit dem Öffnen der Tür 01 strömt Luft aus der Halle im Erdgeschoß in den Treppenraum, wodurch die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{\infty}$  zwischen Treppenraum und Umgebung in Höhe des Brandgeschosses von ca.  $-16 \text{ N/m}^2$  auf ca.  $-3 \text{ N/m}^2$  und die Druckdifferenz  $P_7 - P_{\infty}$  zwischen Brandraum und Umgebung von  $-22 \text{ N/m}^2$  auf ca.  $-8 \text{ N/m}^2$  ansteigt. Die Druckdifferenz  $P_3 - P_{\infty}$  zwischen Halle und Umgebung ist ebenfalls von  $-19 \text{ N/m}^2$  auf ca.  $-5 \text{ N/m}^2$  an.

Die Zunahme der durch die Türöffnungen 22 und 21 strömenden Luftmengen nach dem Öffnen der Tür 01 zeigt sich auch im Verlauf der in Bild 21 über der Zeit aufgetragenen Strömungsgeschwindigkeiten in diesen Türöffnungen.

Die Temperaturen im Brandraum fallen bis zu einer Versuchszeit von ca. 11 min ab und steigen danach wieder an. Dieser Temperaturverlauf spiegelt sich auch im Verlauf der Druckdifferenz  $P_{15} - P_{\infty}$  wieder.

**6. Versuchsphase:**

Zeit 12,3 min bis 15,1 min  
Die Türen 22, 21, 01 und 02 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

Nach dem Öffnen der Tür 02 (Eingangstür im Erdgeschoß) steigt die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{\infty}$  zwischen Treppenraum und Umgebung in Höhe des Brandgeschosses auf ca.  $+ 1 \text{ N/m}^2$  und die Druckdifferenz  $P_3 - P_{\infty}$  zwischen Halle und Umgebung auf ca.  $- 3 \text{ N/m}^2$  an. Damit steigt auch die Druckdifferenz  $P_7 - P_{\infty}$  zwischen Brandraum und Umgebung auf ca.  $- 4 \text{ N/m}^2$  an. Wie der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten in den Türöffnungen 22 und 21 sowie der Druckdifferenzen  $P_9 - P_7$ ,  $P_{10} - P_8$ ,  $P_{16} - P_{11}$  und  $P_{17} - P_{12}$  zeigt, haben sich die Luftvolumenströme vom Treppenraum in die Halle sowie von der Halle in den Brandraum erhöht.

Nach einer Versuchszeit von ca. 14 min beginnt ein steiler Anstieg der Temperaturen im Brandraum. Mit dem Beginn dieses Temperaturanstieges setzt eine Rauchgasströmung durch den oberen Teil der Türöffnung 22 vom Brandraum in die Halle ein. Dieser Rauchgasstrom führt zu einer erneuten Verqualmung der Halle (siehe Bild 20). Neben dem Verlauf der optischen Rauchdichte an der Meßstrecke RD 1 wird dieses Einströmen von Brand-

gasen in die Halle auch durch den plötzlichen Anstieg der Temperatur T 9 angezeigt.

**7. Versuchsphase:** Zeit 15,1 min bis 18,4 min  
Die Türen 22, 21, 01, 02, 12 und 32 stehen offen. Das Druckbelüftungssystem ist auf Notbetrieb geschaltet.

In dieser Versuchsphase werden die höchsten Temperaturen an allen Meßstellen mit Ausnahme von T 8 und T 9 registriert. In dieser Zeitspanne ergibt sich für die Druckdifferenz  $P_7 - P_\infty$  der höchste während des Versuchs erreichte Wert mit ca.  $6,5 \text{ N/m}^2$ , während die Druckdifferenz  $P_9 - P_7$  mit ca.  $-6 \text{ N/m}^2$  eine Strömung der Rauchgase vom Brandraum in die Halle anzeigt. Dadurch ergibt sich für die Halle eine weitere Verqualmung. Sehr deutlich wird dieser Strömungsvorgang neben dem Verlauf der optischen Rauchdichte in der Halle (siehe Bild 20) durch den Temperaturverlauf an der Meßstelle T 9 angezeigt. Nach einer Versuchszeit von 17,7 min strömt auch durch den oberen Teil der Türöffnung 22 wieder Luft von der Halle in den Brandraum, wie der Abfall der Temperatur an der Meßstelle T 9 zeigt, wodurch die Verqualmung der Halle zurückgeht. Nach einer Versuchszeit von 10 min bleibt die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{11}$  zwischen Treppenraum und Halle mit durchschnittlich ca.  $+6 \text{ N/m}^2$  im wesentlichen unverändert. Während dieser Versuchsphase liegt der Druck im Treppenraum ( $P_{16}$ ) sowie der Druck in der Halle um ca.  $1 \text{ N/m}^2$  über bzw. um ca.

4 N/m<sup>2</sup>, unter dem Druck der Umgebung.

Eine direkte Beeinflussung der Strömungs- und Druckverhältnisse innerhalb der Türöffnung 22 durch das Öffnen der Türen 12 und 32 kann nicht festgestellt werden, da das Einströmen der Brandgase in die Halle durch den oberen Teil der Türöffnung 22 schon vor dem Öffnen der Türen 12 und 32 begonnen hat (siehe Verlauf der Temperatur an der Meßstelle T 9). Die Veränderungen der Druckdifferenzen und der Strömung wurden durch die Änderung der Kaminwirkung der Schächte sowie durch die Volumenänderung der abzuführenden Rauchgase infolge des Temperaturanstieges im Brandraum hervorgerufen.

8. Versuchsphase:

Zeit 18,4 min bis Versuchsende.  
In dieser Zeit ist eine Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten und der Druckdifferenzen mit Ausnahme von  $P_{16} - P_{\infty}$  durch das Öffnen oder Schließen von Türen nicht eindeutig festzustellen. Die Temperaturen im Brandraum bleiben bis zu einer Versuchszeit von ca. 28 min konstant und fallen danach langsam ab. Die Druckdifferenz  $P_{15} - P_{\infty}$  zwischen Entlüftungsschacht und Umgebung hat mit ca.  $- 55 \text{ N/m}^2$  bei einer Versuchszeit von 18,8 min den niedrigsten Wert erreicht. Nach einer Versuchszeit von 32 min steigt diese Druckdifferenz wieder an. Beim Schließen der Türen 01 und 02 nach einer Versuchszeit von ca. 22 min ergibt sich keine eindeutige Änderung der Druckverhältnisse, da z.B. die

Druckdifferenzen  $P_9 - P_7$  und  $P_{11} - P_{\infty}$  schon vor dem Öffnen dieser Türen abfielen. Zweifelsfrei wird jedoch durch das Schließen der Türen 01 und 02 der Druck im Treppenraum ( $P_{16}$ ) verringert. Die Druckdifferenz  $P_{16} - P_{\infty}$  sinkt auf  $-6 \text{ N/m}^2$  ab.

Beim Öffnen der Türen 41 und 51 nach einer Versuchszeit von 24 min ist ein Anstieg der Druckdifferenzen  $P_7 - P_{\infty}$ ,  $P_{15} - P_{\infty}$ ,  $P_{16} - P_{\infty}$  und  $P_3 - P_{\infty}$  zu verzeichnen, was zu einer Verringerung der optischen Rauchdichte in der Halle und zu einem Absinken der Temperatur an der Meßstelle T 9 führt. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Türöffnungen 21 und 22 steigen nach einer Versuchszeit von 23 min bis 25 min wieder an. Da die Strömungsgeschwindigkeiten nur in großen Zeitintervallen ermittelt wurden, ergeben sich keine genauen Zuordnungen zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Öffnen bzw. Schließen der Türen. Nach etwa einer Versuchszeit von 20 min bis zum Versuchsende ist eine geringe optische Rauchdichte in der Halle vorhanden. Da die Meßstellen T 9 und T 7 etwa 20 cm unter der oberen Türkante angeordnet sind, ist eine Rauchgasströmung vom Brandraum in die Halle möglich, obwohl dies nicht von den zuvor genannten Meßstellen angezeigt wird.

### 6.3. Beurteilung der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems

Die Beurteilung der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems zur Verhinderung des Raucheintritts in die Halle und in den Treppenraum kann nur im Zusammenhang mit dem Brandverlauf

und der Größe der dabei auftretenden Rauchgasvolumenströme beurteilt werden. Die Wirksamkeit des hier eingebauten Druckbelüftungssystems wird durch die Absaugleistung der beiden Entlüftungsschächte bestimmt.

### 6.3.1 Bei dem Brandversuch entstehender Rauchgasvolumenstrom

Durch Vorversuche mit einer der hier verwendeten Brandlastpaletten in einem Versuchsraum der Forschungsstelle wurde festgestellt, daß die durch die Oberfläche des brennenden Materials der Palette bestimmte Abbrandgeschwindigkeit 6,4 kg/min beträgt. Dieser Wert wurde bei den Versuchen nach ca. 14 min erreicht. Die mittlere Temperatur unter der Decke des Brandraumes betrug hierbei 740° C. Da die Brandlast überwiegend aus Holz besteht, kann für die Abschätzung des Rauchgasvolumens von dem Rauchgasvolumen für Holz ausgegangen werden. Nach Netz [2] beträgt das theoretische, feuchte Rauchgasvolumen für Holz 4,31 m<sup>3</sup>/kg bei 0° C und 1,0133 bar (im folgenden als Normzustand bezeichnet). Aufgrund des bei dem Brandversuch im Brandraum gemessenen hohen CO<sub>2</sub>- Gehaltes kann davon ausgegangen werden, daß die Verbrennung mit einer Luftzahl  $\lambda \approx 1$  erfolgte. Der Rauchgasvolumenstrom im Normzustand betrug also in der Phase des Versuches, in der nur eine Palette brannte, ca. 28 m<sup>3</sup>/min bzw. bei zwei brennenden Paletten ca. 56 m<sup>3</sup>/min.

Wie die Beobachtungen ergaben und die Bilder 14 zeigen, hat in der Versuchszeit von ca. der 11. Minute bis zur 14. Minute die entzündete Palette allein voll gebrannt. Von der 14. Minute bis ca. zur 25. Minute kann davon ausgegangen werden, daß beide Paletten voll brannten. Für die obengenannte Abbrandgeschwindigkeit von 6,4 kg/min sind folgende Frischluftvolumenströme erforderlich. Nach Netz [2] beträgt die theoretische Luftmenge für Holz 3,6 m<sup>3</sup>/kg im Normzustand. Daraus ergibt sich unter der Annahme einer Verbrennung mit einer Luftzahl  $\lambda \approx 1$  für den Abbrand einer Palette ein Luftvolumenstrom im Normzustand von 23 m<sup>3</sup>/min oder 0,38 m<sup>3</sup>/s bzw. von 46 m<sup>3</sup>/min oder 0,76 m<sup>3</sup>/s.

### 6.3.2 Luftvolumenströme durch die Türöffnungen 22 und 21

Die Luftvolumenströme durch die Tür 21 (Treppenraum/Halle) wurden mit Prandtlrohren über die Strömungsgeschwindigkeiten  $C_3$  und  $C_4$  in der Türöffnung ermittelt. Die untere Meßstelle war 20 cm und die obere Meßstelle 180 cm über dem Boden angeordnet. Die Strömungsgeschwindigkeiten  $C_3$  und  $C_4$  sind im Bild 21 über der Versuchszeit aufgetragen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten  $C_1$  und  $C_2$  durch die Öffnung der Tür 22 (Halle/Brandraum) sind mit einer den Prandtlrohren entsprechenden Meßanordnung ermittelt worden. Die Anordnung der Meßstellen entspricht denen an der Tür 21. Die Strömungsgeschwindigkeiten  $C_1$  und  $C_2$  sind ebenfalls in Bild 21 aufgetragen.

Die Druckverhältnisse an der Tür zwischen Brandraum und Halle ergeben sich aufgrund der Temperaturverhältnisse in beiden Räumen. Ist die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Halle an einer Stelle der Tür bekannt, so können aufgrund der herrschenden Temperaturdifferenzen die Differenzdrücke an anderen Stellen der Tür berechnet werden. Bei der folgenden Berechnung wird davon ausgegangen, daß zu einer bestimmten Zeit die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Halle im oberen Teil der Türöffnung 0 beträgt. Nach einer Versuchszeit von 14,5 min ergab sich aufgrund der Temperaturmessungen im Bereich der Tür 22 eine mittlere Temperatur im Brandraum von  $250^{\circ}$  C. Damit erhält man nach [3] an der Unterkante der Tür 22 eine Druckdifferenz von  $11,5 \text{ N/m}^2$  und in Höhe der Meßstelle für  $C_2$ , die ca. 20 cm über dem Boden liegt, eine Druckdifferenz von  $10,3 \text{ N/m}^2$ , was zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 4,0 m/s führt. Die bei dem Versuch ermittelte Strömungsgeschwindigkeit  $C_2$  betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 3,9 m/s. Wie der Vergleich zeigt, stimmt die berechnete Strömungsgeschwindigkeit gut mit der beim Versuch ermittelten Strömungsgeschwindigkeit überein.

Aufgrund der beim Versuch ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten in den Türöffnungen 22 und 21 ergibt sich unter Berücksichtigung der Druckverhältnisse zwischen Räumen mit unterschiedlichen Temperaturen die in der Tabelle 1 berechneten Volumenströme durch diese Türöffnungen. Bei der Berechnung wurde mit dem Faktor 0,8 das Verhältnis der beim Versuch ermittelten Geschwindigkeiten zu den mittleren Geschwindigkeiten über die gesamte Türquerschnittsfläche berücksichtigt.

Tabelle 1

Berechnete Volumenströme durch die Türöffnungen 22 und 21

| Zeit min  | Versuchsphase | Volumenströme           |   |
|-----------|---------------|-------------------------|---|
|           |               | 22<br>m <sup>3</sup> /s | durch Türöffnung<br>21<br>m <sup>3</sup> /s |
| 5,6- 7,2  | 3             | 2,3                     | -   |
| 7,2- 8,9  | 4             | 2,9                     | 1,6   |
| 8,9-12,3  | 5             | 5,1                     | 2,0   |
| 12,3-18,4 | 6+7           | 4,4                     | 2,8   |
| 18,4-21,7 | 8             | 4,4                     | 2,6   |
| 21,7-24,0 |               | 4,0                     | 2,0   |
| 24,0-27,5 |               | 4,4                     | 2,0   |
| 27,5-30,5 |               | 4,6                     | 2,2   |
| 30,5-35,0 |               | 4,1                     | 2,2   |
| 35,0-39,0 |               | 3,2                     | 2,7   |

Die bei dem Versuch ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten und Volumenströme von der Halle in den Brandraum reichten nicht aus, um während der gesamten Versuchsdauer an der Oberkante der Türöffnung 22 einen Rauchaustritt vom Brandraum in die Halle zu verhindern. Infolge der unterschiedlichen Druckveränderung in Abhängigkeit von der Höhe im Brandraum und in der Halle stellt sich ab etwa der 15. Versuchsminute die Druckdifferenz P 9 - P 7 an der Tür 22 so ein, daß durch den oberen Teil der Türöffnung Rauchgase aus dem Brandraum in die Halle strömen können. Durch diese

Strömung der Rauchgase erwärmte sich die Luft in der Halle jedoch nur so wenig, daß dadurch eine wesentliche Beeinflussung der Luftströmung vom Treppenraum in die Halle nicht eintrat.

## 7. FOLGERUNGEN AUS DEN VERSUCHSERGEBNISSEN

Abgesehen von dem ersten Rauchgaseinbruch in die Halle beim Öffnen der Tür sind ab einer Versuchszeit von ca. 14,5 min an bis etwa zum Versuchsende geringe Rauchgas-mengen vom Brandraum in die Halle eingedrungen. Dieser Rauchgasvolumenstrom war jedoch so gering, daß in der Halle keine Sichtbehinderung auftrat und der Treppenraum während des ganzen Versuches vollkommen rauchfrei blieb. Für das Druckbelüftungssystem müssen die ab der 15. Minute vor-liegenden Verhältnisse als Grenzbereich der Wirksamkeit dieses Druckbelüftungssystemes angesehen werden.

### 7.1 Bedingungen, die die Wirksamkeit des Druckbelüftungs-systemes verringern

Die Wirksamkeit des Druckbelüftungssystemes beruht darauf, daß durch geöffnete Türen so viel Luft in den Brandraum einströmt, daß ein Ausströmen von Rauchgasen in die angren-zenden Räume verhindert wird. Durch die unterschiedlichen Temperaturen vor und hinter der Tür zwischen Brandraum und Halle ergibt sich eine unterschiedliche Luftdruckabnahme in Abhängigkeit von der Höhe [3]. Die Strömungsverhältnisse in einer Türöffnung werden durch die unterschiedlichen Druckdifferenzen in den verschiedenen Höhen zwischen bei-den Räumen bestimmt. Um eine Rauchgasströmung vom Brand-raum in die Halle zu verhindern, muß der Luftvolumenstrom von der Halle in den Brandraum so groß sein, daß durch seinen Strömungswiderstand an der obersten Stelle der Tür kein niedriger Druck als im Brandraum auftritt. Das be-deutet, daß die Druckdifferenz in Höhe der Oberkante der Tür, hier bei einer Höhe von 2 m, den Wert 0 nicht unter-

schreitet. Bei dem Versuch, betrug die mittlere Temperatur im Brandraum im Bereich vor der Tür ca.  $250^{\circ}\text{C}$ . Dieser Wert ergibt sich aufgrund von Abschätzungen der Temperaturen an den Meßstellen T 2 und T 13 bei einer Versuchszeit von 14,5 min. Da zu dieser Zeit die Rauchgasströmung vom Brandraum in die Halle einsetzte, kann dies als Grenzfall angenommen werden, für den die Druckdifferenz im oberen Bereich der Tür gerade 0 ist. Bei einer Temperatur von  $250^{\circ}\text{C}$  auf der Brandraumseite der Tür und einer Temperatur von  $9^{\circ}\text{C}$  in der Halle ergibt sich für den Fall, daß die Druckdifferenz an der oberen Türkante 0 ist, am Boden eine Druckdifferenz von  $11,32\text{ N/m}^2$ . Der Verlauf dieser Druckdifferenz in Abhängigkeit von der Höhe ist in Bild 22 für verschiedene Temperaturen auf der Brandraumseite der Tür 22 aufgetragen. Bild 23 zeigt die aus diesen Druckdifferenzen resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten der durch die Türöffnung aus der Halle in den Brandraum strömenden Frischluft in Abhängigkeit von der Höhe. Die unter der Geschwindigkeitskurve liegende Fläche ist jeweils dem Frischluftvolumenstrom proportional.

