

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

"Modellbranduntersuchungen" Bericht über die
in Deutschland im Rahmen einer internationalen
Gemeinschaftsuntersuchung ausgeführten Versuche

5

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr.5

"Modellbranduntersuchungen"

Bericht über die in Deutschland im Rahmen einer internationalen
Gemeinschaftsuntersuchung ausgeführten Versuche

von

Professor Dr.-Ing. Horst Seekamp

und

Regierungsrat Dipl.-Ing. Wolfram Becker

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

Berlin-Dahlem

Berlin

August 1966

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. VORBEMERKUNGEN	1
2. VERSUCHSPROGRAMM	3
3. VERSUCHSAUSFÜHRUNG	4
3.1. Versuchsanordnung und Messung des Abbrandes	4
3.2. Brandlast	5
3.3. Temperaturmessung	6
3.4. Messung der Wärmestrahlung	6
4. VERSUCHSERGEBNISSE	7
5. AUSWERTUNG	9
5.1. Branddauer	9
5.2. Abbrandgeschwindigkeit	11
5.2.1. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_H	11
5.2.2. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_A	12
5.2.3. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_E	13
5.2.4. Gesamtbranddauer	13
5.3. Zum Aufheizen des Brandraumes erforderliche Energie	14
5.4. Ausblick auf weitere Auswertungen	15
6. ZUSAMMENFASSUNG	15
7. LITERATURVERZEICHNIS	17
8. TABELLEN UND BILDER	18
9. ANHANG A: Graphische Darstellung von Temperatur-Gewichtsverlust- und Strahlungsverlauf	47
10. ANHANG B: Zahlenmäßige Auswertung der Versuchsergebnisse	61

FORMELZEICHEN

b	Breite
l	Tiefe
h	Höhe
b_F	Fensterbreite
A_F	Fensterfläche ($A_F = b_F h$)
h_F	Fensterhöhe ($h_F = h$)
b_1	Abdeckung der Vorderseite
A	Fläche der Vorderseite ($A = b h$)
$\frac{A_F}{A}$	Ventilation
A	
d	Kantenlänge der Holzstäbe
a	lichter horizontaler Stababstand
	Brandlastverteilung $d/(\frac{a}{d})$
t	Versuchszeit
t_{80}	Zeit bis zum Erreichen eines Restgewichtes von 80 %
t_D	Gesamtbranddauer
R	Abbrandgeschwindigkeit [kg min^{-1}]
$R_{80/55}$	mittlere Abbrandgeschwindigkeit in der Zeit $t_{55} - t_{80}$
I	Wärmestrahlungsintensität
$I_{80/55}$	mittlere Wärmestrahlungsintensität in der Zeit $t_{55} - t_{80}$
I_o	Wärmestrahlung im Abstand b vor der Öffnung A_F
I_f	Wärmestrahlung im Abstand $h/10$ oberhalb der Öffnung A_F
ϑ	Temperatur
$\vartheta_{80/55}$	mittlere Temperatur in der Zeit $t_{55} - t_{80}$
ϑ_b	Temperatur in der Höhe $\frac{h}{4}$ oberhalb des Bodens
ϑ_c	Temperatur in der Höhe $\frac{h}{4}$ unterhalb der Decke
q	spezifische Brandlast in kg m^{-2}
Q	Gesamtbrandlast ($Q = q b l$)

1. VORBEMERKUNGEN

Systematische Untersuchungen der Gesetzmäßigkeiten des Brandablaufes in Räumen wurden erstmalig vor wenigen Jahren begonnen, so daß die Grundlagen des Brandschutzes bis jetzt im wesentlichen auf den bei der Brandbekämpfung gewonnenen Erfahrungen beruhen. Es wurde zwar häufig versucht, durch im natürlichen Maßstab ausgeführte Versuche unter besonderen Bedingungen diese Erfahrungen zu ergänzen und den Brandablauf bei besonderen Schadenfeuern zu klären; es war jedoch wegen des durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten bedingten hohen finanziellen Aufwandes, der bei Brandversuchen besonders großen Schwierigkeit der Datengewinnung und der im allgemeinen witterungsbedingten ungleichmäßigen Versuchsrandbedingungen nicht möglich, diese Versuche in großer Zahl und systematisch auszuführen.

Angesichts dieser Schwierigkeiten bei der Versuchsausführung im natürlichen Maßstab wurde von der britischen Joint Fire Research Organization der Versuch unternommen, durch die Anwendung von maßstäblich verkleinerten Modellen den Brandablauf in Räumen unter definierten Bedingungen und in einer großen Zahl von Versuchen zu studieren. Während bei den ersten Untersuchungen Modelle verwendet wurden, die sowohl aus maßstäblich verkleinerten Gebäudeteilen mit entsprechend verkleinertem Inventar als Brandlast bestanden, ging man bei weiteren Untersuchungen dazu über, sowohl die Begrenzung des Modellbrandraumes als auch die Anordnung der Brandlast zu abstrahieren. Die Modelle wurden dementsprechend als Kästen aus Asbest- oder Asbestzementplatten mit bestimmten Öffnungen hergestellt; die Brandlast bestand aus prismenförmigen Holzstäben mit quadratischem Querschnitt variierter Kantenlänge und variiertem Abstand. Die Holzstäbe wurden krippenförmig übereinander gestapelt, ihre Zahl und Länge wurde ebenfalls variiert. Bei diesen Modellen, die Untersuchungen in geschlossenen Hallen gestatteten, war es nunmehr auch möglich, den Einfluß der Windstärke und der -richtung in bezug auf die Modellanordnung zu ermitteln.

In diesem Stadium der Modellbrandtechnik wurde von dem Direktor der Fire Research Station der Joint Fire Research Organization, Mr. D.J. Lawson, angeregt, im Rahmen der Zusammenarbeit im Conseil International du Bâtiment (CIB), Commission 14, der Gruppe, die sich mit der Koordinierung der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des vorbeugenden Brandschutzes beschäftigt, Gemeinschaftsversuche auszuführen. Durch die Beteiligung vieler Institute sollte in einem für jedes Institut wirtschaftlichen Maß eine breite Streuung der verschiedenen Versuchsteile erreicht werden. Die Federführung und die Auswertung aller Versuchsergebnisse liegt in den Händen der britischen Fire Research Station in Boreham Wood.

In Deutschland beteiligte sich die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe unter der Leitung von Branddirektor Dr. Magnus und Dr. Hinrichs † mit zwei Versuchsreihen und die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, unter der Leitung der Autoren mit einer Versuchsreihe an den Untersuchungen.

Die Kosten für die Ausführung des von Deutschland übernommenen Versuchsteiles wurden mit Mitteln aus dem Feuerschutzsteueraufkommen bestritten, die von dem Land Baden-Württemberg auf Vorschlag der Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz der Deutschen Länder (AGF) im Einvernehmen mit der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (VFDB) bewilligt worden sind.

Besonderer Dank für die Unterstützung der Arbeit gebührt der AGF und der VFDB, da ohne die Bereitstellung der erheblichen Mittel die Ausführung der Versuche und damit eine Beteiligung Deutschlands an der großen grundlegenden Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonderer Dank und Anerkennung gebührt auch den Mitarbeitern der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe und des Laboratoriums für Feuer- und Brandschutz der Bundesanstalt für Materialprüfung für ihre Einsatzbereitschaft bei der im gegebenen Rahmen nur unter physiologisch schwierigen Bedingungen möglichen Versuchsausführung, sowie der Firma Carl Metz GmbH., Karlsruhe, für die

Überlassung einer Versuchshalle für die in Karlsruhe ausgeführten Versuche und der Berliner Feuerwehr für die Bereitstellung von Atemschutzgeräten.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm war in der Fire Research Station, Boreham Wood von Dr. Thomas und Mrs. Mather im Jahre 1961 aufgestellt worden. Unter Beteiligung von 10 Instituten sollten in etwa 500 Versuchen Erfahrungen über den Einfluß

der Raumgröße und -abmessungen,
der Ventilation,
der Größe der Brandlast und
der Brandlastverteilung

auf den Brandablauf und die Größe der Feuerbeanspruchung gewonnen werden. Die Größe der Modellbrandräume wurde von 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m (Breite x Länge x Höhe) bis zu 6 m x 6 m x 1,5 m variiert.

Als Brandlast wurden krippenartig angeordnete Stäbe aus Fichtenholz (mittlere Dichte 0,46...0,50 kg/m³) mit quadratischem Querschnitt verwendet (Bild 8); die Seitenlänge des Querschnitts betrug 1 cm, 2 cm oder 4 cm. Der Abstand der Stäbe in horizontaler Richtung wurde ebenfalls variiert, so daß der geringste Abstand ein Drittel der Kantenlänge, der größte Abstand den dreifachen Wert der Kantenlänge betrug. Die Brandlastverteilung wurde jedoch innerhalb der einzelnen Krippen nicht verändert.

Die Ventilation wurde dadurch variiert, daß die Vorderseite des sonst allseitig geschlossenen Brandraumes in unterschiedlicher Breite verschlossen wurde, so daß bei stets gleichbleibender Höhe der Öffnung, die der Brandraumhöhe entsprach, die symmetrisch zur Mitte frei bleibende Öffnungsbreite verändert wurde. Die Abdeckung der Vorderöffnung wurde so vorgenommen, daß jeweils 25 %, 50 %, oder 100 % der Öffnung frei

blieben. Neben der Änderung der Größe einer Seitenöffnung wurden von der britischen Versuchsanstalt, die über einen Windkanal verfügt, Versuche mit veränderter Windgeschwindigkeit und Windrichtung ausgeführt.