Steigt die Brandraumtemperatur an, so nimmt damit auch die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Halle und die sich daraus ergebende Strömungsgeschwindigkeit zu. Bleibt der Frischluftvolumenstrom aus der Halle in den Brandraum konstant, so erhält man die in den Bildern 22 und 23 dargestellten unterschiedlichen Druck- bzw. Geschwindigkeitsverläufe entsprechend den Brandraumtemperaturen von  $250^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  und  $600^{\circ}\text{C}$ . Die Lage der Stelle, an der die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Halle 0 ist, verschiebt sich nach unten. Zwischen dieser Stelle und der Oberkante der Tür strömen jetzt, infolge der sich umkehrenden Druckdifferenz, Rauchgase aus dem Brandraum in die Halle.

Daraus folgt, daß die Wirksamkeit des Druckbelüftungssystemes herabgesetzt bzw. aufgehoben wird, wenn entweder der aus der Halle in den Brandraum eintretende Luftvolumenstrom ver-

ringert wird oder die Temperatur im Brandraum ansteigt.

Höhere Brandraumtemperaturen als die bei diesem Brandversuch gemessenen Werte treten aber auf, sobald Brandlasten mit größerer Oberfläche als die bei diesem Versuch verwendeten Brandlastpaletten vorliegen. Dies ist der Fall, wenn eine normale Büroeinrichtung vorhanden ist.

Vergleicht man die beim Brandversuch ermittelten Luftvolumenströme durch die geöffneten Türen 21 und 22 (siehe Tabelle 1) mit den Volumenströmen in Tabelle 2, die aus den Geschwindigkeitsmessungen nach Abschnitt 5.3 berechnet wurden, so ergeben sich sehr große Differenzen.

Tabelle 2

Luftvolumenströme durch die Türöffnungen 21 und 22 aufgrund von Geschwindigkeitsmessungen nach Abschnitt 5.3

|                                | Luftvolumenstrom durch             |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                                | Türöffnung 22<br>m <sup>3</sup> /s | Türöffnung 21<br>m <sup>3</sup> /s |
| Tür 22 offen                   | 0,83                               | -                                  |
| Tür 22 und 21 offen            | 1,02                               | 0,70                               |
| Tür 22, 21,<br>01 und 02 offen | 0,56                               | -0,13                              |

Die wesentlich größeren Luftvolumenströme, die beim Brandversuch ermittelt wurden, sind auf den Unterdruck im Brandraum gegenüber der Umgebung zurückzuführen. Herrscht im Brandraum der gleiche Druck wie in der Umgebung, so strömt nur ca 1/4 des Luftvolumens durch die Türöffnung 22. Dieser geringe Luftvolumenstrom ruft in der Türöffnung einen sehr geringen Strömungswiderstand hervor, sodaß schon bei niedrigen Brandraumtemperaturen Rauchgase in die Halle ausströmen werden. Die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Umgebung bestimmt daher die Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems, den Eintritt von Rauchgasen in die Rettungswege zu verhindern.

Die Druckverhältnisse im Brandraum werden durch die Kaminwirkung der beiden Entlüftungsschächte festgelegt. Bei einem Brandversuch sind bei der Versuchszeit von 14,5 min unter den zu diesem Zeitpunkt herrschenden Bedingungen die Rauchgase durch die beiden Entlüftungsschächte gerade noch vollständig abgeführt worden. Dabei hat sich im Brandraum ein Unterdruck eingestellt, durch den zusätzlich Luft aus dem Treppenraum in die Halle und dann in den Brandraum einströmte. Wird eine Geschoßfläche in 2 Büroräume unterteilt, so steht bei einem Brand in einem der beiden Büroräume nur 1 Entlüftungsschacht zur Verfügung.

Ist nur ein Entlüftungsschacht vorhanden, so kann sich unter den gleichen Bedingungen wie beim vorliegenden Brandversuch im Brandraum kein oder nur ein wesentlich geringerer Unterdruck als bei dem Versuch einstellen. Die Folge davon ist, daß dadurch auch der Luftvolumenstrom durch die Türöffnung 22 verringert wird. Dadurch strömt schon bei Temperaturen unterhalb von  $250^{\circ}$  C im Brandraum im Bereich vor der Tür Rauchgase vom Brandraum in die Halle. Es muß bei geöffneten Türen 01, 02 und 21 und 22 weiter davon ausgegangen werden, daß die in die Halle eingeblasene Luft z.T. in den Treppenraum strömt, wie die Werte aus Tabelle 2 zeigen.

Zieht man die Möglichkeit in Betracht, daß bei einem Brand die Fenster zerstört werden, so ist der Druck im Brandraum unabhängig von der Förderleistung der Entlüftungsschächte, da die Querschnittsflächen der Fensteröffnungen wesentlich größer als die der Tür 22 sind. Der Druck im Brandraum stellt sich in diesem Fall in Abhängigkeit von den mit der Umgebung durch das Fenster ausgetauschten Frischluft- und Rauchgasströmen ein. Die neutrale Druckzone, d.h. die Zone, in der im Brandraum und der Umgebung der gleiche Druck herrscht, wird in einer Höhe von etwa einem Drittel der Fensterhöhe liegen. Damit ergeben sich im Brandraum und in der Halle Druckverhältnisse, wie sie bei den Messungen nach Abschnitt 5.3 vorlagen. Die bei diesen Druckverhältnissen auftretenden Volumenströme, die vom Druckbelüftungssystem in die Halle und damit in den Brandraum

gefördert werden, liegen wesentlich unter den bei dem Brandversuch ermittelten Werten (siehe Tabelle 2).

Die Werte der Tabelle 2 zeigen, daß bei offen stehenden Türen 01, 02, 21 und 22 Luft aus der Halle in den Treppenraum strömt. Dieser Fall tritt immer dann ein, wenn im Brandraum und im Treppenraum etwa der gleiche Druck herrscht. Bei geöffneten Türen 01 und 02 sowie bei zerstörten Fensterscheiben des Brandraumes steht der Treppenraum und der Brandraum etwa unter Umgebungsdruck. Bei zerstörten Fenstern ist daher immer mit einer Luftströmung von der Halle in den Treppenraum zu rechnen. Ist die Halle infolge des geringen Luftvolumenstromes von der Halle in den Brandraum verqualmt, so dringen auch die Rauchgase aus der Halle in den Treppenraum ein.

Um den Rauchaustritt aus der Halle in den Treppenraum zu unterbinden, wäre es auch hier notwendig, in Abhängigkeit der durch die Temperaturdifferenzen zwischen Halle und Treppenraum hervorgerufenen Druckdifferenzen unterschiedlich große Volumenströme vom Treppenraum in die Halle zu drücken. Dazu ist jedoch ein Überdruck im Treppenraum gegenüber der Halle erforderlich. Mit der hier installierten Druckbelüftungsanlage ist es jedoch nicht möglich, bei geöffneter Tür (01 und 02) einen meßbaren Überdruck im Treppenraum gegenüber den Umgebungsdruck zu erreichen.

Aus den durchgeführten Fallstudien folgt, daß das hier installierte Druckbelüftungssystem keinen sicheren Schutz der Halle und des Treppenraumes vor dem Eindringen von Rauch und Brandgasen gewährleistet.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

In einem achtgeschossigen Bürogebäude in Hamburg, Großer Burstah 46 - 48 sind im Rohbau des Gebäudes Versuche durchgeführt worden, um das darin installierte Druckbelüftungssystem zu testen. Das Druckbelüftungssystem ist so ausgelegt, daß im Brandfall sowohl der Druck in der Eingangshalle und in den Hallen vor den Büros als auch im gesamten Treppenraum bei geschlossenen Türen um  $55 \text{ N/m}^2$  erhöht wird, während der gesamte Büroraum im Brandgeschoß durch zwei Rauchabzugsschächte über Dach entlüftet und damit auf Atmosphärendruck gehalten wird.

Zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit und Leistungsfähigkeit des Überdrucksystems sind ein Kaltrauchversuch und ein Brandversuch durchgeführt worden. Für diese Versuche ist im 2. Obergeschoß ein  $54 \text{ m}^2$  großer Raum vom übrigen Geschoß abgetrennt worden. Der Kaltrauchversuch wurde mit Rauchpulver durchgeführt, während bei dem Brandversuch eine auf zwei Paletten verteilte Brandlast von ca. 360 kg verbrannt wurde. Die Brandlast bestand im wesentlichen aus Holzkrippen, wie sie als Prüfobjekt A1/H nach DIN 14406 verwendet werden, mit einigen wenigen Textilien und Schaumkunststoffen. Bei den Versuchen wurden an 14 Stellen die Temperatur, an 11 Stellen der Druck, an 3 Stellen die optische Rauchdichte und an 3 Stellen der  $\text{CO}$ - und  $\text{CO}_2$ -Gehalt in den Rauchgasen gemessen sowie die meteorologischen Daten bestimmt. Bei der Druckmessung sind auch Geschwindigkeitsmessungen mit Prandtlrohren durchgeführt worden, um die Strömungsgeschwindigkeiten der zugeführten Luft in den beiden Türen von der Halle zum Brandraum sowie von der Halle zum Treppenraum an jeweils 2 Stellen zu ermitteln. Der Versuchsablauf wurde von 2 Stellen aus fotografiert und von 4 Beobachtern auf Diktiergeräten festgehalten.

Der Brandversuch hat unter den hier vorliegenden Bedingungen ergeben, daß in den Treppenraum kein Rauch eingedrungen ist. Der Vorraum war während der Versuchszeiten von

5,5 min bis 7,5 min und 14,5 min bis 20 min leicht verqualmt. Nach 20 min war nur noch meßtechnisch eine geringe Rauchdichte nachzuweisen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat ergeben, daß die Grenze der Wirksamkeit des Druckbelüftungssystems ab einer Versuchszeit von 14,5 min erreicht war. Abschätzungen über das Verhalten des Druckbelüftungssystems bei größeren Brandlasten und anderen Raumaufteilungen haben ergeben, daß mit diesem Druckbelüftungssystem kein sicherer Schutz des Treppenraumes vor eindringendem Rauch im Brandfall gewährleistet ist.

Karlsruhe, den 28.1.1977

  
(Dipl.-Ing. R. John)  
Sachbearbeiter

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

11. LITERATURVERZEICHNIS ,

[1] Sanderson, R.:

Beurteilung eines Druckbelüftungssystems zur Sicherung von Fluchtwegen im Treppenhaus und in den Vorhallen des Hamburger Bürohauses "Großer Burstah 46-48"

Gutachten Der Fa. Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH vom 17.2.1975, verfaßt im Auftrag von Oedipus Ltd. Channel Islands.

[2] Netz, H.:

Dampfkessel. 5. Auflage.  
Stuttgart: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft  
1957.

[3] John, R.:

Rauchgas- und Luftströme durch Öffnungen in Brandräumen

In: 5. Internationales Brandschutz-Seminar  
Karlsruhe 22. bis 24. September 1976  
Band I Seite 39 - 61

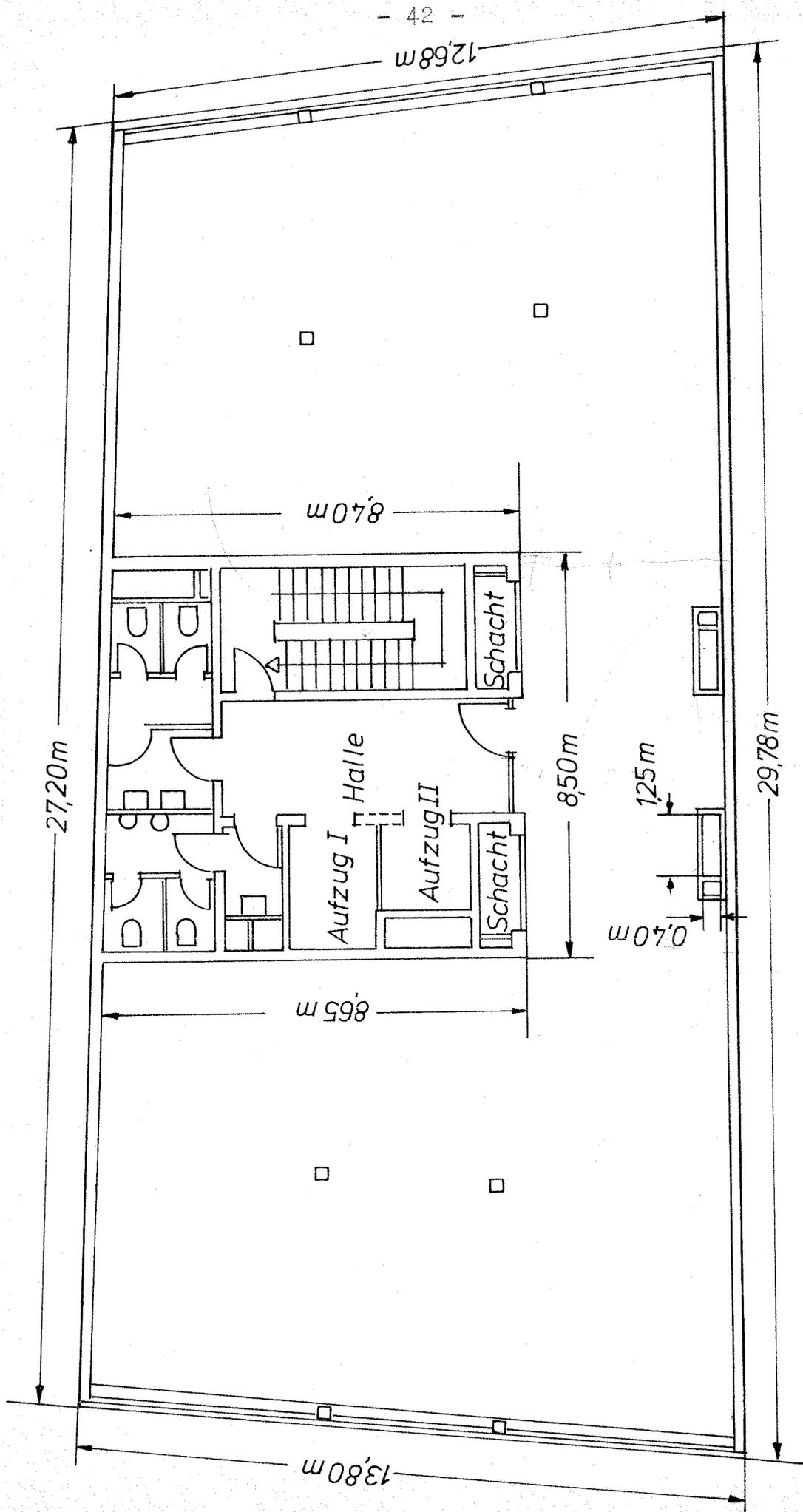


Bild 1 Grundriß eines Normalgeschosses im Gebäude Großer Burstah 46-48

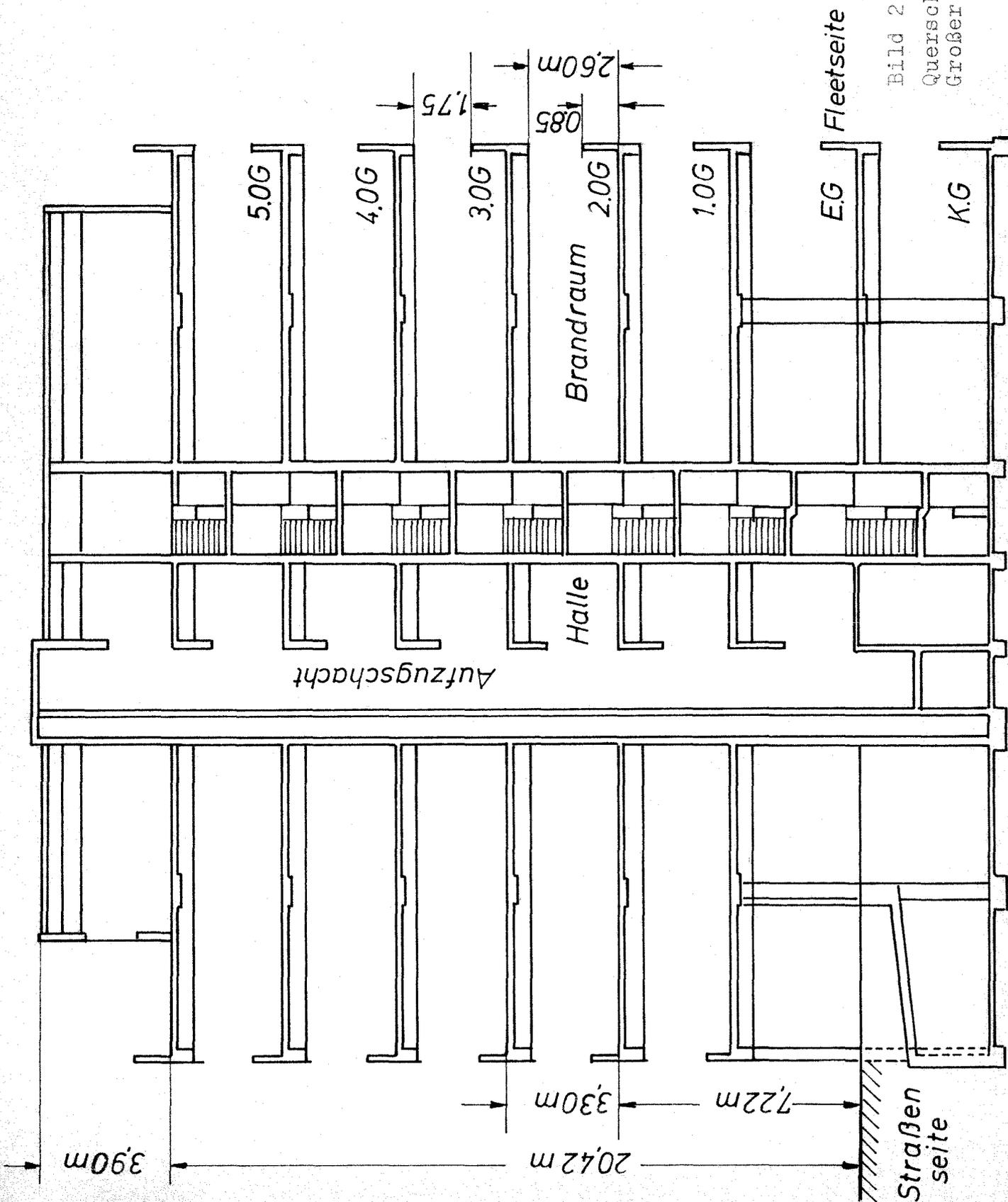


Bild 2

Querschnitt des Gebäudes  
Großer Burstah 46-48

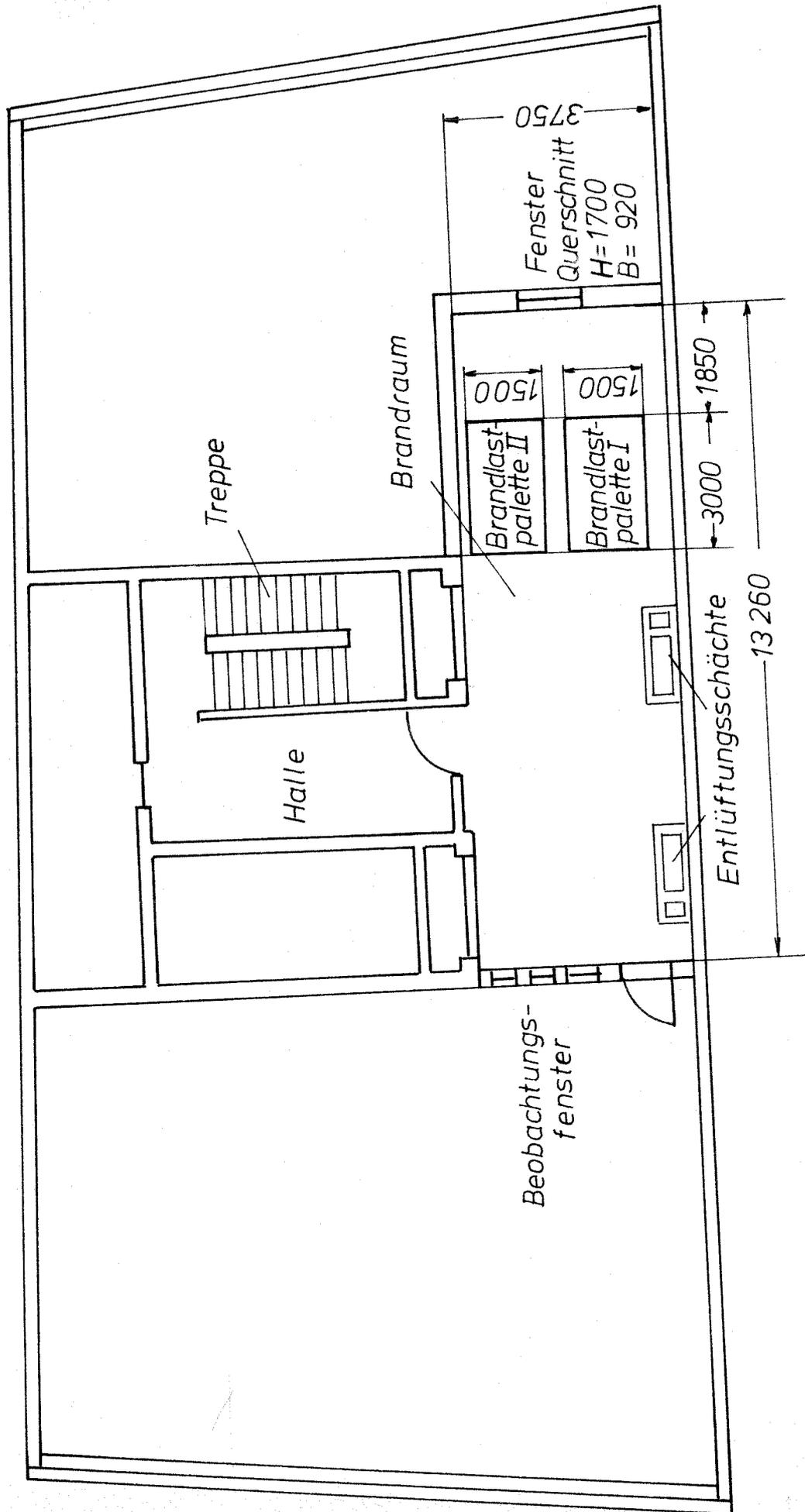


Bild 3 Anordnung und Größe des Brandraumes

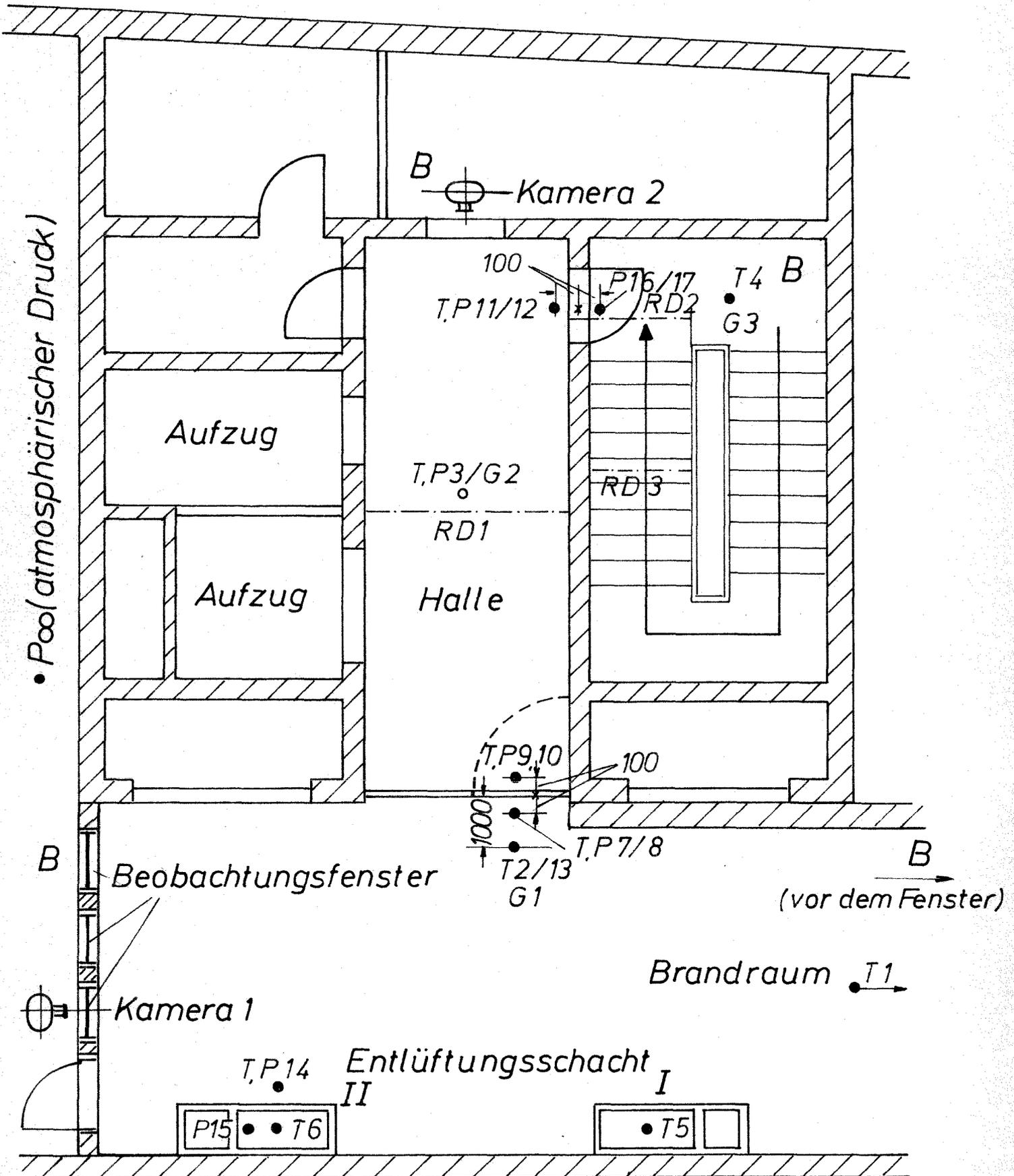


Bild 4 Lage der Meßstellen, Grundriß

- |    |  |   |                    |
|----|--|---|--------------------|
| T  | Temperaturmeßstelle                    | G | Gasentnahmestelle  |
| P  | Druckmeßstelle                         | B | Beobachterstandort |
| RD | Meßstrecke für optische<br>Rauchdichte |   |                    |

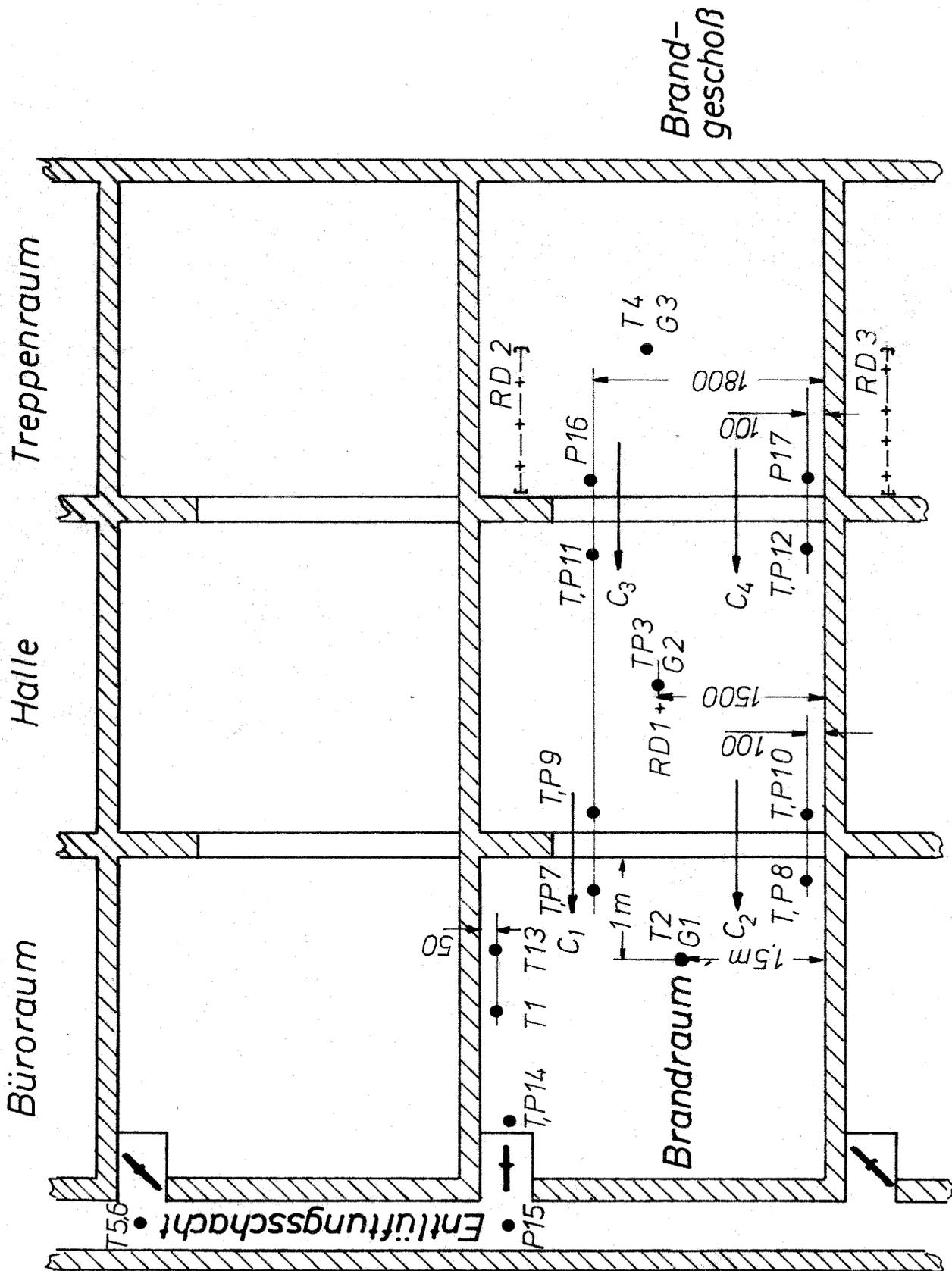


Bild 5 Lage der Messstellen, schematischer Querschnitt  
T Temperaturmeßstelle RD Meßstrecke für optische Rauchdichte  
P Druckmeßstelle G Gasentnahmestelle