Die von den beiden deutschen Instituten übernommenen Versuche wurden systematisch in der Tabelle 1 zusammengestellt. Insgesamt wurden 120 Einzelversuche ausgeführt. Die deutschen Untersuchungen erstreckten sich auf Brandräume mit 1 m x 1 m x 0,5 m bis zu 3 m x 1,5 m x 1,5 m.

Die Auswertung aller Versuche liegt in den Händen der Fire Research Station in Boreham Wood, Großbritannien.

3. VERSUCHSAUSFÜHRUNG

Die Versuche wurden bei beiden Instituten in geschlossenen Hallen ausgeführt, um den Einfluß von Luftbewegungen nach Möglichkeit auszuschalten.

3.1. Versuchsanordnung und Messung des Abbrandes

Die Versuchsanordnung wird am Beispiel der in der BAM verwendeten Einrichtungen beschrieben. Der eigentliche Brandraum bestand aus einem tragendem Gerüst aus Stahlleichtprofilen, gegen die innen 10...14 mm dicke Asbesttafeln geschraubt wurden. Der Modellbrandraum wurde an einem Waagebalken frei aufgehängt und sein Gewicht wurde austariert. Die Lagerung des Waagebalkens erfolgte auf Schneiden aus Spezialstahl. Die Änderung des Gewichts des Modellbrandraums mit der Brandlast wurde mit einer Waage registriert, die an der freien Seite des Waagebalkens (Bild 3) angeordnet war. Die Anordnung der Versuchseinrichtung in der etwa 2000 m³ großen Brandhalle der BAM ist auf den Bildern 1 und 2 dargestellt. Der Brandraum war so in der Mitte dieser Halle angeordnet worden, daß ein wesentlicher Einfluß der Reflexion der von dem Brandraum ausgehenden Wärmestrahlung auf den Brandverlauf nicht zu erwarten war. Auf den

Bildern 4 und 5 ist die gesamte Versuchsanordnung mit der über der Modellbrandöffnung angeordneten Rauchabzugshaube abgebildet.

Da im Rahmen der ausgeführten Versuche der Abbrand nur durch Messen der Gewichtsänderung des Modellbrandkastens erfaßt werden konnte, ging in diese Messung der durch die erwärmte Luft und die entwickelten Brandgase verursachte Auftrieb in dem Brandraum als Meßfehler ein. Der weiterhin durch das Austrocknen der Kastenwände mögliche Meßfehler wurde dadurch im wesentlichen eliminiert, daß der Brandraum an jedem Versuchstag durch einen Vorversuch ausgetrocknet wurde. Es war daher möglich, einen scheinbaren Gewichtsverlust von 100 % zu messen, obwohl die veraschten Reste der Brandlast noch durch die Wägung erfaßt wurden.

3.2. Brandlast

Die für die Versuche benötigten Holzstäbe waren bis zum Erreichen ihrer Gewichtskonstanz im Normalklima 20/65 DIN 50 014 (20°C, 65 % relative Luftfeuchte) gelagert worden. Die als Brandlast verwendeten Holzkrippen wurden bis zur Versuchsausführung in diesem Klima belassen, so daß das für die Versuche verwendete Holz einen Feuchtegehalt von etwa 13 % (bezogen auf das Darrgewicht) hatte. Die einzelnen Holzstäbe mit jeweils gleichem Querschnitt wurden in definiertem Abstand nebeneinandergelegt, so daß die Brandlastverteilung¹⁾ in beiden Holzstabsrichtungen gleich war. Um einen definierten Abstand der Stäbe auch nach dem Einlegen der Holzkrippe in den Brandraum zu erhalten, war die unterste Lage der Stäbe an beiden Enden mit Nägeln geheftet, die übrigen Stäbe waren an den Kreuzungspunkten mit geringen Mengen von Kunstharzleim aneinandergesklebt. Die Stäbe der obersten Lage der Krippe wurden unabhängig

1) Die Bezeichnung der Brandlastverteilung erfolgt nach englischem Vorschlag; es bedeutet z.B. 2/3: Kantenlänge des Stabquerschnitts 2 cm/Stababstand untereinander dreifache Kantenlänge (d.h. 6 cm); s.a. Erläuterung zu Tabelle 1.

von dem Sollabstand gleichmäßig verteilt. Die Stablänge betrug stets $\frac{5}{6} l$ bzw. $\frac{5}{6} b$, so daß der Abstand zwischen der Holzkrippe und der Wandung des Brandraumes jeweils $\frac{1}{12} l$ bzw. $\frac{1}{12} b$ betrug.

Für die Zündung der Holzkrippe wurden mit Petroleum getränkte 10 mm breite Streifen aus 12 mm dicken Holzfaserdämmplatten verwendet. Die Tränkung der Streifen, die eine Länge von $\frac{5}{6} l$ hatten, erfolgte mit 1 cm^3 Petroleum je cm Länge. In jeden Zwischenraum der untersten Lage der Holzstäbe wurde ein getränkter Streifen so eingelegt, daß ihre Zündung nahezu gleichzeitig erfolgen konnte. Das Gewicht der ungetränkten Zündstreifen war in der Sollbrandlast enthalten. Bild 8 zeigt die eingelegten Zündstreifen vor ihrer Zündung, Bild 10 zeigt den von ihnen ausgehenden Flammenübergreif auf die Holzstäbe der Krippe.

3.3. Temperaturmessung

Während der Versuche wurde in dem Brandraum die Temperatur an zwei Stellen auf der Senkrechten über dem Schnittpunkt der Grundflächendiagonalen, und zwar in den Viertelpunkten der Höhe, mit Thermoelementen gemessen (ihre Lage ist auf Bild 1 angegeben). Zusätzlich wurden unterhalb der Deckenplatte in 10 cm Abstand bei einigen Versuchen weitere Temperaturmessungen ausgeführt.

Es wurde ferner bei einigen Versuchen die Temperatur der ausströmenden Rauchgase gemessen.

3.4. Messung der Wärmestrahlung

Die von der Fensteröffnung ausgehende Wärmestrahlung wurde mit einem von der Fire Research Station entwickelten Wärmestrahlungspyrometer gemessen¹⁾. Das Meßgerät war so abgeschirmt, daß es

1) Webster/Gregsten: A Disc-Type Radiometer. Instruments in Industry, April 1956.

die über die obere Kante des Brandraumes hinausschlagenden Flammen nicht mehr erfassen konnte, so daß lediglich die von dem Brandraum selbst ausgehende Wärmestrahlung gemessen wurde. Es war in einem Abstand, der der Breite des Brandraumes entsprach, vor der Brandraumöffnung aufgestellt worden.

Ein weiteres gleichartiges Strahlungs-pyrometer wurde in $\frac{1}{10}$ der Brandraumhöhe oberhalb der Öffnung angeordnet. Die Lage beider Pyrometer ist auf Bild 1 angegeben.

Die Meßgeräte waren nicht gekühlt. Ihr Gehäuse bestand aus Messing mit relativ großer Wanddicke, das außen zur Reflexion der Wärmestrahlung blank verchromt war.

Der infolge der Erwärmung des Gehäuses unvermeidbare Fehler war bei der Eichung des Prototyps der Meßgeräte, der von der Fire Research Station zur Verfügung gestellt worden war, bereits berücksichtigt worden. Die angegebenen Werte für die Strahlungsflußdichten sind daher als Vergleichswerte aufzufassen.

Um einen Anhaltspunkt über die Größe des Meßfehlers zu erhalten, wurde bei einigen Versuchen die Gehäusetemperatur der Pyrometer zusätzlich gemessen.

4. VERSUCHSERGEBNISSE

Als Versuchsergebnisse wurden der zeitliche Verlauf der Brandraumtemperatur, der Wärmestrahlung und des Gewichtsverlustes ermittelt.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wurde der Verlauf dieser Meßwerte von 40 Versuchen graphisch in den Bildern Z 1 bis Z 12 (Anhang A) dargestellt. In diesen Zeichnungen sind die Meßwerte aller Versuche mit einer Brandlastverteilung 2/1 (d.h. Kantenlänge der Stäbe $d = 2$ cm, lichter horizontaler Stababstand $a = 2$ cm), die sowohl in Karlsruhe als auch in Berlin in Wiederholungs- und Vergleichsversuchen ermittelt worden sind, aufgetragen.

Unabhängig von der graphischen Darstellung werden die zusammengefaßten Meßwerte im Anhang B aufgeführt. Es werden folgende charakteristischen Meßwerte angegeben:

- a) Die Zeit, nach der nur noch eine Restbrandlast von 80 %, 55 % bzw. 30 % vorhanden ist, bezeichnet mit t_{80} , t_{55} bzw. t_{30} , da in der Zeitspanne $t_{30} - t_{80}$ die Abbrandgeschwindigkeit der Holzkrippen relativ konstant und in nur geringem Maße von kleineren Veränderungen der Umweltbedingungen abhängig ist.
- b) Der mittlere Gewichtsverlust je Zeiteinheit, d.h. die mittlere Abbrandgeschwindigkeit innerhalb der Zeiten t_{80} und t_{55} bzw. t_{55} und t_{30} , bezeichnet mit $R_{80/55}$ bzw. $R_{55/30}$. Die mittlere Abbrandgeschwindigkeit wurde nach der Formel

$$R_{a/b} = \frac{0,25 Q_{ges}}{t_b - t_a} \quad (1)$$

berechnet.

Besondere Korrekturen für den Auftrieb durch die infolge der Erwärmung veränderte Luft- bzw. Rauchgasdichte innerhalb des Brandraumes wurden nicht vorgenommen, weil in der Zeitspanne $t_{30} - t_{80}$ keine wesentlichen Veränderungen der Dichteverhältnisse erfolgten.

- c) Die mittlere Strahlungsflußdichte innerhalb der Zeiten t_{80} und t_{55} bzw. t_{55} und t_{30} , bezeichnet mit $I_{80/55}$ bzw. $I_{55/30}$. Die mit dem direkt vor der Öffnung des Brandraumes aufgestellten Gerät gemessene, vom Brandraum ausgehende Strahlungsintensität wurde mit dem Index "o", die mit dem oberhalb des Brandraumes angeordneten Gerät gemessene Strahlungsintensität der aus dem Brandraum herausschlagenden Flammen wurde mit dem Index "f" bezeichnet.

Der Mittelwert der Strahlungsflußdichte in den gegebenen Bereichen wurde graphisch nach der Beziehung

$$I_{a/b} = \frac{1}{t_b - t_a} \int_a^b I_t \cdot dt \quad (2)$$

ermittelt.

- d) Die mittlere Temperatur an den Brandraummeßstellen auf der Verbindungslinie der Kreuzungspunkte der Oberflächediagonalen des Brandraumbodens und der -decke während der Zeiten $t_{80} \dots t_{55}$ und $t_{55} \dots t_{30}$, bezeichnet mit $\vartheta_{80/55}$ und $\vartheta_{55/30}$. Es erhalten die im Abstand von 0,25 h über dem Brandraumboden gemessenen Werte den Index "b", die im Abstand von 0,75 h über dem Boden gemessenen Werte den Index "c". Der Mittelwert der Temperatur in den angegebenen Bereichen wurde graphisch nach der Beziehung

$$\vartheta_{a/b} = \frac{1}{t_b - t_a} \int_a^b \vartheta_t \, dt \quad (3)$$

ermittelt.

5. AUSWERTUNG

Da im Rahmen dieses Berichtes nur die in Deutschland ausgeführten Versuche, d.h. etwa 25 % des vollständigen Versuchsprogrammes, erfaßt werden können, ist eine endgültige Aussage nicht möglich. Die im folgenden mitgeteilten Ergebnisse haben daher nur allgemeinen Charakter; es ist jedoch möglich, aus diesen Angaben bereits die Tendenzen der endgültigen späteren Auswertung abzulesen.

5.1. Branddauer

Unter der Branddauer t_D wird im folgenden die Zeit vom Zünden der Brandlast bis zu ihrem vollständigen Abbrand verstanden. Während der Zeitpunkt der Zündung eindeutig festzustellen ist,

kann der Zeitpunkt des vollständigen Abbrandes nur aufgrund der Meßwerte, insbesondere des Gewichtsverlustes ermittelt werden. Es kann für diese Ermittlung davon ausgegangen werden, daß etwa 8 % der ursprünglichen Brandlast als Rückstand in dem Brandraum verbleiben. Unter Berücksichtigung des in die Gewichtsmessung eingehenden Meßfehlers infolge des Auftriebs durch die erwärmte Luft und die Brandgase (s. auch Abschnitt 3.1) wird im folgenden als Zeitpunkt des vollständigen Abbrandes die Zeit des Erreichens eines Restgewichtes von 5 % der ursprünglichen Brandlast, bezeichnet mit t_5 , angenommen.

Wie aus der Literatur bekannt und auch aus den graphischen Darstellungen der Meßwerte (Bilder Z 1 ... Z 10) ersichtlich ist, verläuft der Gewichtsverlust bei dem Abbrand von Holz stets nach der in Bild 6 dargestellten charakteristischen Funktion, so daß nach dem Abbrand von 20 % der ursprünglich vorhandenen Brandlast die weitere Abbrandgeschwindigkeit R , d.h. der Gewichtsverlust in der Zeiteinheit, nahezu konstant verläuft. Erst nach einem Gewichtsverlust von etwa 70 % nimmt die Abbrandgeschwindigkeit ab.

Unter der Annahme, daß die Branddauer $t_D = t_5$ ist, ergibt sich aus dem Verlauf des Abbrandes die Beziehung

$$t_D = t_A + t_H + t_E \quad (4)$$

Dabei ist

$$t_A = t_{80} = \int_{100}^{80} \frac{dq}{R} \quad , \quad (5)$$

$$t_H = \frac{q \cdot b \cdot l}{2 \cdot R_{80/30}} \quad , \quad (6)$$

$$t_E = \int_{30}^5 \frac{dq}{R} \quad . \quad (7)$$

Die Branddauer wird daher von der Abbrandgeschwindigkeit, die eine Funktion der Brandraumabmessungen, Ventilation, Größe der

Brandlast und ihrer Verteilung ist, maßgeblich bestimmt.

5.2. Abbrandgeschwindigkeit

Die Gesetzmäßigkeit für den Abbrand ist in den verschiedenen Stadien des Brandes nicht gleich, da insbesondere die Menge des für die Verbrennung erforderlichen Sauerstoffes von der Größe der Brandentwicklung abhängig ist. Die im vorigen Abschnitt aufgeführten Faktoren werden sich dementsprechend in den Brandstadien t_A , t_H und t_E unterschiedlich auswirken.

5.2.1. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_H

Der Schwerpunkt der Auswertung der Modellbrandversuche betraf bisher den Bereich des gleichmäßigen Abbrandes in der Brandphase t_H . Von früheren Versuchen war bereits bekannt [s.1 und 2], daß bei kleinen Fensterflächen die Abbrandgeschwindigkeit fast ausschließlich von der Ventilation, d.h. von den Fensterabmessungen, abhängig ist, und es wurde von Thomas [3] die Beziehung

$$R = K A_F \sqrt{h_F} \quad (8)$$

festgestellt; die Größe der Konstanten K wurde mit

$$K = 5 \dots 6 \text{ kg m}^{-\frac{5}{2}} \text{ min}^{-1}$$

ermittelt. Aufgrund der jetzt ausgeführten Versuchsserie läßt sich diese Beziehung jedoch nicht für Räume mit größeren Fensteröffnungen anwenden, da die Abbrandgeschwindigkeit in diesen Fällen auch von der Brandlast und -verteilung und Raumgröße, insbesondere Raumtiefe, wesentlich beeinflusst wird. Es wurde bereits aufgrund der von anderen Instituten ausgeführten Versuche, insbesondere von Robertson und Groß (USA) sowie Thomas, Heselden und Smith (Großbritannien) untersucht, ob die Beziehung zwischen Abbrandgeschwindigkeit

und Fensterabmessungen nicht durch Einbeziehung der Oberfläche der Brandlast und der Brandraumabmessungen in die Formel erweitert werden kann. Es stellte sich jedoch heraus, daß ohne Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aller Institute eine sichere Aussage noch nicht gemacht werden kann.

5.2.2. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_A

Das Brandstadium $t_A = t_{80}$, in dem die Abbrandgeschwindigkeit von $R = 0$ auf ihr Maximum $R_{80/30}$ gesteigert wird, ist in erster Näherung die Zeit bis zum Feuerübersprung (flash over). Diese Zeit bis zum Abbrand von 20 % wird wesentlich von der Ventilation, der Brandlastverteilung und der Größe der Brandlast bestimmt. In Bild 7 ist aufgrund der gemittelten Meßwerte der Versuchsreihe D die Abhängigkeit dieser Zeit t_{80} von der Brandlast mit den Parametern Brandlastverteilung und Ventilation graphisch dargestellt. Es stellte sich heraus, daß für das gewählte Beispiel die Funktion

$$t_{80} = K_A \sqrt[3]{\frac{A}{A_F}} q^{0,6} \quad (9)$$

sich den durch Versuche ermittelten Werten gut anpaßt. Der Faktor K_A ist, wie ein Vergleich mit den übrigen in diesem Bericht erfaßten Versuchsergebnisse ergab, insbesondere abhängig von der Brandlastverteilung und dem Verhältnis Fensterhöhe : Brandraumtiefe. Für das untersuchte Beispiel mit

$$\frac{h_F}{l} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

war

$K_A \approx 0,9 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ min}$ bei der Brandlastverteilung 2/1
und

$K_A \approx 0,5 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ min}$ bei der Brandlastverteilung 1/3
und 2/3 .

Bei einer Änderung des Maßstabes der Modellkästen änderte sich

nicht die Zeit t_{80} bei sonst gleichen Verhältnissen.

Es ist anzunehmen, daß die Funktion der Abbrandgeschwindigkeit in dem Brandstadium t_A der in dem Stadium t_H bei voller Ventilation ähnlich ist, d.h. wenn der Brand sich ohne Sauerstoffmangel ausbreiten kann.

5.2.3. Abbrandgeschwindigkeit im Brandstadium t_E

Die Dauer dieses Brandstadiums scheint in erster Linie von der Größe der Ventilationsöffnung abhängig zu sein. Ferner besteht eine gewisse Relation zwischen der Branddauer bis zum Abbrand von 70 % der Brandlast, d.h. der Zeit t_{30} , und der Dauer t_E des letzten Brandstadiums. Aufgrund der in Deutschland ausgeführten Versuche scheint unter den gegebenen Voraussetzungen die Beziehung

$$t_E = K_E t_{30} \quad \text{mit} \quad (11)$$

$$K_E \approx 0,5 \dots 0,6 \text{ bei Ventilation } \frac{A_F}{A} = \frac{1}{4}$$

$$\text{und } K_E \approx 0,7 \dots 0,9 \text{ bei Ventilation } \frac{A_F}{A} = \frac{1}{2}$$

(die größeren Werte wurden bei größerer Brandlast festgestellt)

zu bestehen.