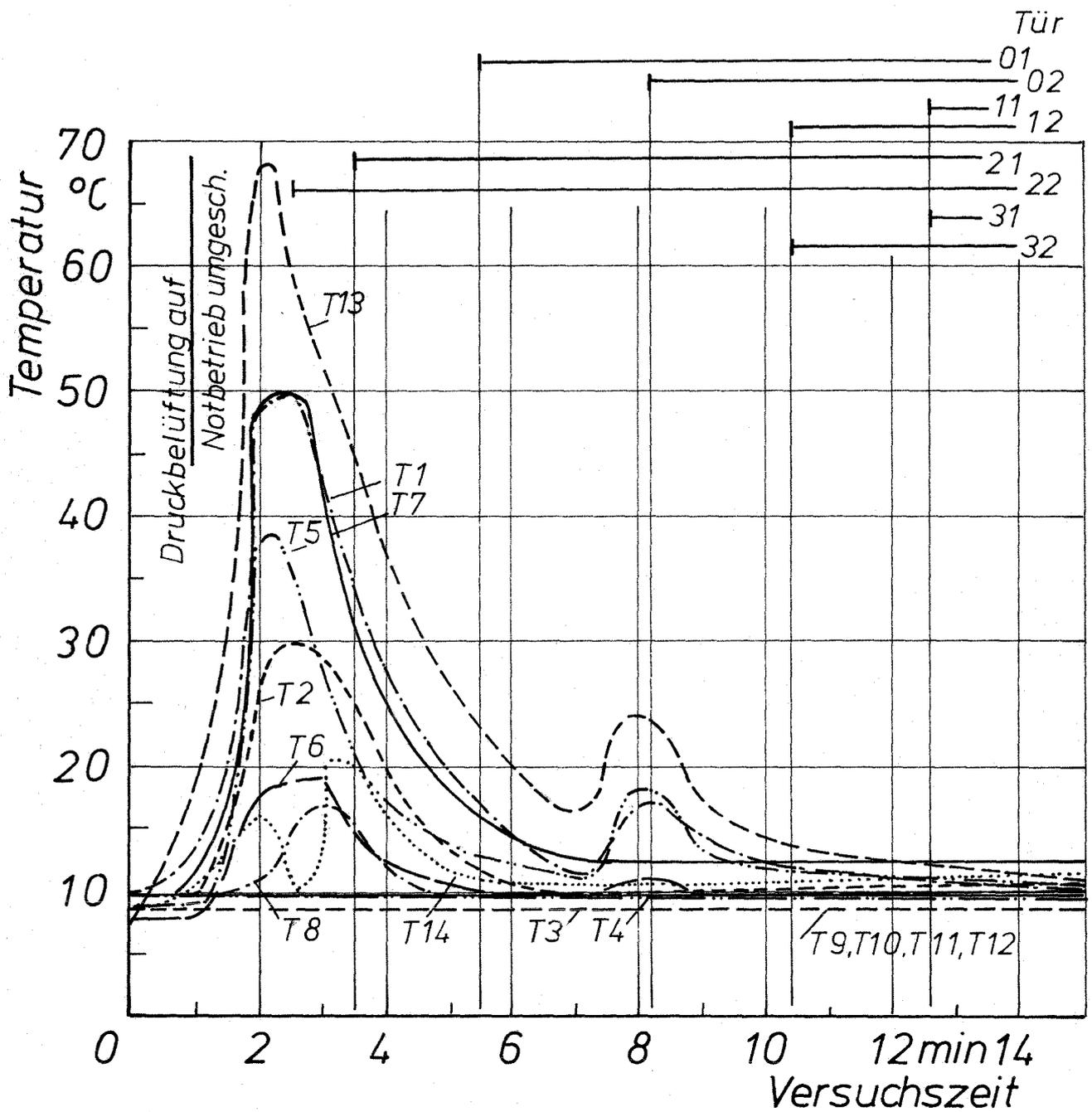


Bild 6 Zeitlicher Verlauf der Temperatur beim Kalt-  
rauchversuch

— Tür offen

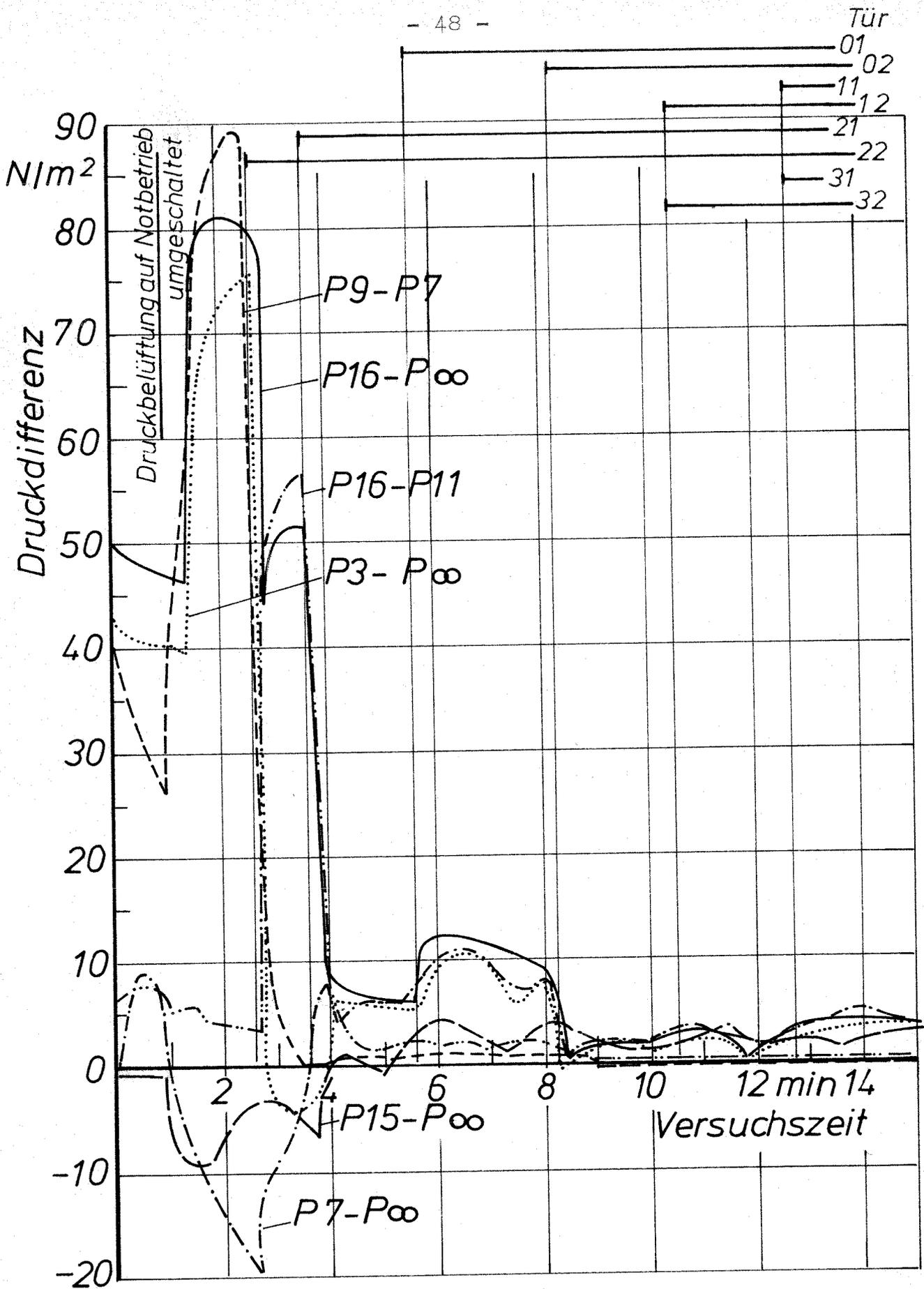


Bild 7 Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen beim Kaltrauchversuch

— Tür offen

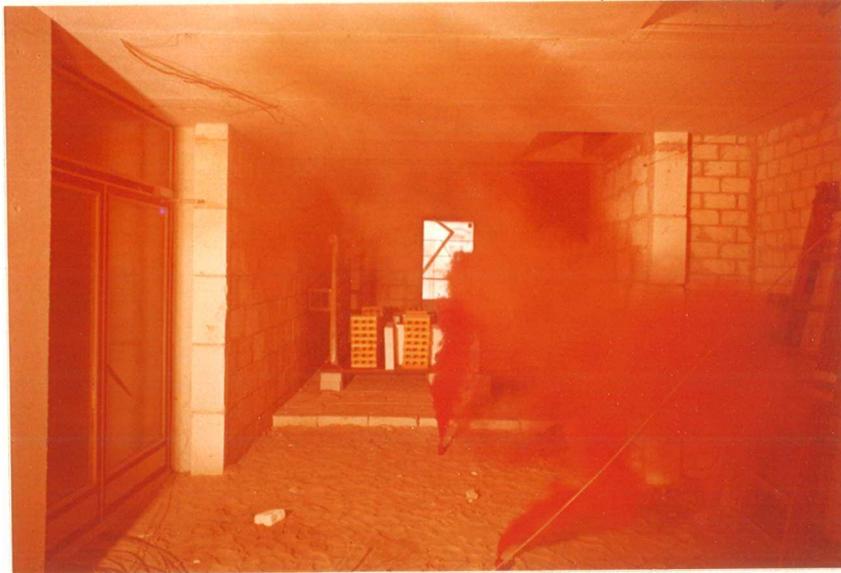


Bild 8.1



Bild 8.2

Bild 8 Kaltrauchversuch. Brandraum kurz nach dem Entzünden des Rauchpulvers

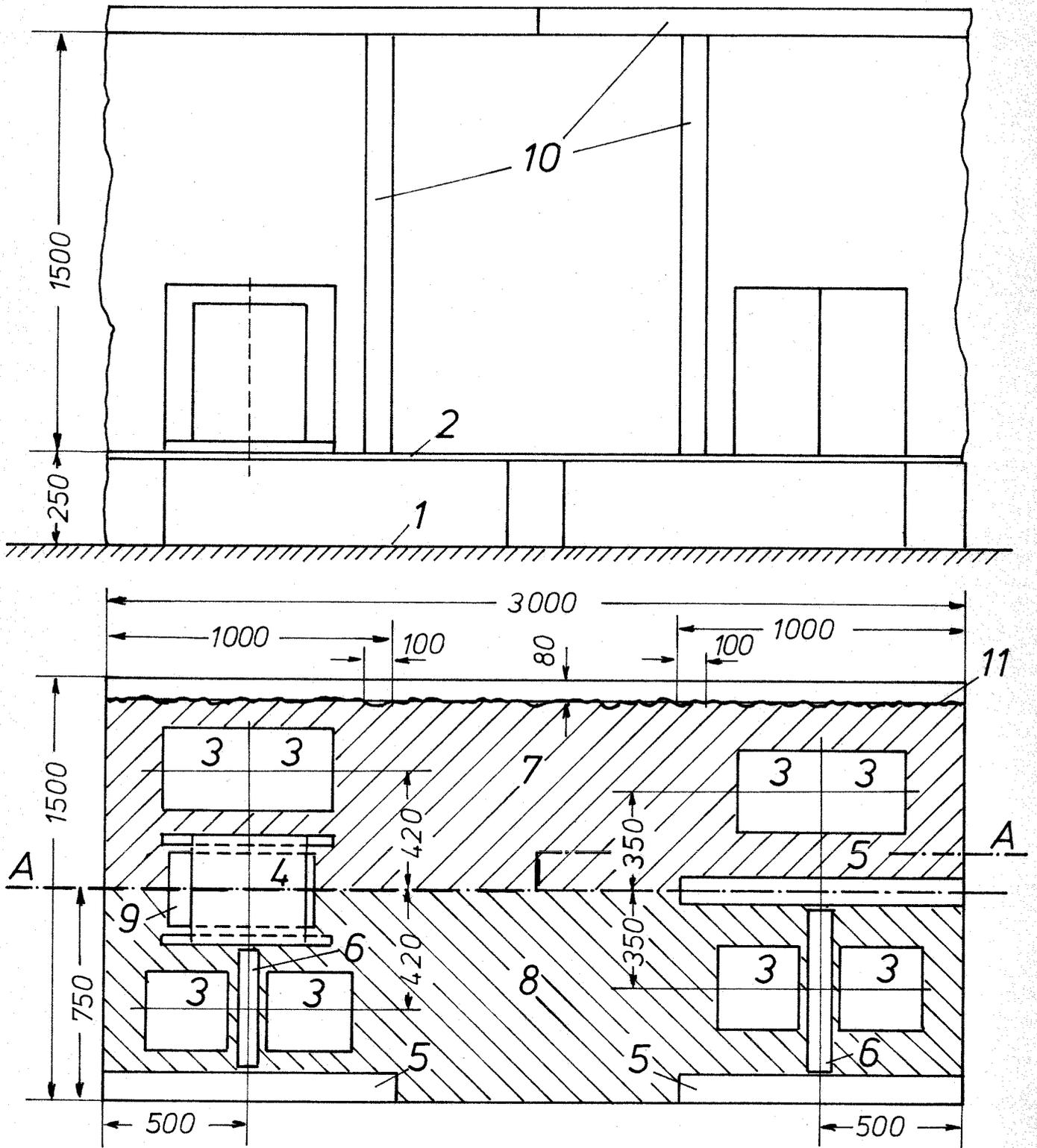


Bild 9 Aufbau einer Brandlastpalette mit Zündkrippe

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



Palette II

Palette I

Bild 10 Aufbau und Anordnung der Brandlastpaletten im Brandraum

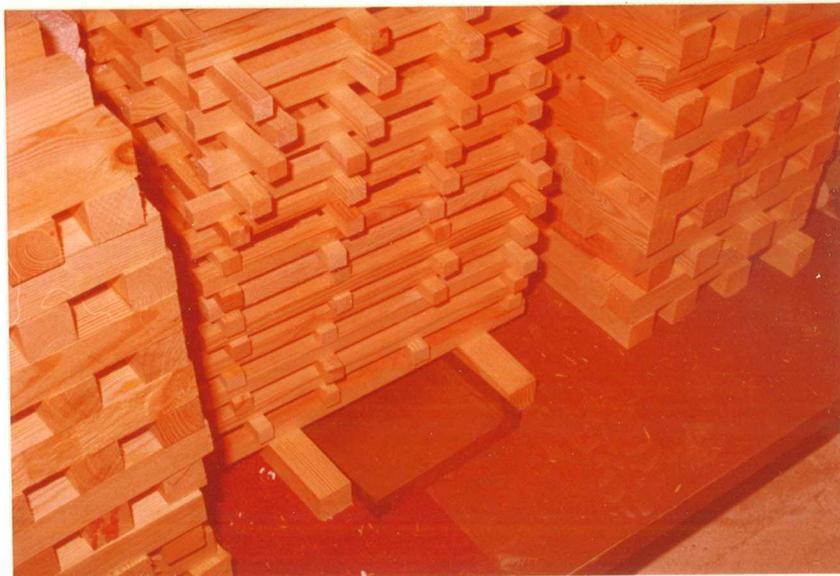


Bild 11 Anordnung der Zündkrippe und der Zündwanne

### Fenster mit Isolierverglasung

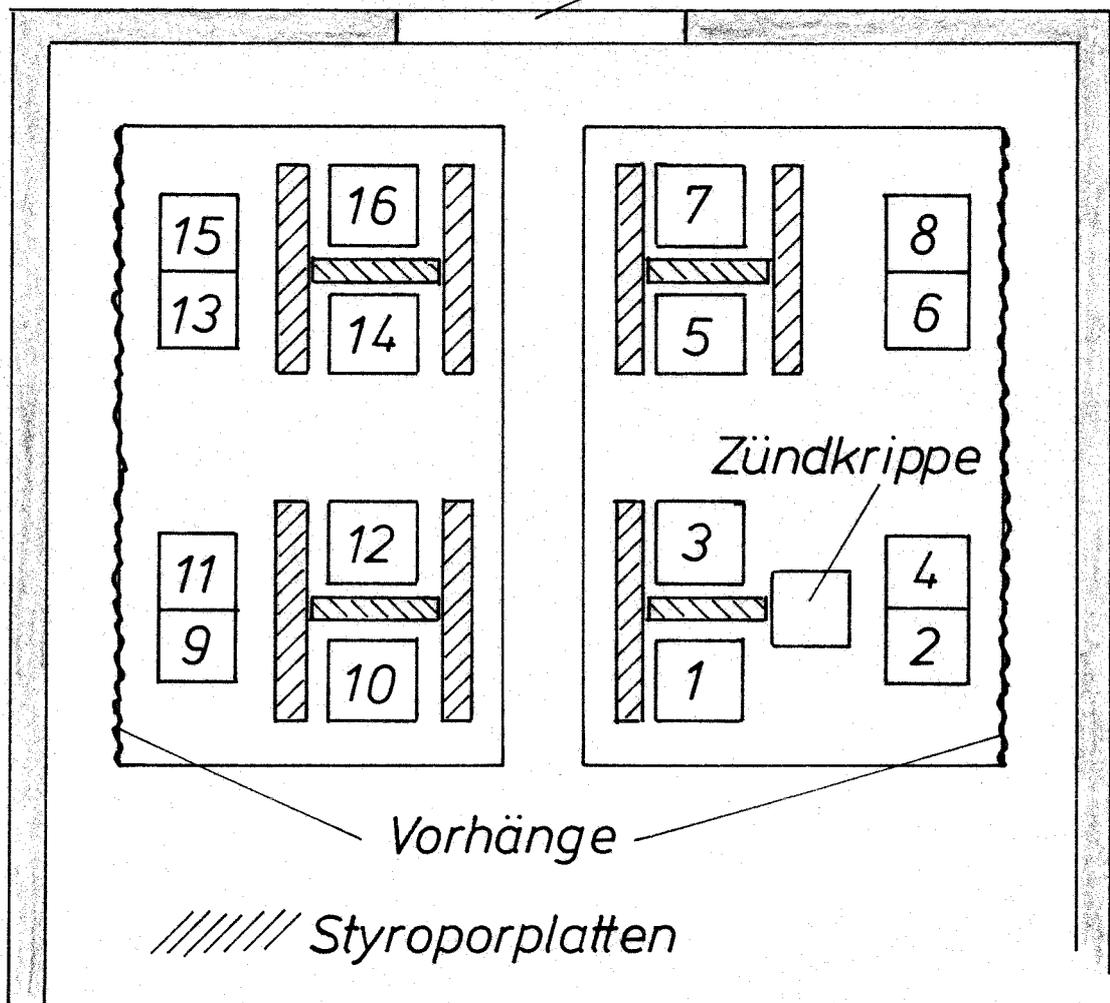


Bild 12 Schematische Anordnung der Brandlastpaletten zur Beschreibung der Brandausbreitung