5.2.4. Gesamtbranddauer

Es konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Branddauer und der Größe der Brandlast nachgewiesen werden. Bei Räumen mit schlechten Ventilationsmöglichkeiten, d.h. bei Räumen mit den Abmessungen

$$\frac{\text{Fensterfläche}}{\text{Grundfläche}} \leq 0,25$$

$$\text{und } \frac{\text{Fensterbreite}}{\text{Raumbreite}} \leq 0,25$$

ist die Abbrandgeschwindigkeit in der Hauptbrandphase im wesentlichen unabhängig von der Brandlast und ihrer Verteilung konstant, so daß die Branddauer direkt proportional der Größe der Brandlast ist. In diesen Fällen wurde bei den Versuchen eine Branddauer ermittelt, die der Funktion

$$t_D \approx 1,6 \left(0,9 \sqrt[3]{\frac{A}{A_F}} q^{0,6} + \frac{q \cdot b \cdot l}{10 A_F \sqrt{h_F}} \right) [\text{min}] \quad (12)$$

entsprach.

Mit verbesserter Ventilation nimmt der Einfluß der Brandlastverteilung, Raumtiefe und Ventilation zu, so daß die Größe der Brandlast nicht mehr in überwiegendem Maße die Branddauer bestimmt. Wegen der Vielzahl der Einflüsse bedarf es wahrscheinlich noch weiterer Untersuchungen, um eine gesicherte Aussage über die die Branddauer bestimmenden Einflüsse machen zu können.

5.3. Zum Aufheizen des Brandraumes erforderliche Energie

Für die Untersuchung des Problems, welche Anforderungen an Bauteile, bezogen auf die Klassifizierung nach DIN 4102, aufgrund gegebener Verhältnisse innerhalb eines Brandabschnittes zu stellen sind, ist die Frage nach der Voraussetzung für eine Brandentwicklung nach der Einheitstemperaturkurve der DIN 4102, Bl.2 (1965) von besonderem Interesse. Aufgrund der in Deutschland ausgeführten Versuche konnte in einigen Fällen einer dichten Brandlastverteilung (2/1, 4/1, 2/1/3) festgestellt werden, daß bei großer Fensteröffnung und geringer Raumtiefe (Versuchsreihe C) bei einer Brandlast von 20 kg/m² die Temperatur unterhalb der Decke die für das Auftreten des Feuerübersprungs erforderliche Höhe von 600...700°C nicht oder nur kurzfristig erreichte. Bei einer Vergrößerung der Brandlast auf 30 kg/m² wurde der Temperaturbereich von 600...700°C zum Teil überschritten, bei einer weiteren Vergrößerung auf 40 kg/m² blieb die Brandraumtemperatur nur bei der sehr dichten Anordnung der Stäbe (2/1/3) unterhalb des genannten Temperaturbereiches.

In den Fällen, in denen die Brandraumtemperatur die Feuerübergangsgrenze überschritten hatte, wurde der Temperaturbereich von etwa 1000°C erreicht, nachdem bereits ein Gewichtsverlust von 25...50 % der ursprünglichen Brandlast aufgetreten war, und zwar wurde der geringere Wert bei den besseren Ventilationsbedingungen gemessen. Es ist daraus zu erkennen, daß ein erheblicher Teil der gesamten Brandlast benötigt wird, um den Brandabschnitt zu erwärmen, so daß er nur eine geringere Auswirkung auf die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile hat; ihre besonders hohe Beanspruchung erfolgt insbesondere in den Fällen schlechter Ventilationsbedingungen durch die verbleibende restliche Brandlast von 50...75 %.

5.4. Ausblick auf weitere Auswertungen

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wurden insbesondere keine Angaben über die Auswertung der Meßwerte der Wärmestrahlung gemacht, weil der Umfang der Versuche bei der großen Variation der den Brandablauf beeinflussenden Parameter zu gering ist. Ferner ist gerade die unvermeidbare Streuung der Meßwerte so groß, daß über die bereits veröffentlichten Ergebnisse hinausgehende Auswertungen zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu große Unsicherheiten beinhalten, so daß möglicherweise wesentliche Einflüsse auch bei der Variation der Parameter nicht berücksichtigt werden.

Die von der Fire Research Station in Boreham Wood (Großbritannien) zur Zeit vorgenommene Auswertung aller Daten wird in absehbarer Zeit eine wesentliche Ergänzung und wahrscheinlich auch Berücksichtigung der hier aufgeführten Versuchsergebnisse bringen. Es ist ferner vorgesehen, in einem weiteren internationalen Versuchsprogramm vorhandene Unklarheiten zu beseitigen und die bei der Auswertung im größeren Rahmen entdeckten Lücken zu schließen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe und von der Bundesanstalt für

Materialprüfung (BAM), Berlin, 120 Versuche im Rahmen eines etwa 500 Versuche umfassenden internationalen Modellbrandversuchsprogrammes zum Studium der Entwicklung von Bränden in geschlossenen Räumen ausgeführt. Die Modellräume hatten einen Rauminhalt von 1 m^3 bis zu $13,5 \text{ m}^3$ und waren einseitig mit unterschiedlich großer Ventilationsöffnung versehen. Die Brandlast bestand aus gleichmäßig verteilt angeordneten Holzstäben mit einem Flächengewicht von 20 bis 40 kg/m^2 .

Im Rahmen dieser Auswertung wurde insbesondere die Branddauer unter dem Einfluß der Brandlast, ihrer Verteilung und der Ventilation betrachtet und für den Fall geringer Ventilation wurde eine empirisch ermittelte Formel angegeben. Es wurde ferner auf die in den Versuchen festgestellte untere Grenze der Brandlast, die zur Erzeugung eines voll entwickelten Brandes erforderlich ist, hingewiesen.

Weitere Auswertungen der Versuche zusammen mit den Ergebnissen, die von ausländischen Instituten ermittelt wurden, werden von dem britischen zentralen Brandschutzforschungsinstitut ausgeführt.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hinrichs, B.R.: Probleme der Modellbrandtechnik.
VFDB-Zeitschrift, 14 (1965), Nr.2,
S.42-50.
- [2] Seekamp, H.: Die Erforschung der Entwicklung von
Bränden in einzelnen Räumen mit Hilfe
von Modellen.
Brandverhütung und Brandbekämpfung,
15 (1965), Nr. 3, S.35-38.
- [3] Thomas, P.H.: Über neuere Untersuchungen von Bränden
in Modellen.
VFDB-Zeitschrift, 10 (1961), Nr. 4,
S.146-154.

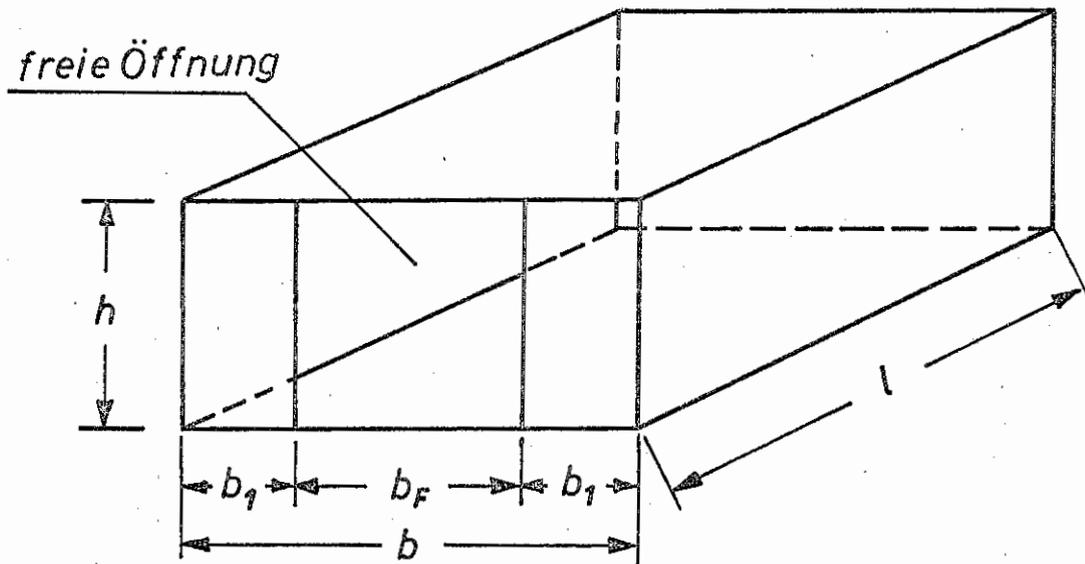
Tabelle 1. Übersicht über das Versuchsprogramm

Versuchs- serie	Brandraum- abmessungen			Ventila- tionsöff- nung		Fenster- anteil	Brandlast			Versuchs- zahl (ins- gesamt)	Bezeichnung der Einzelversuche		Zu Anhang A:								
	b	l	h	b ₁	b _F	$\frac{A_F}{A}$	d	a	q		Versuchs- reihe 1)	Versuchs- nummer	Diagramm Nr. des Tempera- turverlaufes	Bild Nr. des Ver- suchsab- laufes							
	cm			cm			cm			kp/m ²											
A	100	100	50	37,5	25	1/4	1	3	20	1	(1)	31.....39									
							2	2		1											
							2	6		1											
				25	50	1/2	1	3		1											
							2	2		1											
							2	6		1											
				0	100	1	1	3		1											
							2	2		1											
							2	6		1											
														27.....39							
B	100	200	100	37,5	25	1/4	2	2	20,30,40	9	(2)	1.....13									
				25	50	1/2				3											
				0	100	1				9					(3)	1.....8					
C	200	100	100	75	50	1/4	2	2	20,30,40	11	(1)	1.....8	Z 1, 2								
				50	100	1/2				3					(2)	27.....35					
				0	200	1				11					(3)	9...16	Z 3, 4				
D	200	200	100	75	50	1/4	1	3	20,30,40	3	(1)	9.....30	Z 5,6,9,10,11	15.....22							
							2	2		10											
							2	6		3					Z 12	8.....14					
				50	100	1/2	2	2		3											
							0	200		1					1	3	3	(2)	14.....26	Z 7, 8, 11	23.....26
															2	2	10				
2	6	3	Z 12																		
E	300	150	150	112,5	75	1/4	1	3	20,30,40	3	(3)	17.....46									
							2	0,67		3											
							2	2		3											
				2	6	3															
				4	4	3															
				0	300	1	1	3		3											
							2	0,67		3											
							2	2		3											
				2	6	3															
4	4	3																			

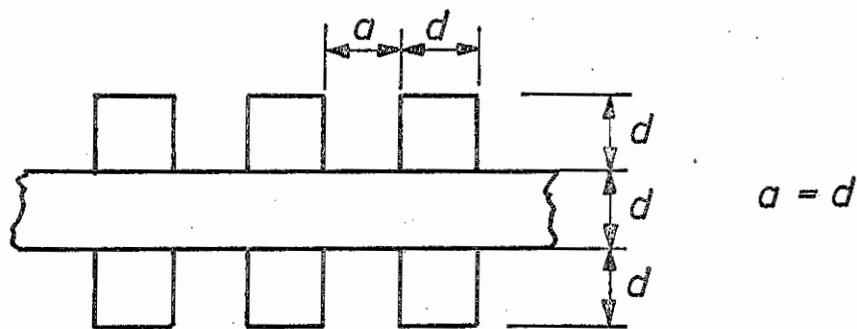
1) Versuchsreihe 1 ausgeführt von der Bundesanstalt für Materialprüfung; Versuchsreihe 2 und 3 von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der T. H. Karlsruhe

Erläuterung der Angaben in Tabelle 1:

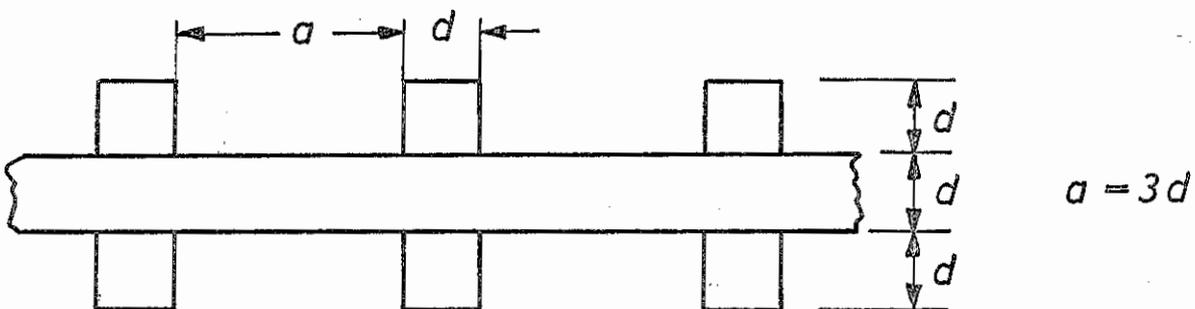
a) Brandraum mit Ventilation (Fensteranteil) $\frac{A_F}{A} = \frac{1}{2}$
(Beispiel)



b) Brandlastverteilung 2/1 oder 4/1 (nicht maßstäblich)



c) Brandlastverteilung 1/3 oder 2/3 (nicht maßstäblich)



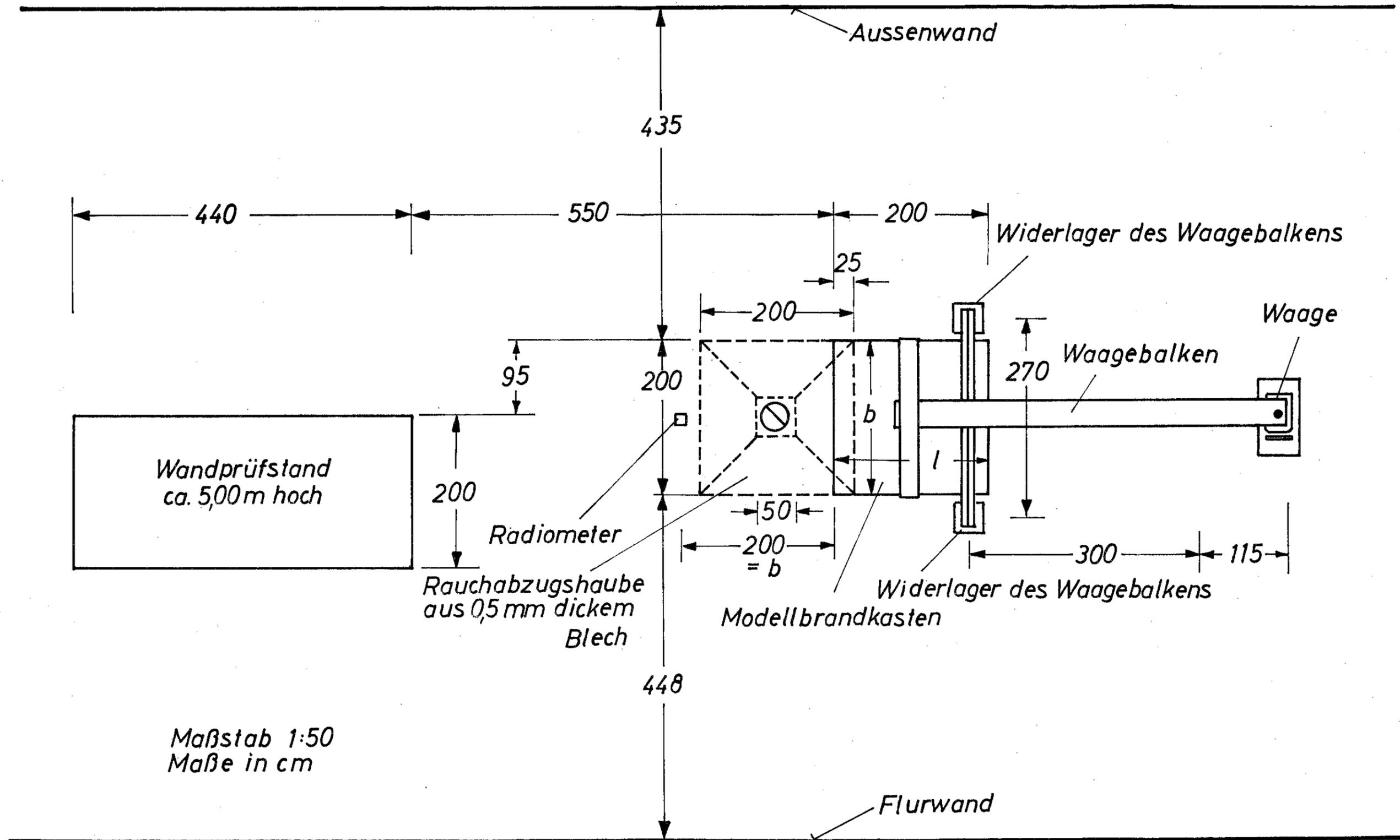


Bild 2. Lageplan der Versuchseinrichtung der BAM am Beispiel 221, Maßstab 1 m, Grundriss