Bild 13.1 Zeit 4 min 41 s

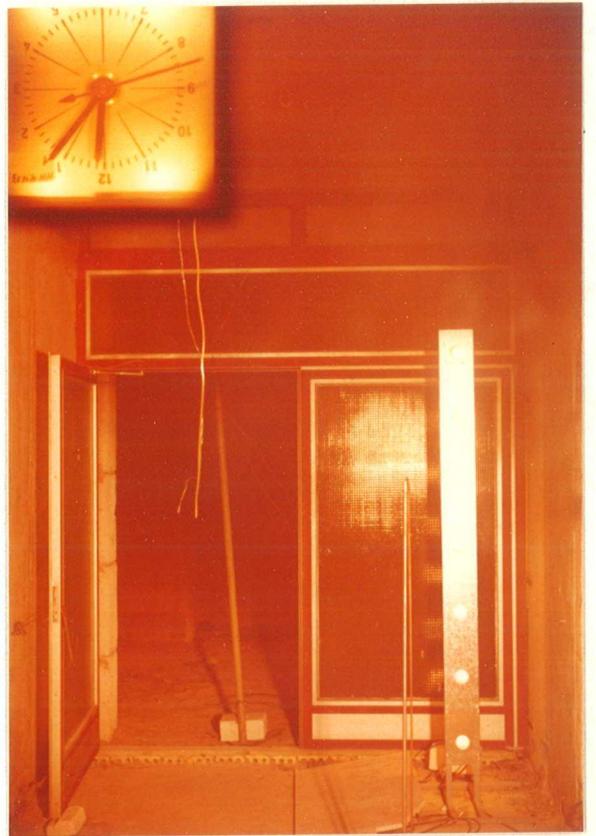


Bild 13.2 Zeit 5 min 42 s

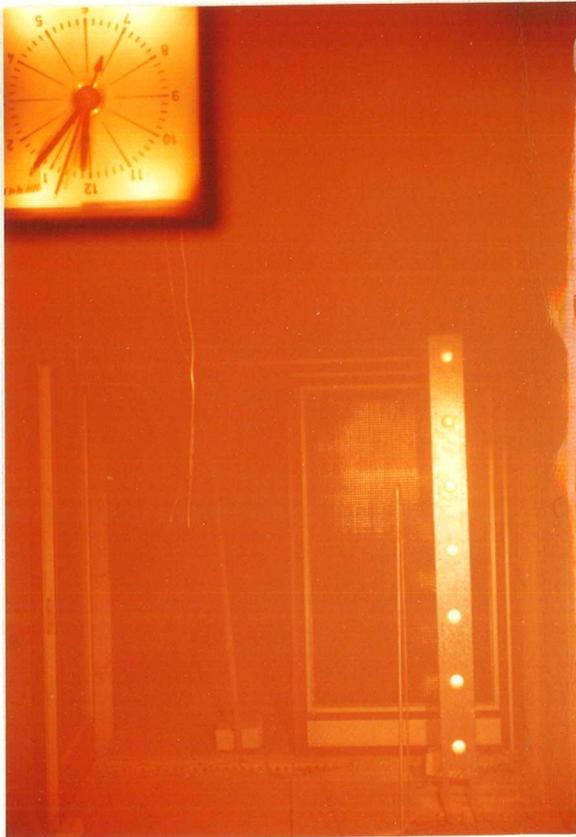


Bild 13.3 Zeit 6 min 2 s

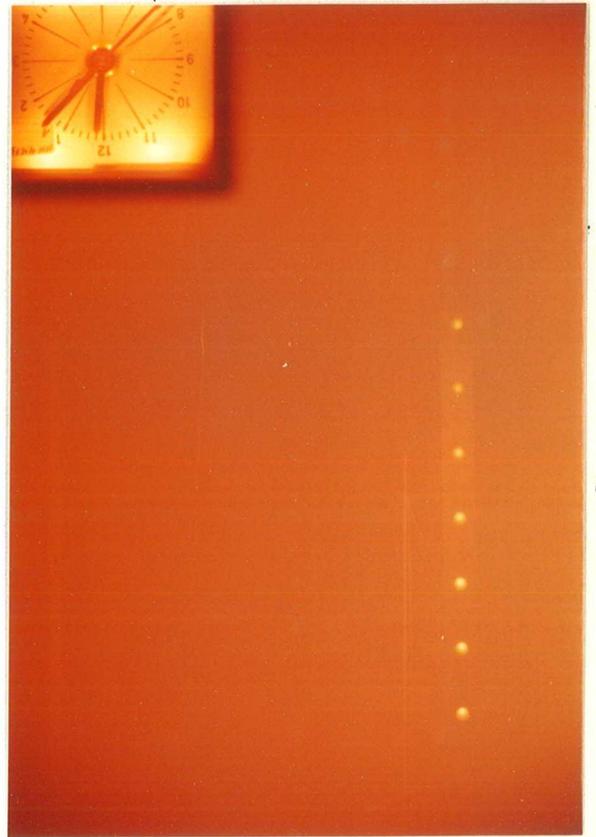


Bild 13.4 Zeit 6 min 43 s

Bild 13.1 bis 13.4 Brandversuch. Halle mit Tür zum Brandraum

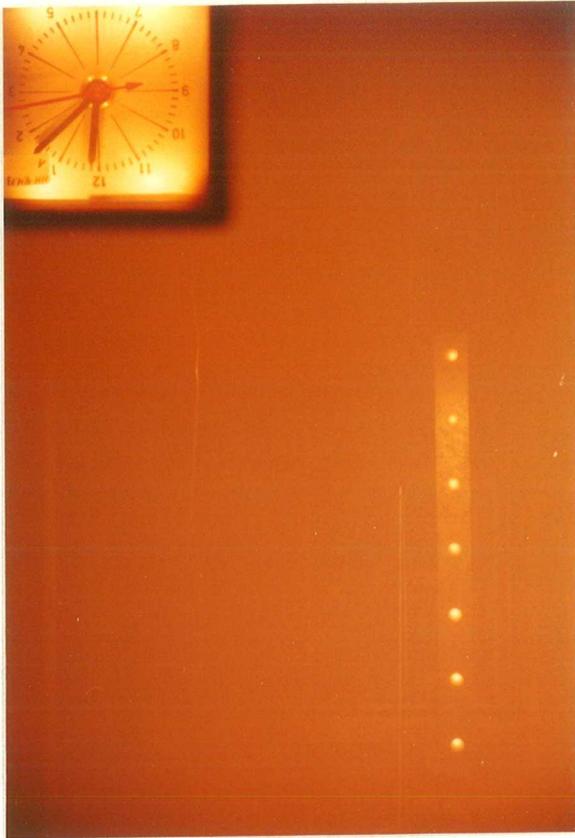


Bild 13.5 Zeit 7 min 13 s

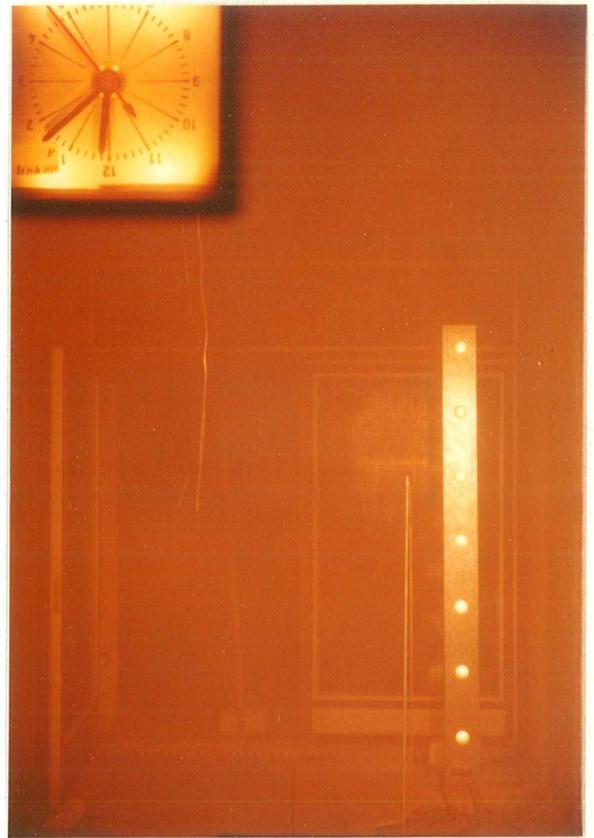


Bild 13.6 Zeit 7 min 23 s

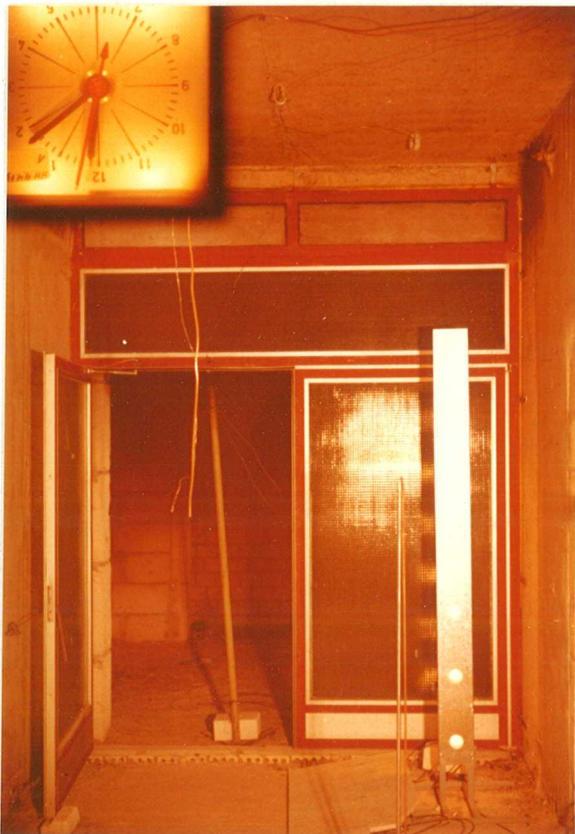


Bild 13.7 Zeit 8 min 2 s

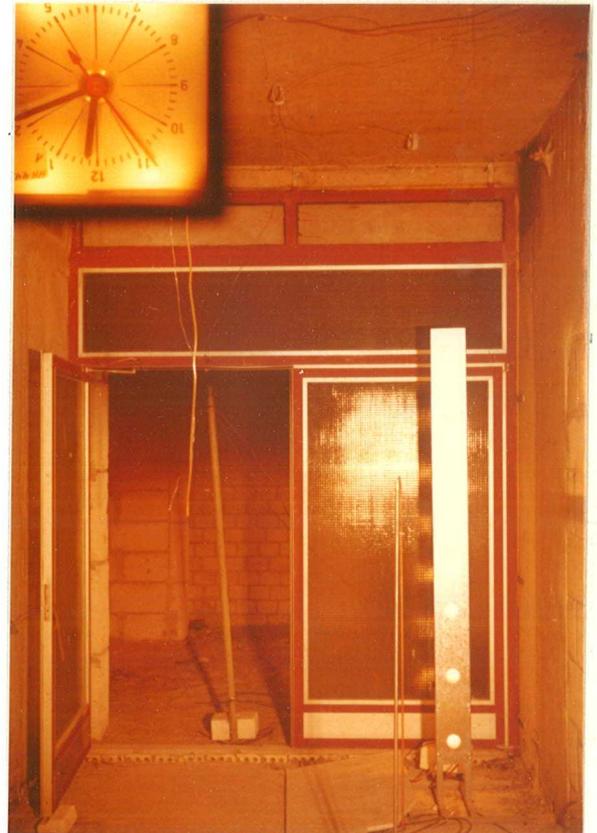


Bild 13.8 Zeit 10 min 54 s

Bild 13.5 bis 13.8 Brandversuch Halle mit Tür zum Brandraum

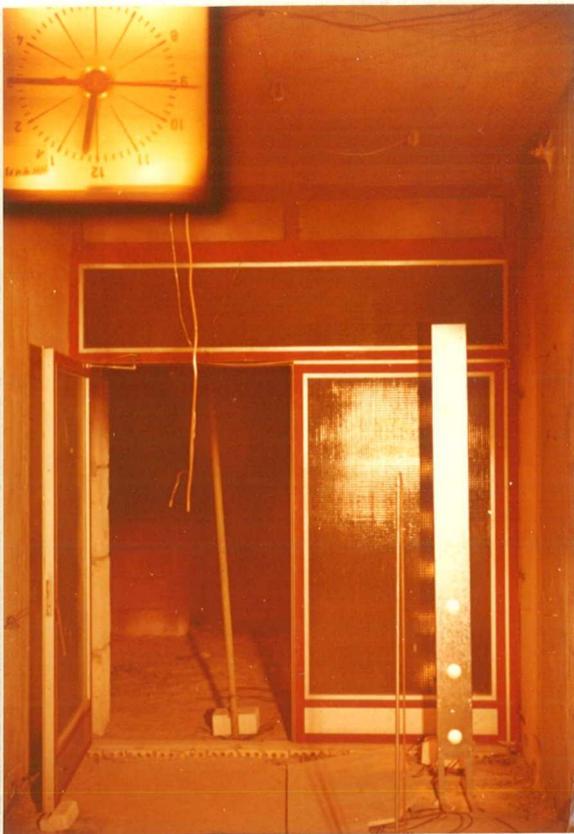


Bild 13.9 Zeit 14 min 56 s

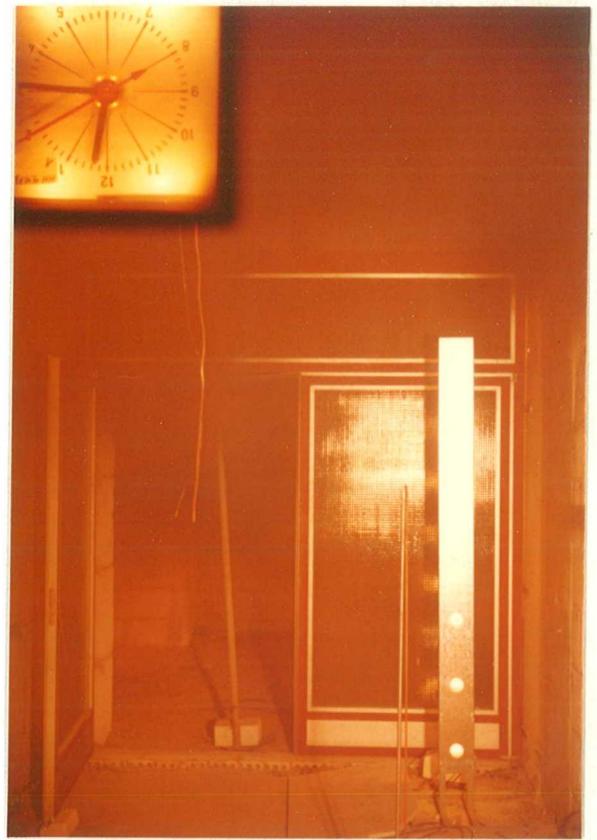


Bild 13.10 Zeit 15 min 10 s

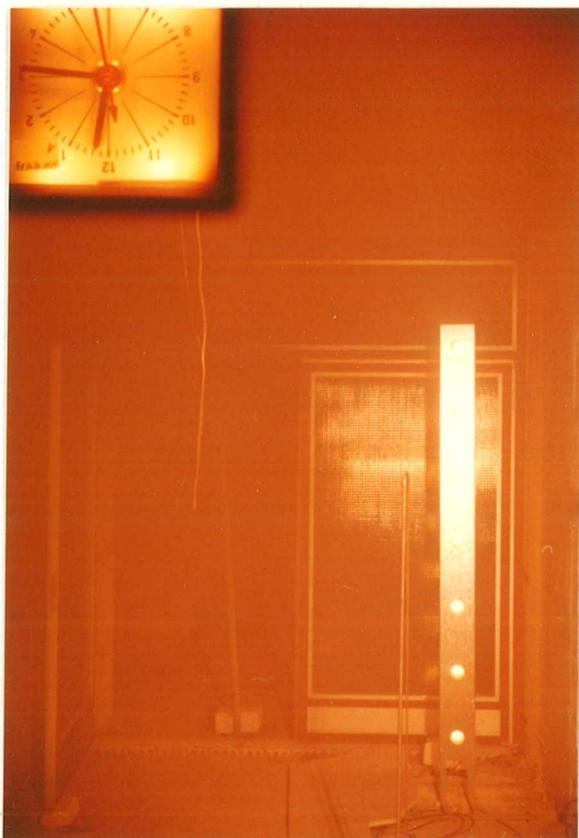


Bild 13.11 Zeit 15 min 27 s



Bild 13.12 Zeit 17 min 12 s

Bild 13.9 bis 13.12 Brandversuch, Halle mit Tür zum Brandraum

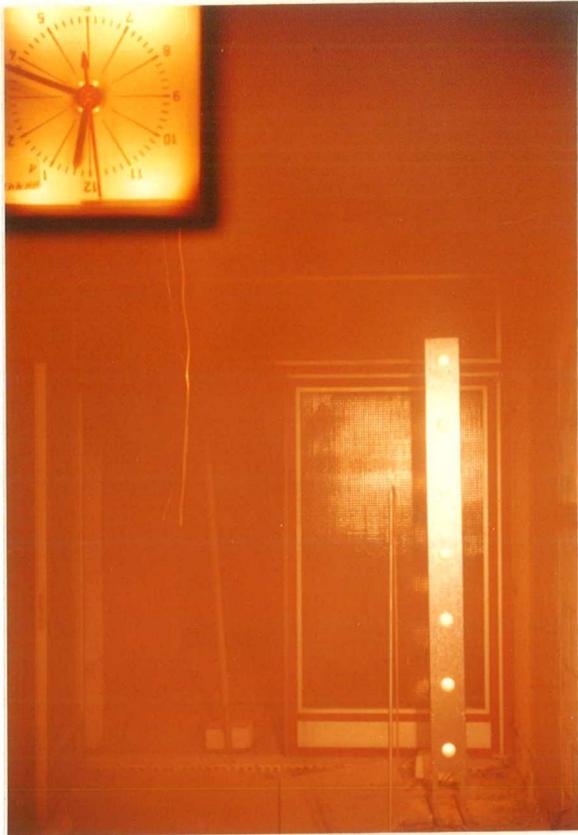


Bild 13.13 Zeit 17 min 59 s