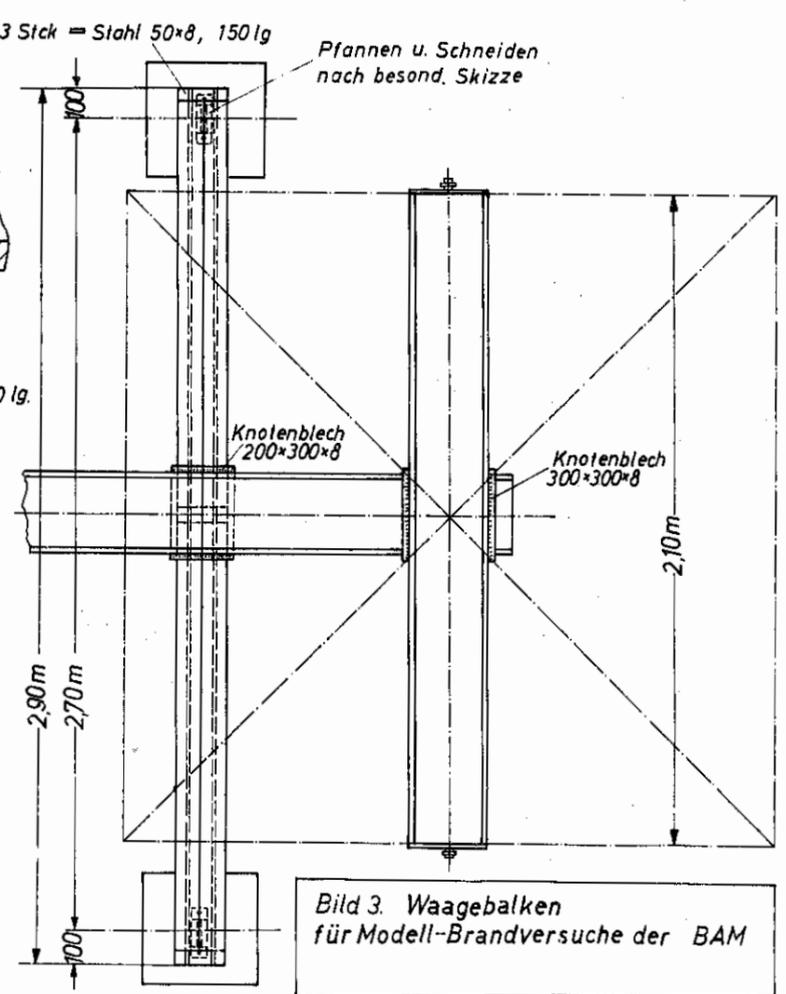
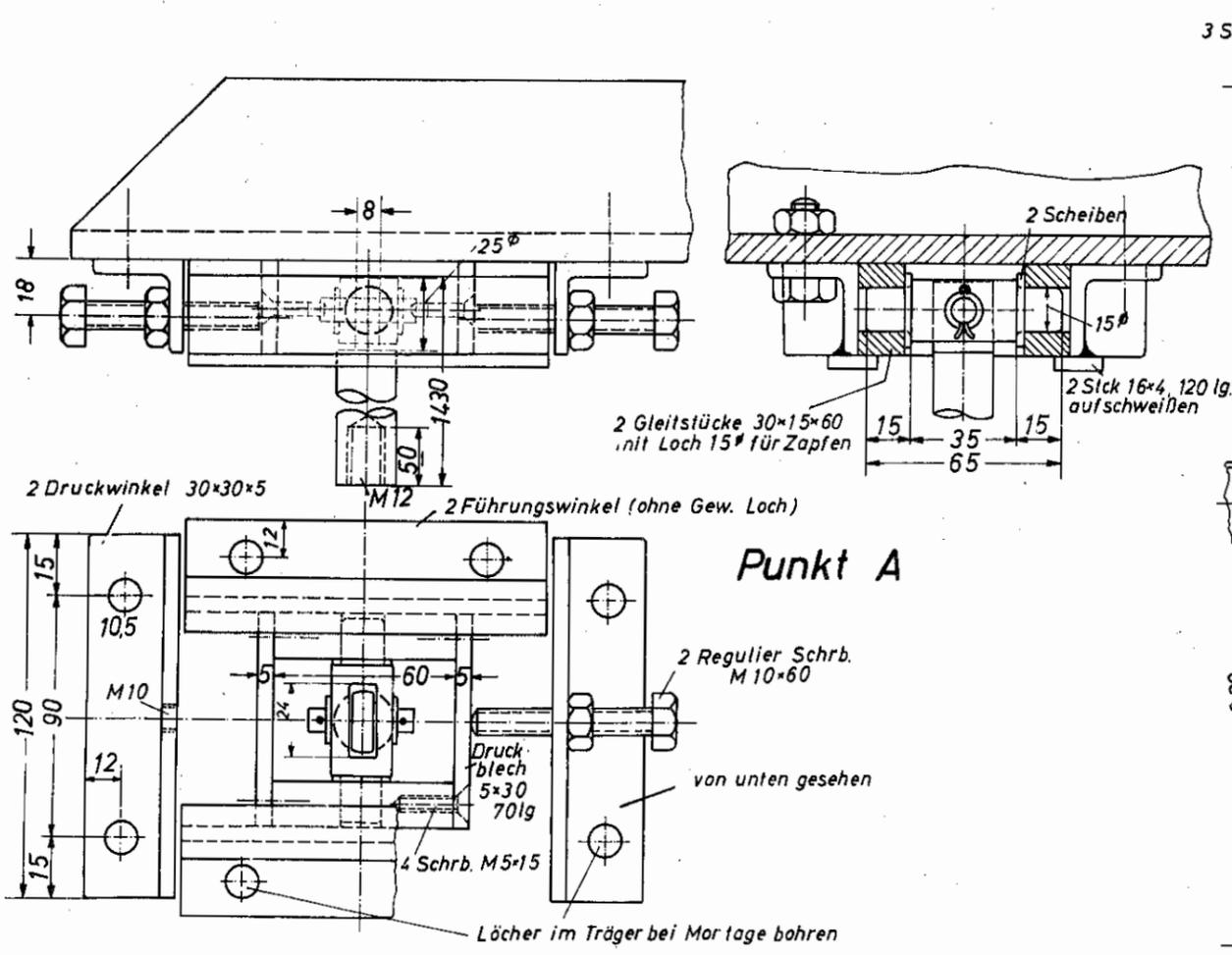
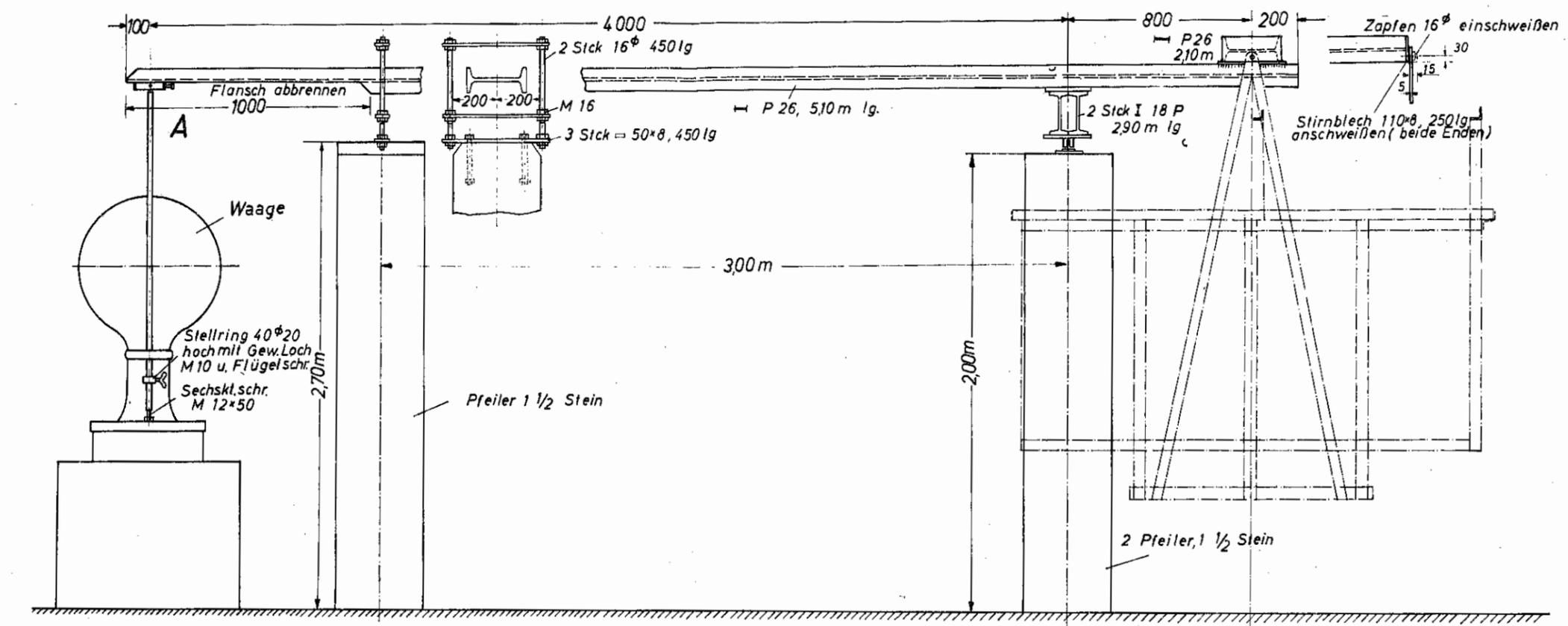


Bild 3. Waagebalken für Modell-Brandversuche der BAM

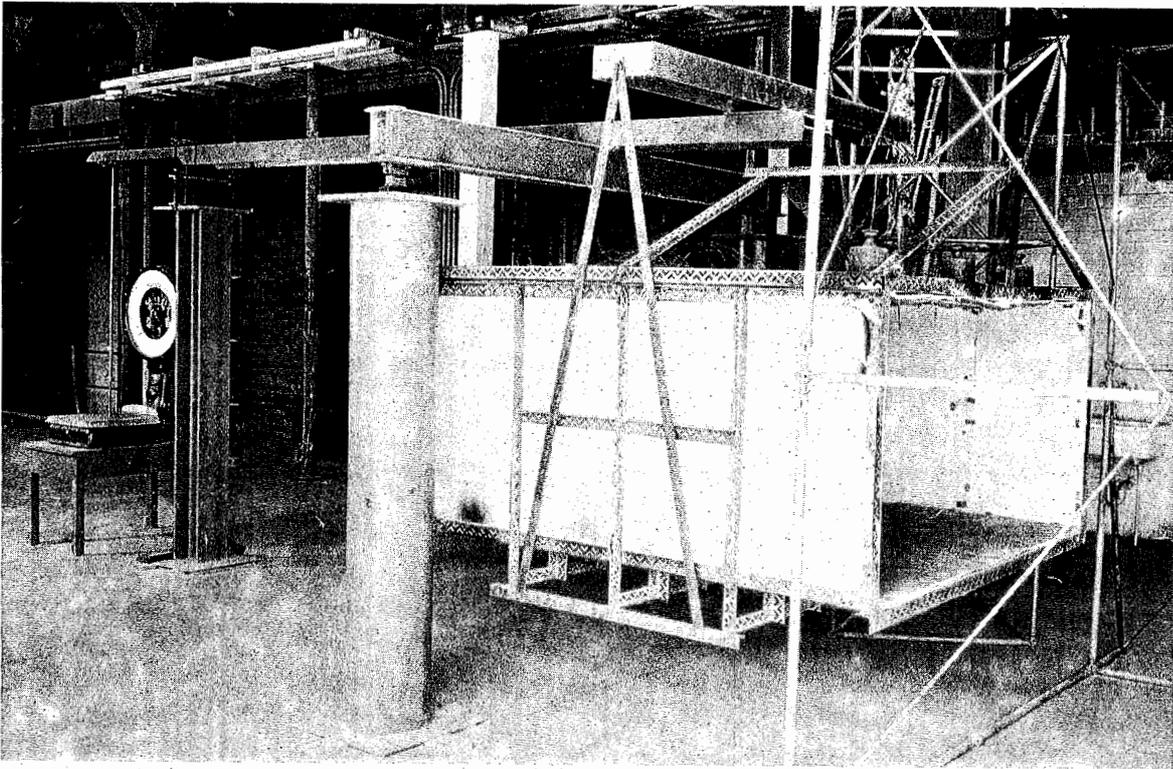


Bild 4. Brandwaage mit Modellbrandkasten, Größe 2 m x 2 m x 1 m

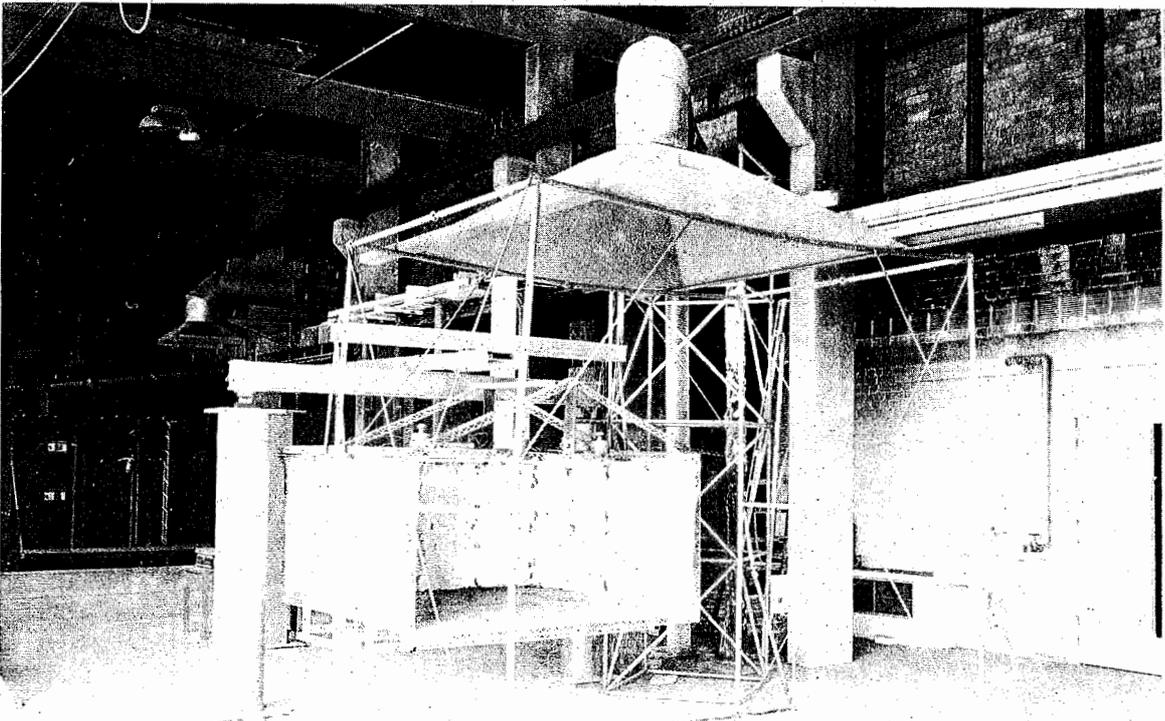


Bild 5. Brandwaage mit Modellbrandkasten 2 m x 2 m x 1 m und Rauchabzugshaube

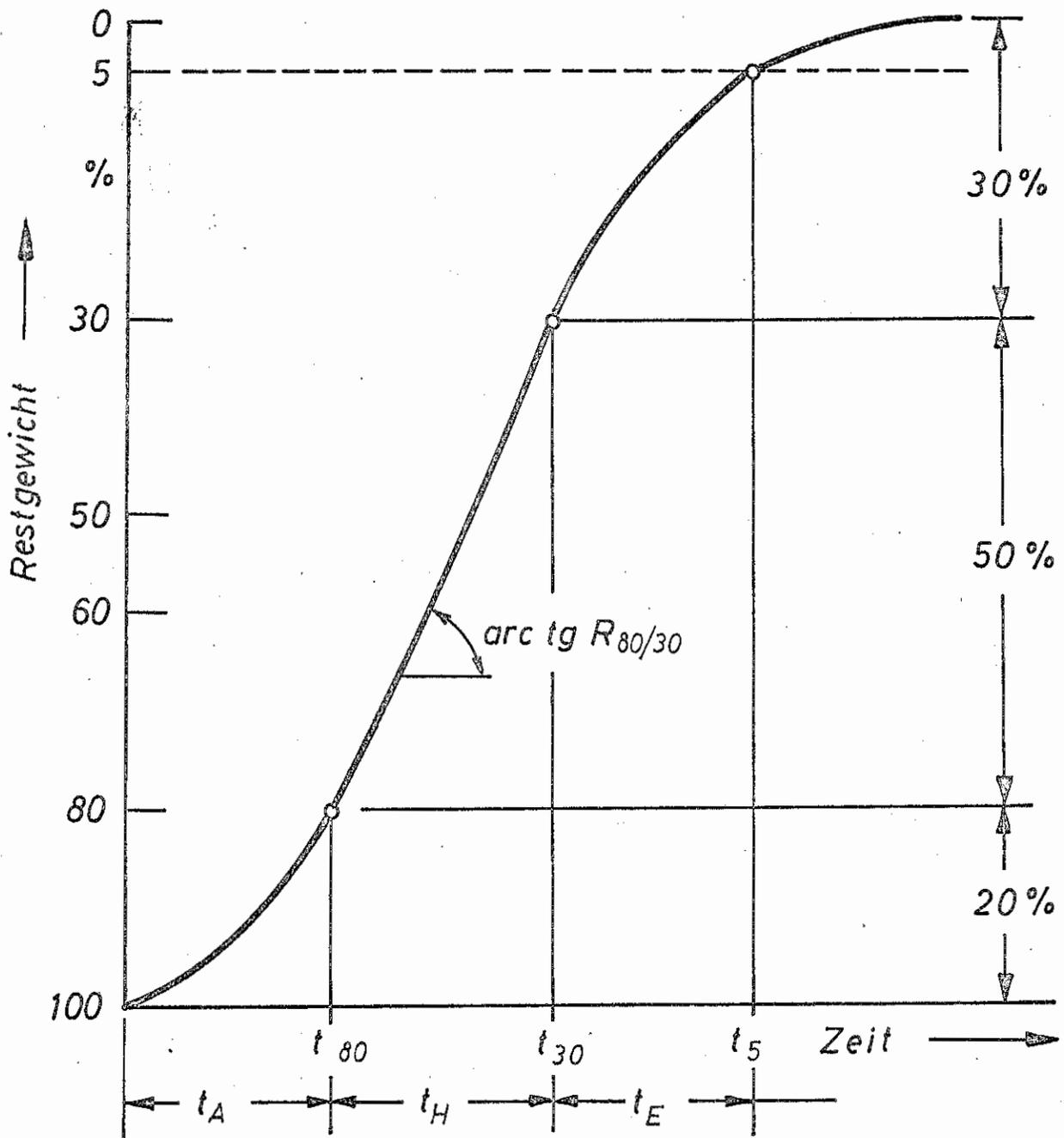


Bild 6. Charakteristischer Verlauf der Gewichtsabnahme bei dem Abbrand von Holz bei den Modellbränden