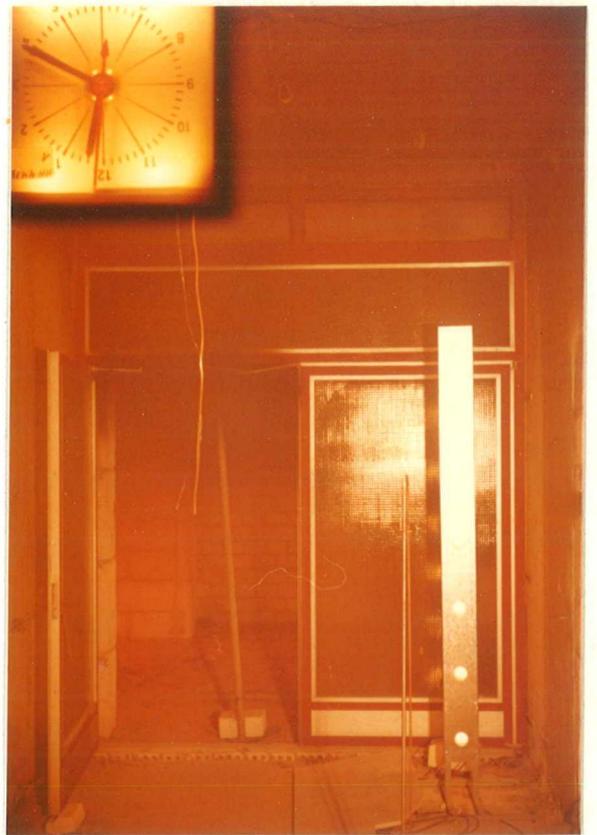


Bild 13.14 Zeit 19 min 1 s

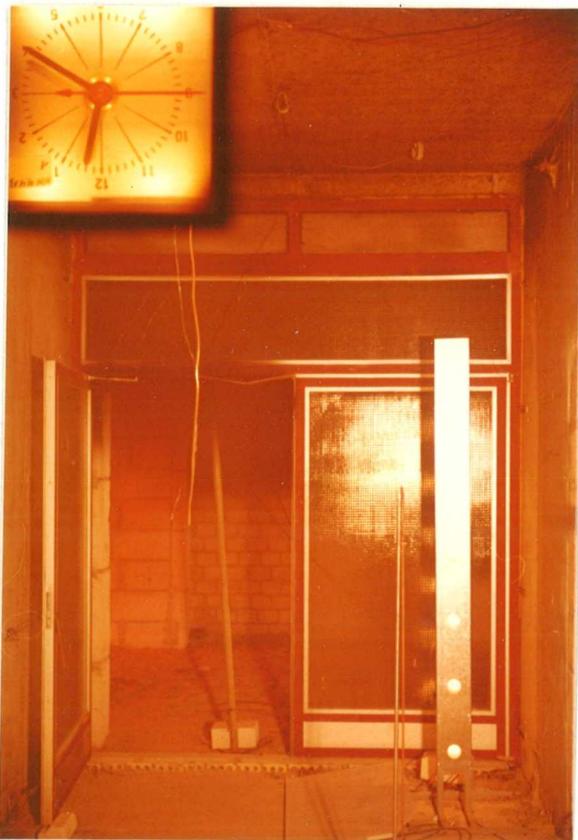


Bild 13.15 Zeit 19 min 45 s

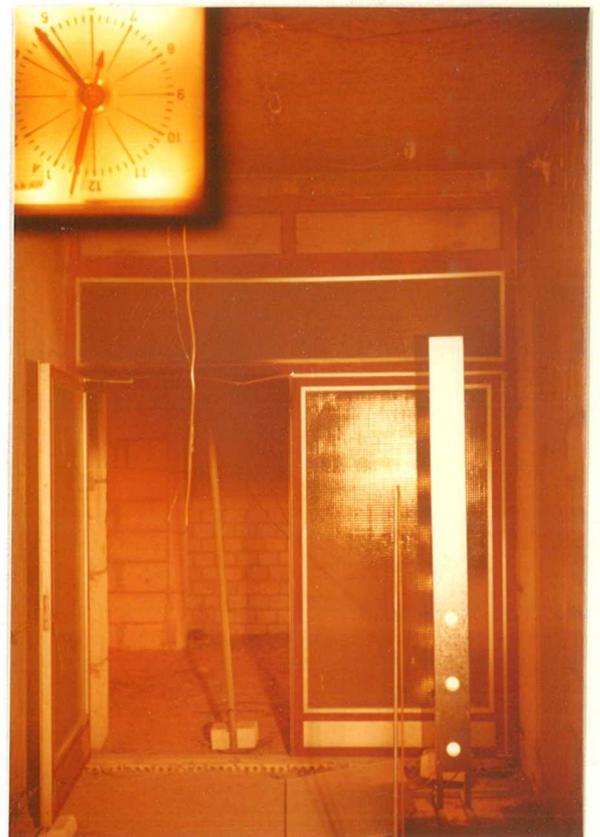


Bild 13.16 Zeit 23 min 2 s

Bild 13.13 bis 13.16 Brandversuch. Halle mit Tür zum Brandraum

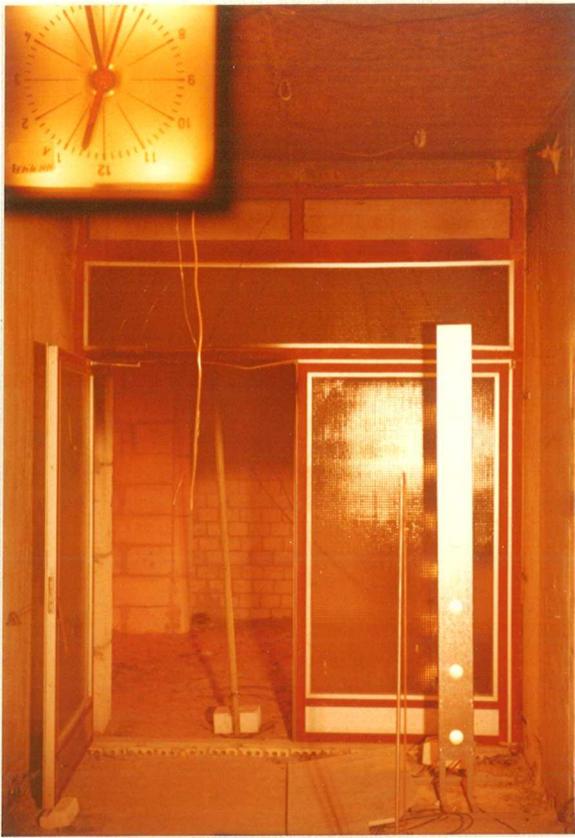


Bild 13.17 Zeit 27 min 33 s

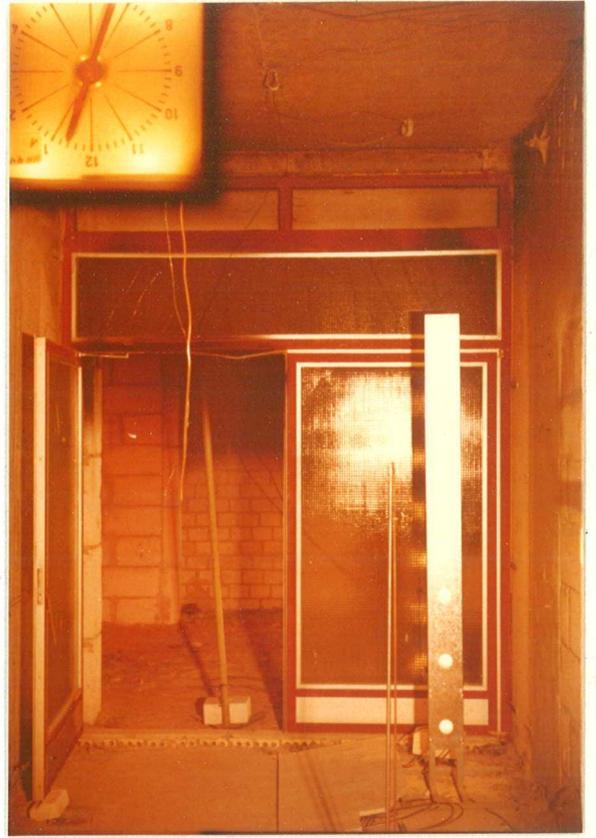


Bild 13.18 Zeit 32 min 33 s

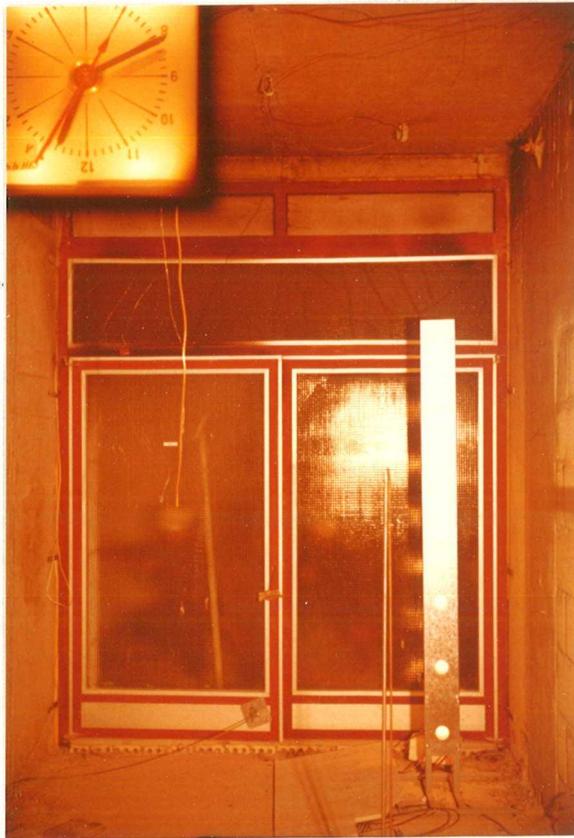


Bild 13.19 Zeit 40 min 5 s

Bild 13.17 bis 13.19 Brandversuch. Halle mit Tür zum Brandraum

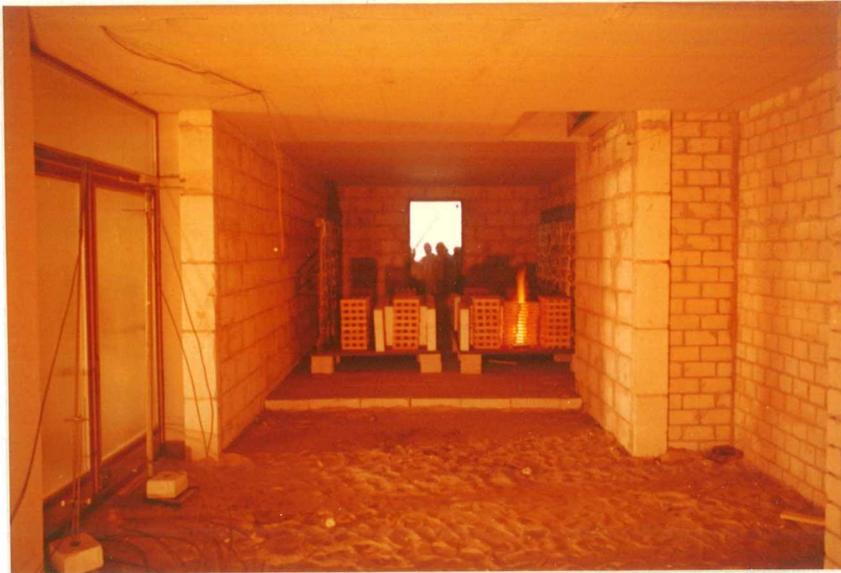


Bild 14.1

Zeit 35 s

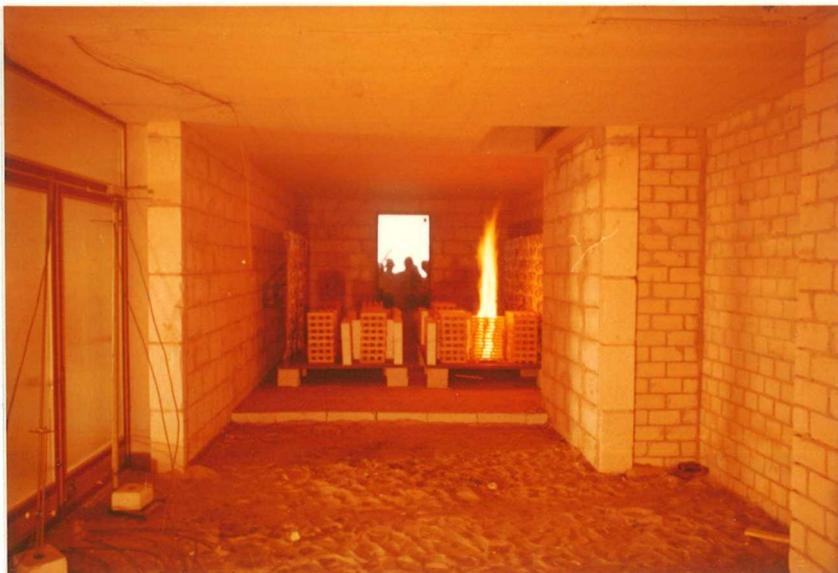


Bild 14.2

Zeit 1 min 30 s



Bild 14.3

Zeit 3 min

Bild 14.1 bis 14.3 Brandversuch. Brandraum



Bild 14.4

Zeit 4 min

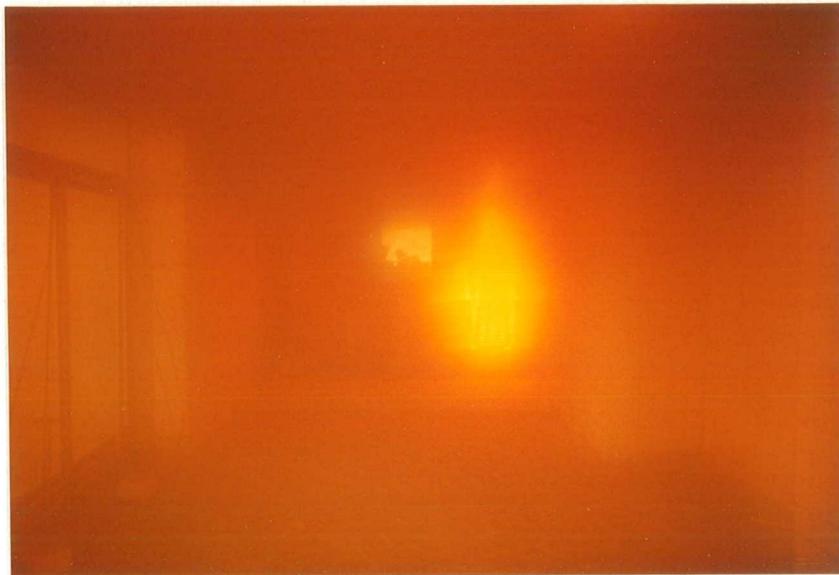


Bild 14.5

Zeit 4 min 30 s

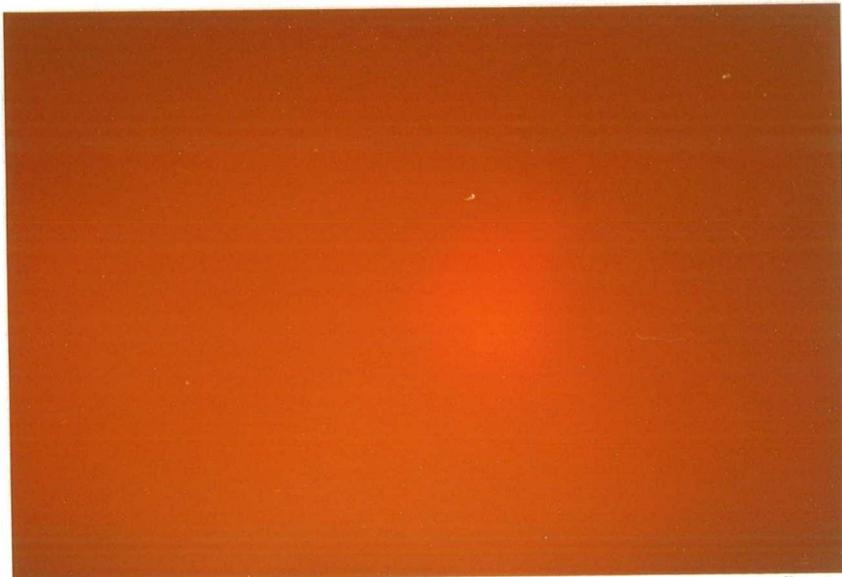


Bild 14.6

Zeit 5 min 15 s

Bild 14.4 bis 14.6 Brandversuch. Brandraum



Bild 14.7

Zeit 7 min 30 s



Bild 14.8

Zeit 8 min 30 s



Bild 14.9

Zeit 9 min 30 s

Bild 14.7 bis 14.9 Brandversuch. Brandraum

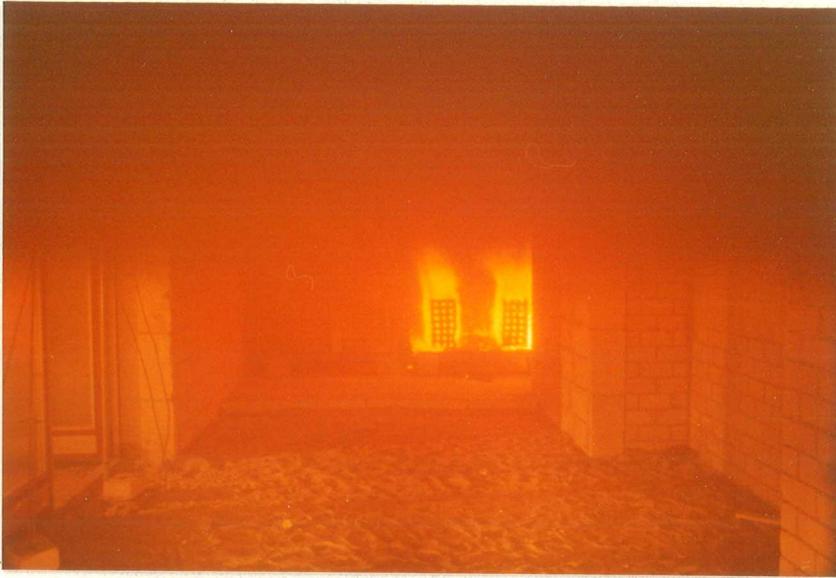


Bild 14.10

Zeit 10 min 30 s



Bild 14.11

Zeit 11 min 30 s

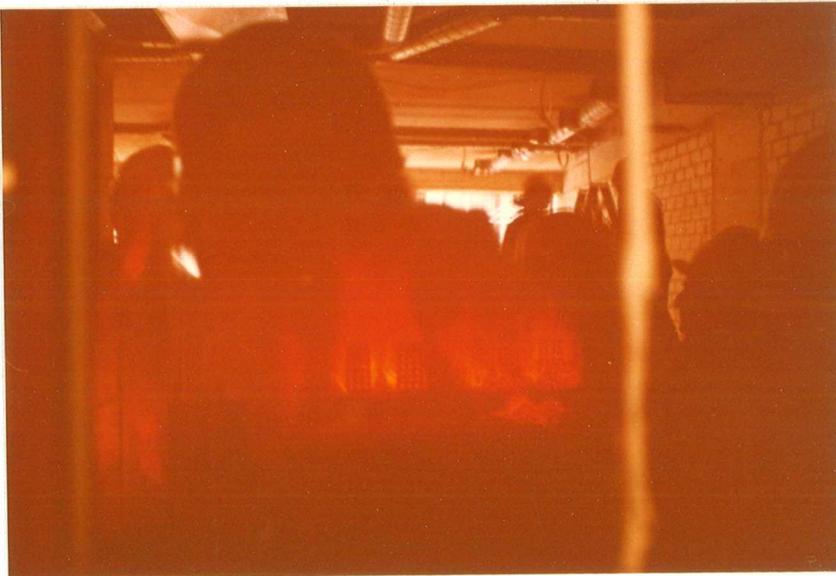


Bild 14.12

Zeit 20 min 30 s

Bild 14.10 bis 14.12 Brandversuch. Brandraum



Bild 14.13

Zeit 25 min



Bild 14.14

Zeit 30 min



Bild 14.15

Zeit 39 min

Bild 14.13 bis 14.15 Brandversuch. Brandraum

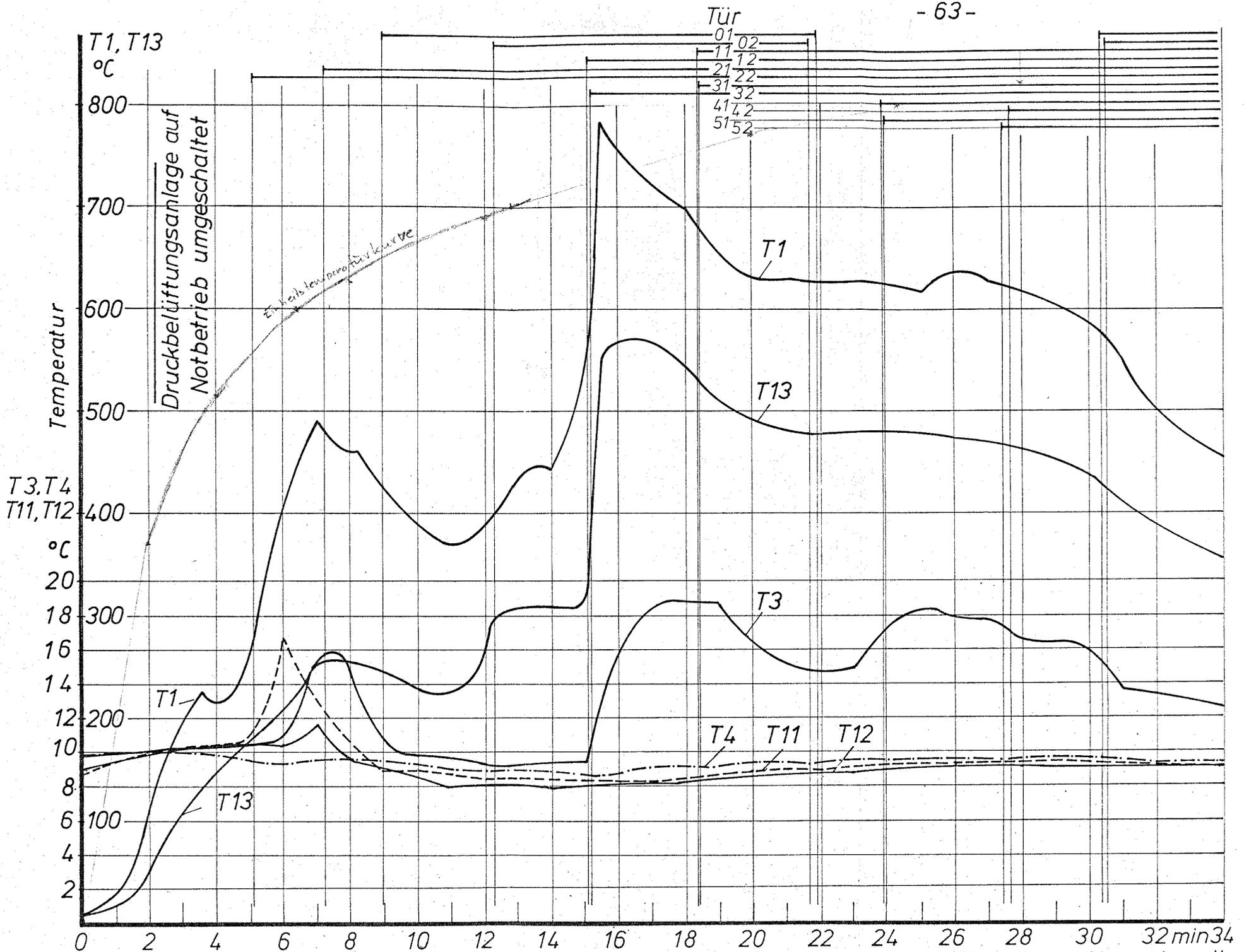


Bild 15 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen T1, T3, T4, T11, T12, u. T13 — Tür offen Versuchszeit

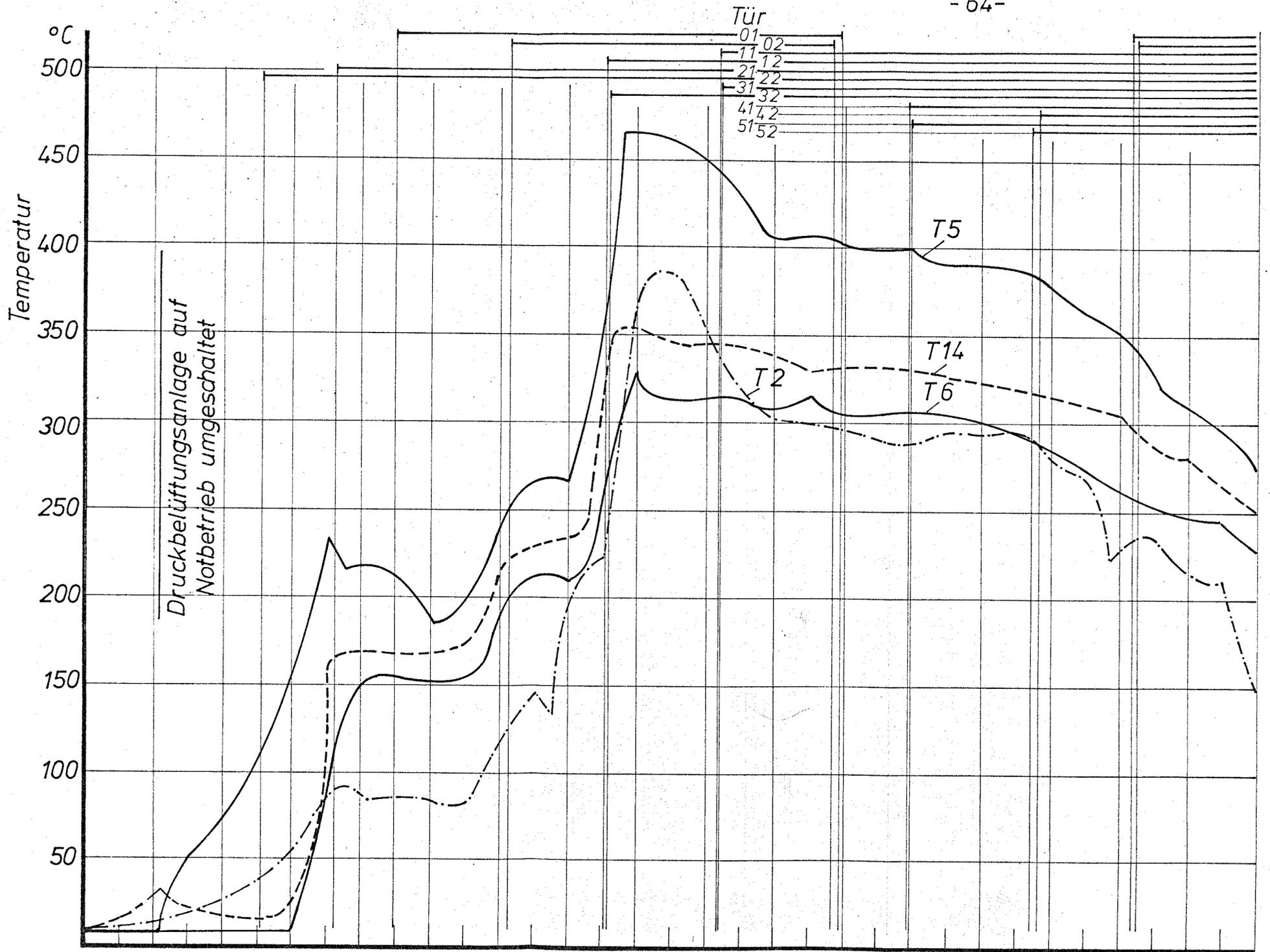


Bild 16 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen T2, T5, T6, u. T14 — Tür offen

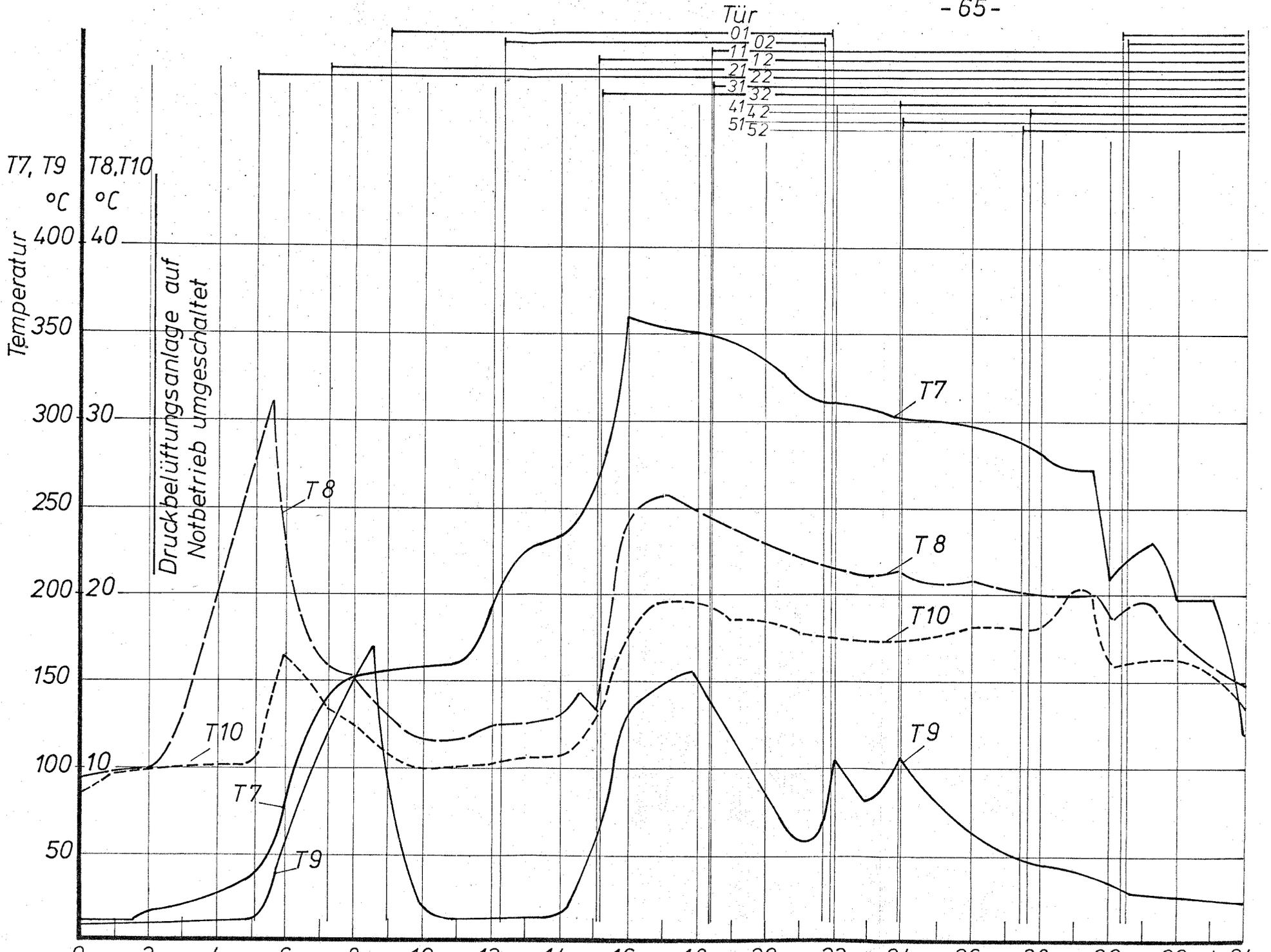


Bild 17 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den Türen 21 u. 22 — Tür offen — Versuchszeit

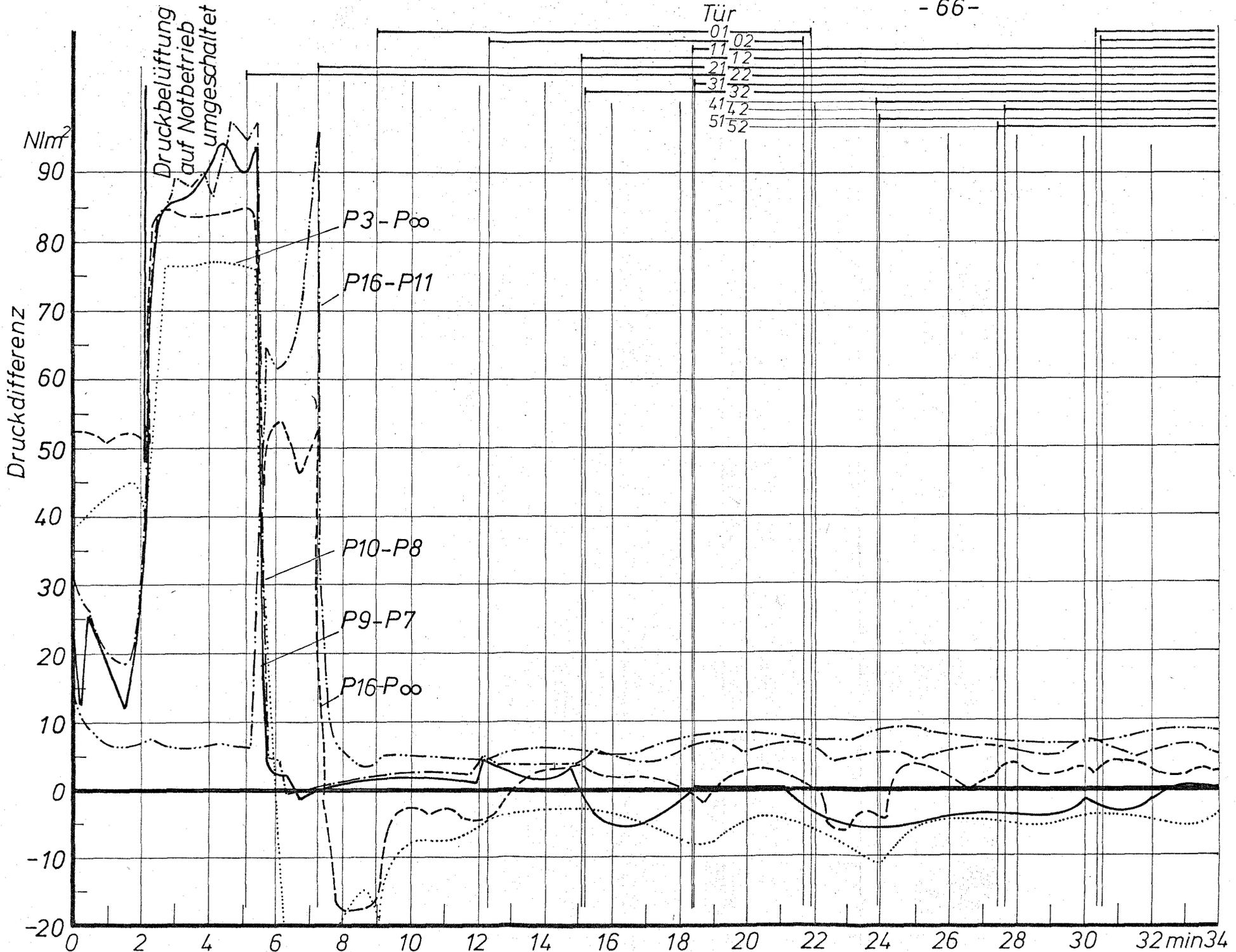


Bild 18 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenzen an den Türen 21 u. 22 — Tür offen Versuchszeit

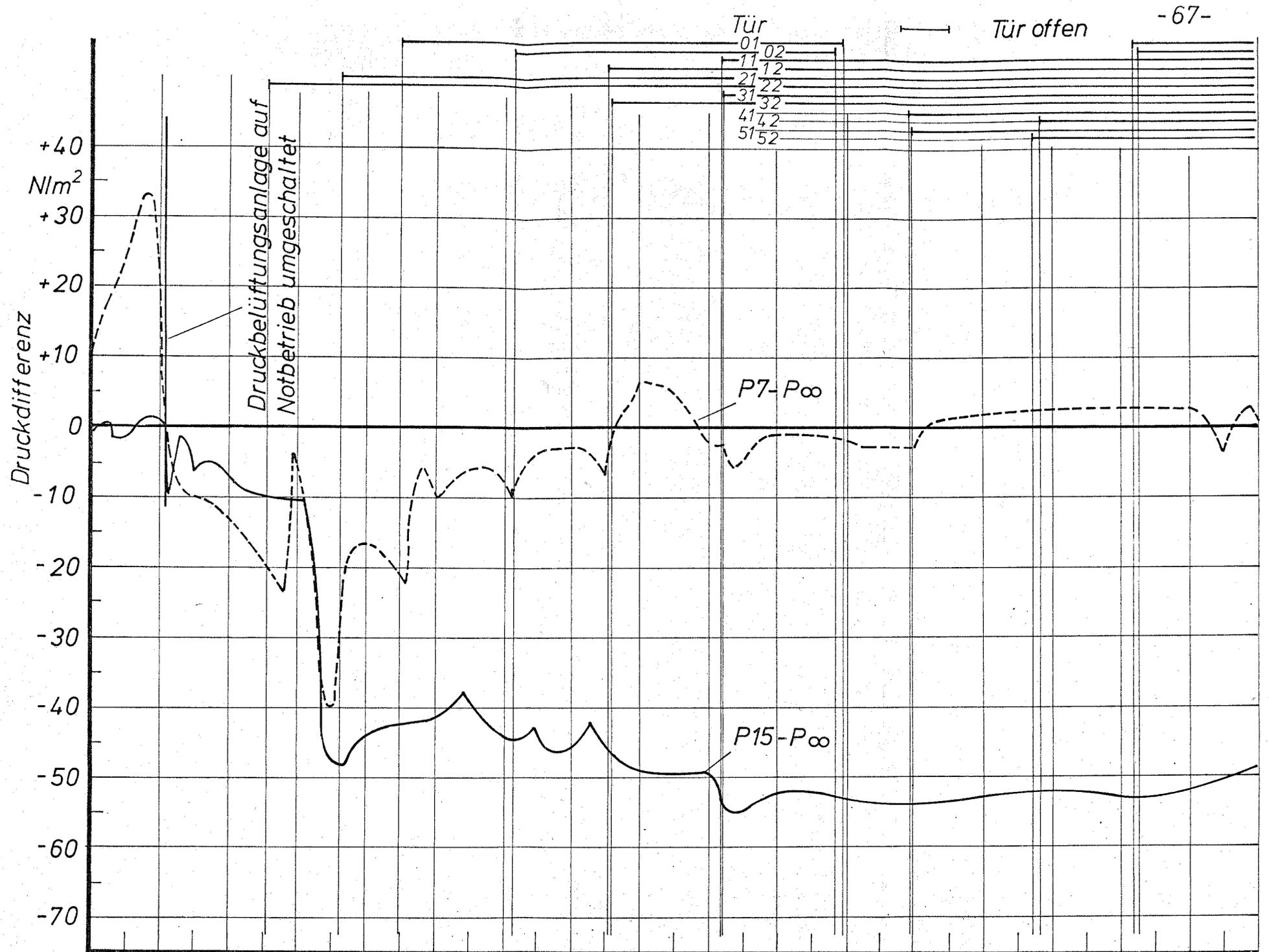


Bild 19 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Druckdifferenz zwischen P7 bzw. P15 u. P $\infty$  (Umgebung) Versuchszeit

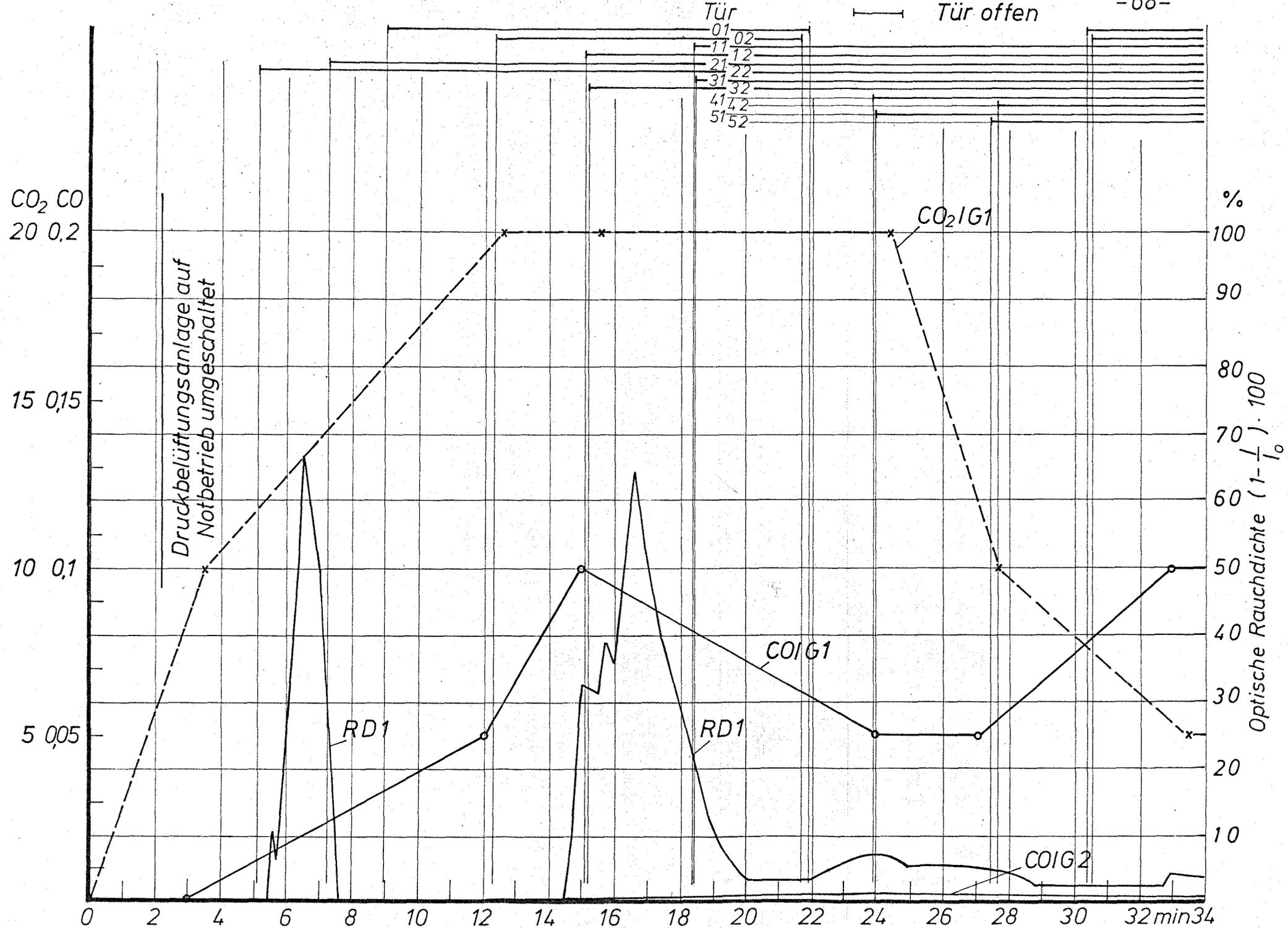


Bild 20 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf des CO- u. CO<sub>2</sub>-Gehaltes sowie der optischen Rauchdichte

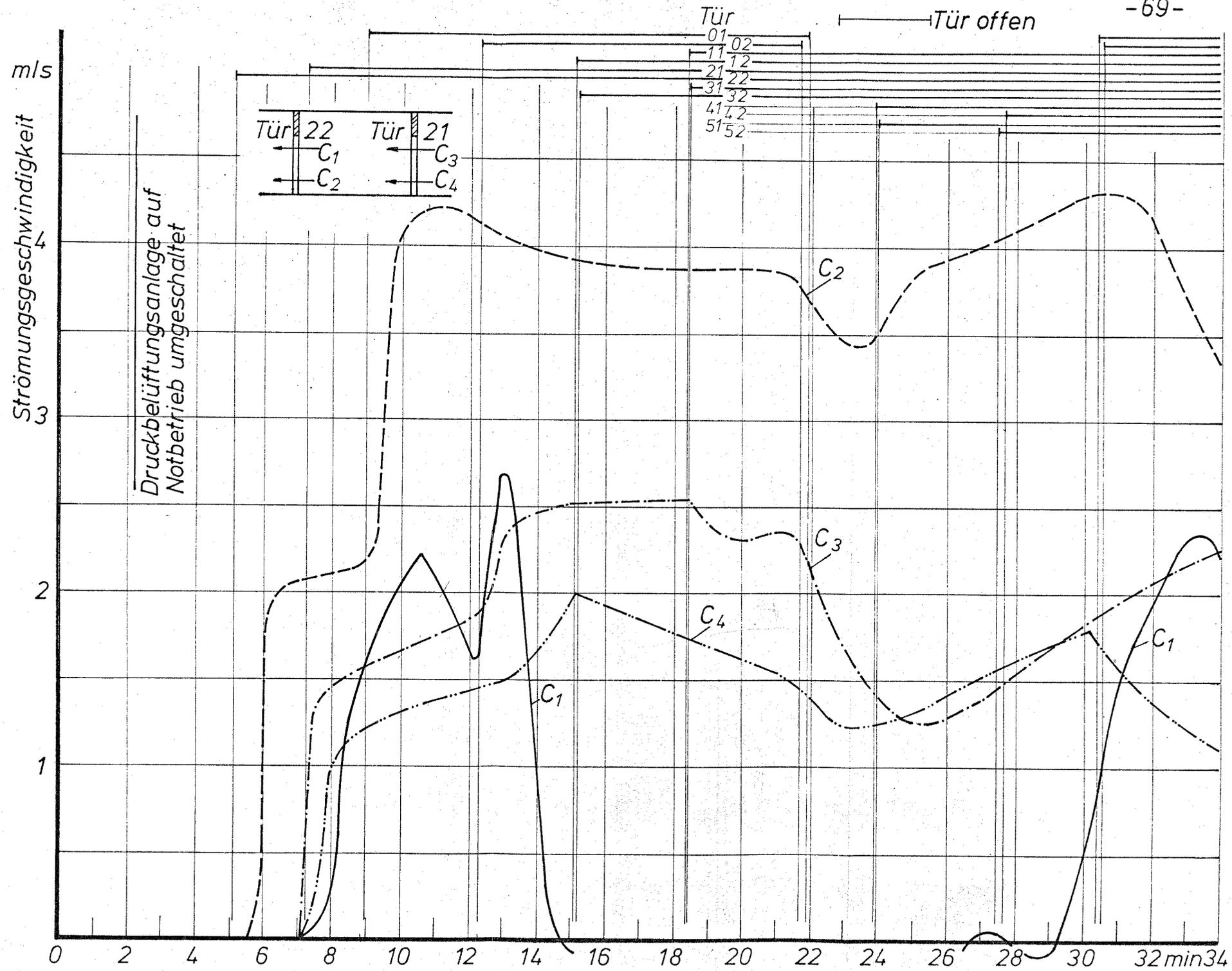


Bild 21 Brandversuch. Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Türen 21 u. 22 Versuchszeit

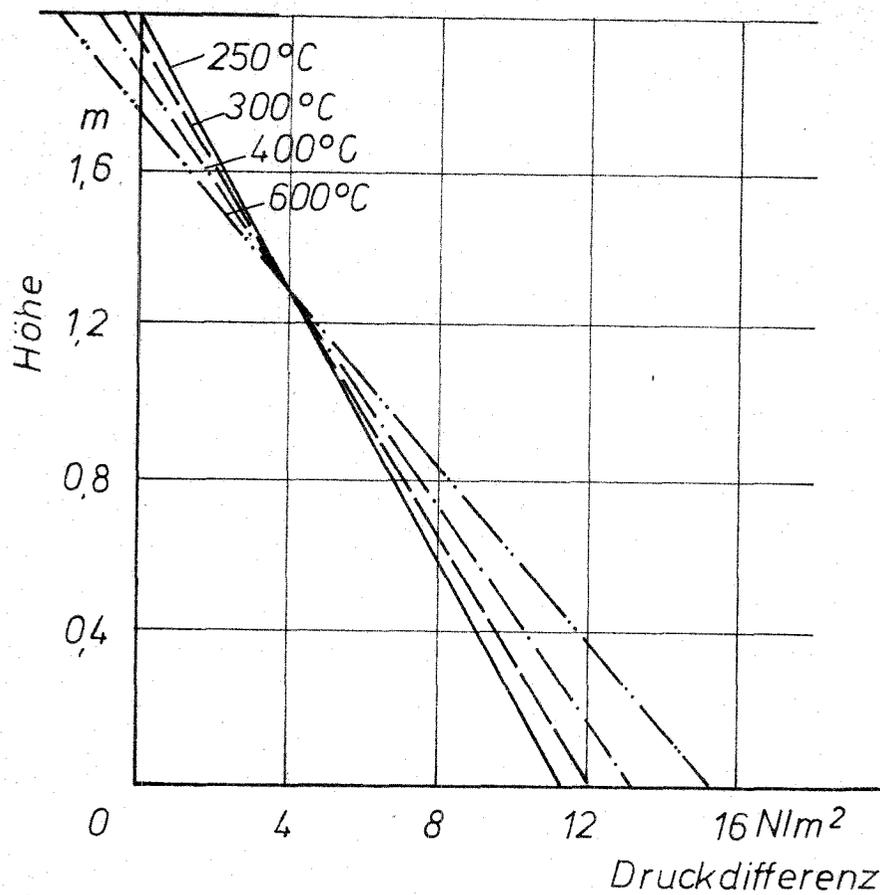


Bild 22 Druckdifferenzen an der Tür 22 in Abhängigkeit von der Höhe bei verschiedenen Temperaturen auf der Brandraumseite (Temperatur in der Halle  $9^{\circ}\text{C}$ )

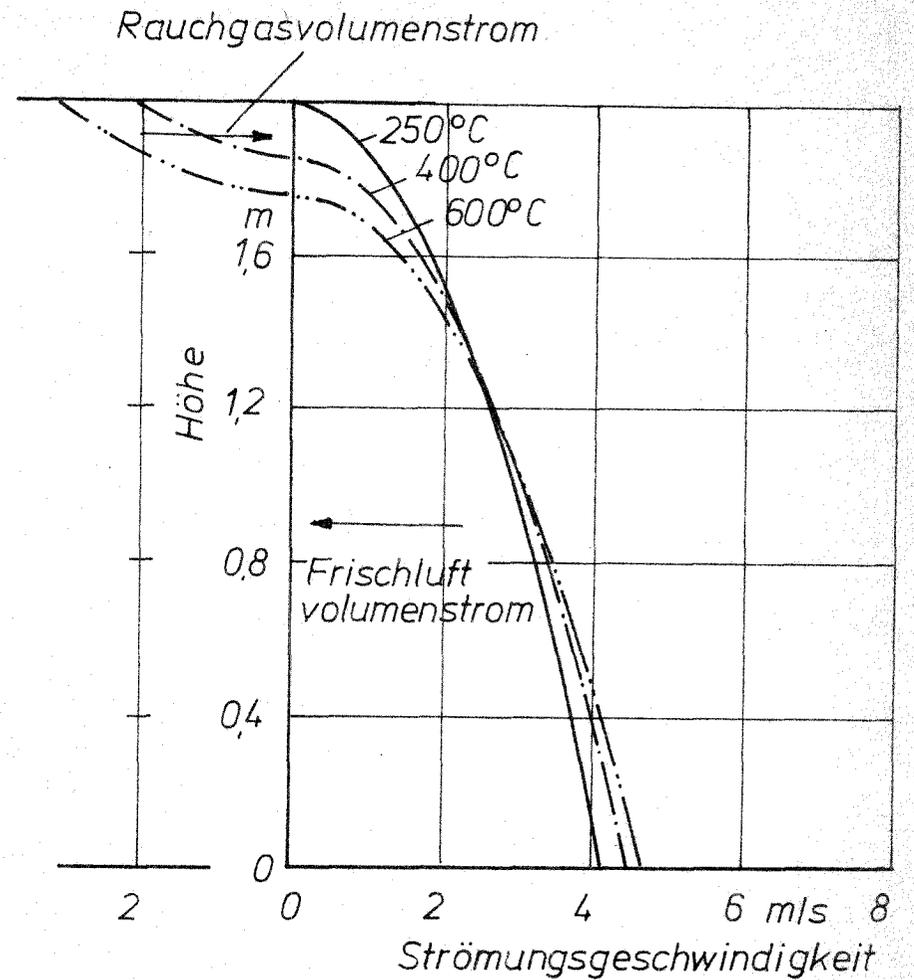


Bild 23 Strömungsgeschwindigkeiten infolge der Druckdifferenzen an der Tür 22