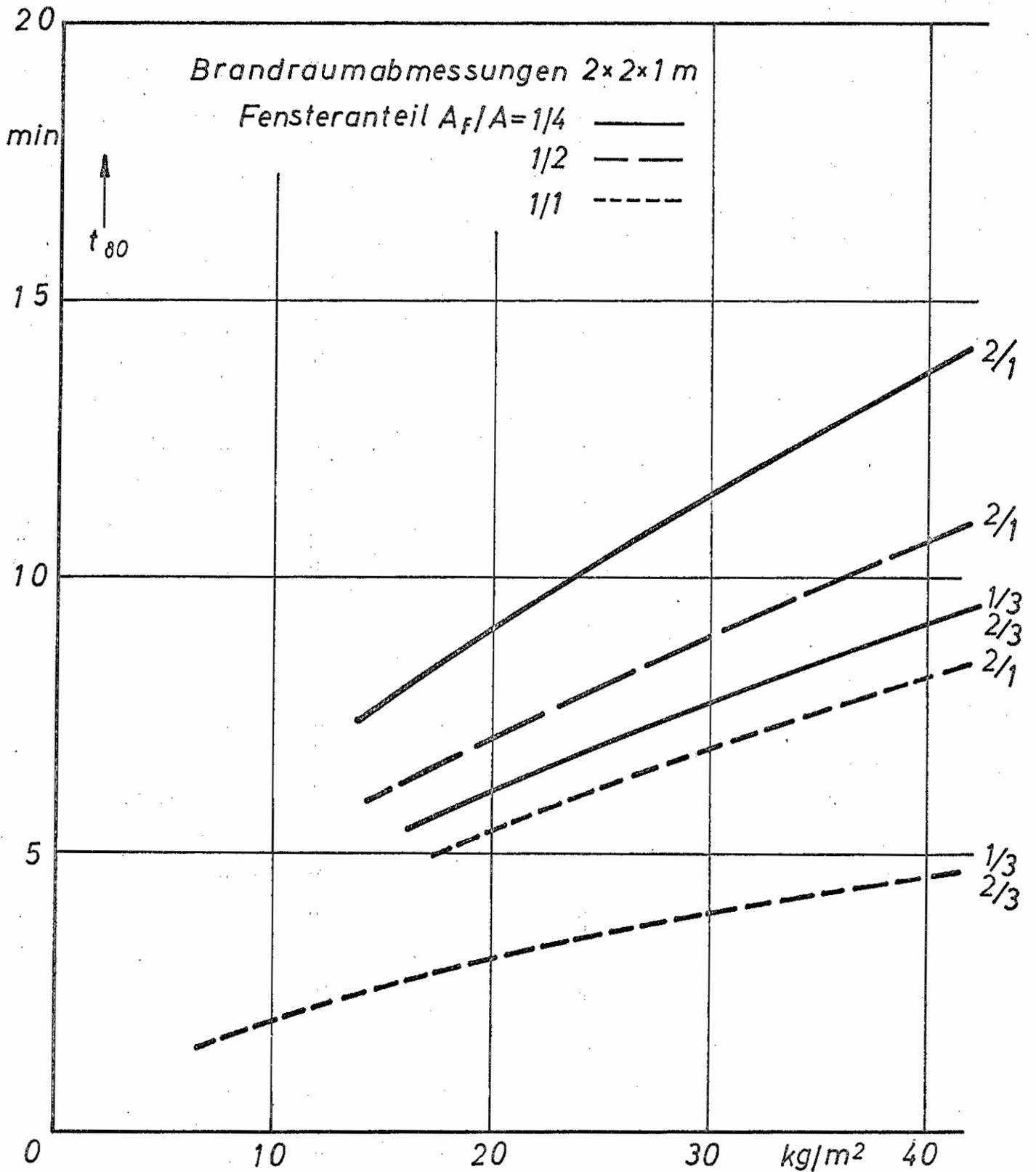


Bild 7. Zeit t_{80} bis zum Erreichen einer Restbrandlast von 80 % in Abhängigkeit von der Brandlast, Brandlastverteilung und Ventilation

Bildfolge von dem
Versuch (1) 23

Versuchsserie D

Brandraumgröße 2 m x 2 m x 1 m

Fensteranteil $\frac{A_F}{A} = \frac{1}{4}$

Brandlast $q = 40 \text{ kg m}^{-2}$

Brandlastverteilung 2/3 (d = 2 cm, a = 6 cm)

Versuch (1) 23

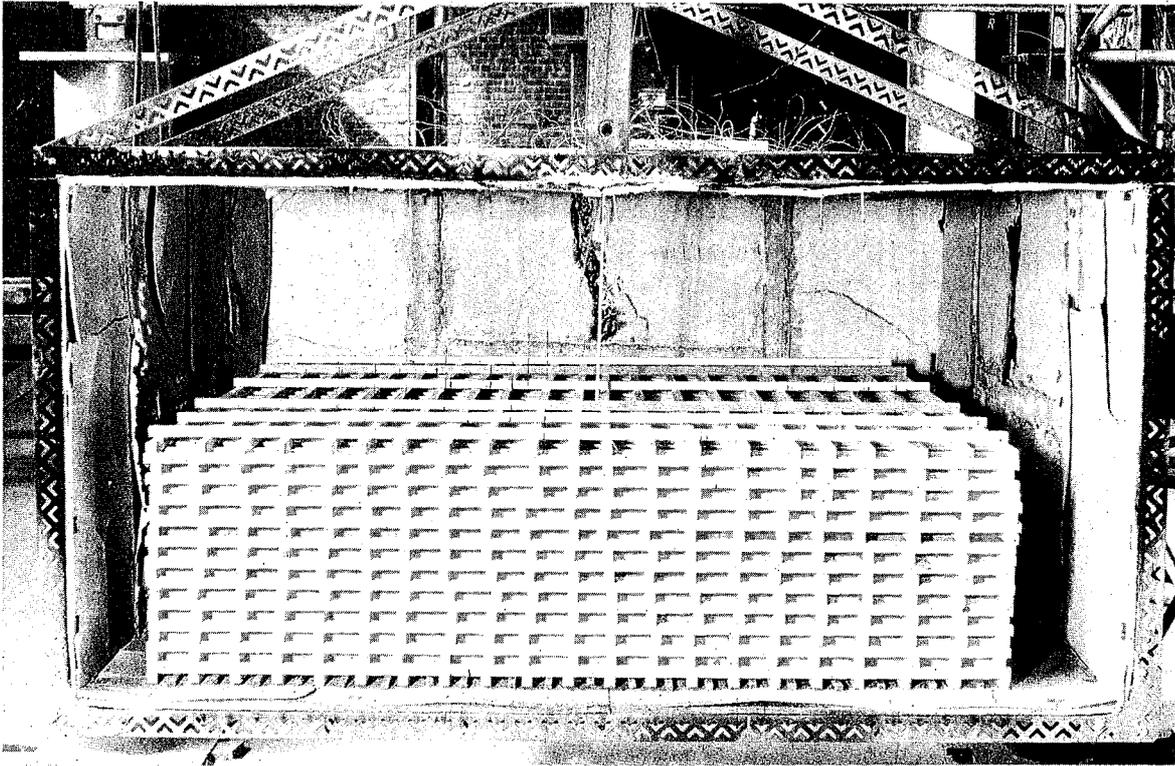


Bild 8. Aussehen vor dem Anbringen der $1/4$ Öffnung

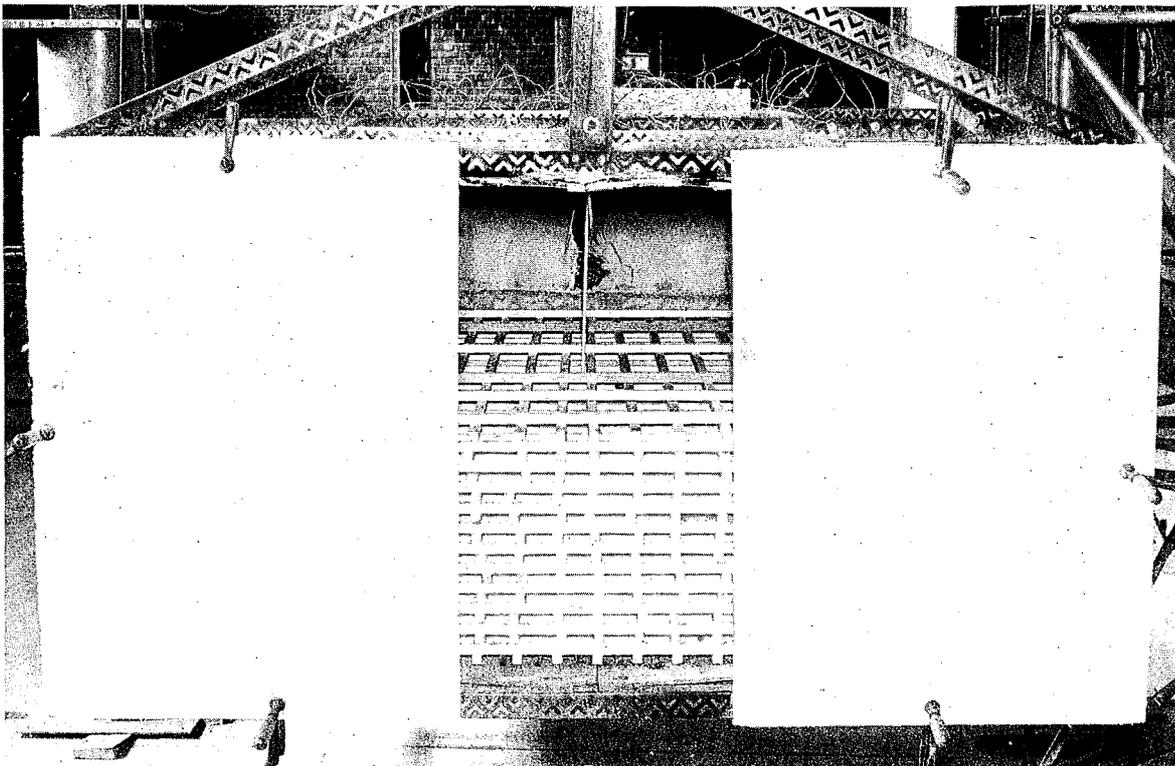


Bild 9. Aussehen vor dem Versuch mit $1/4$ Öffnung

Versuch (1) 23 (Fortsetzung)

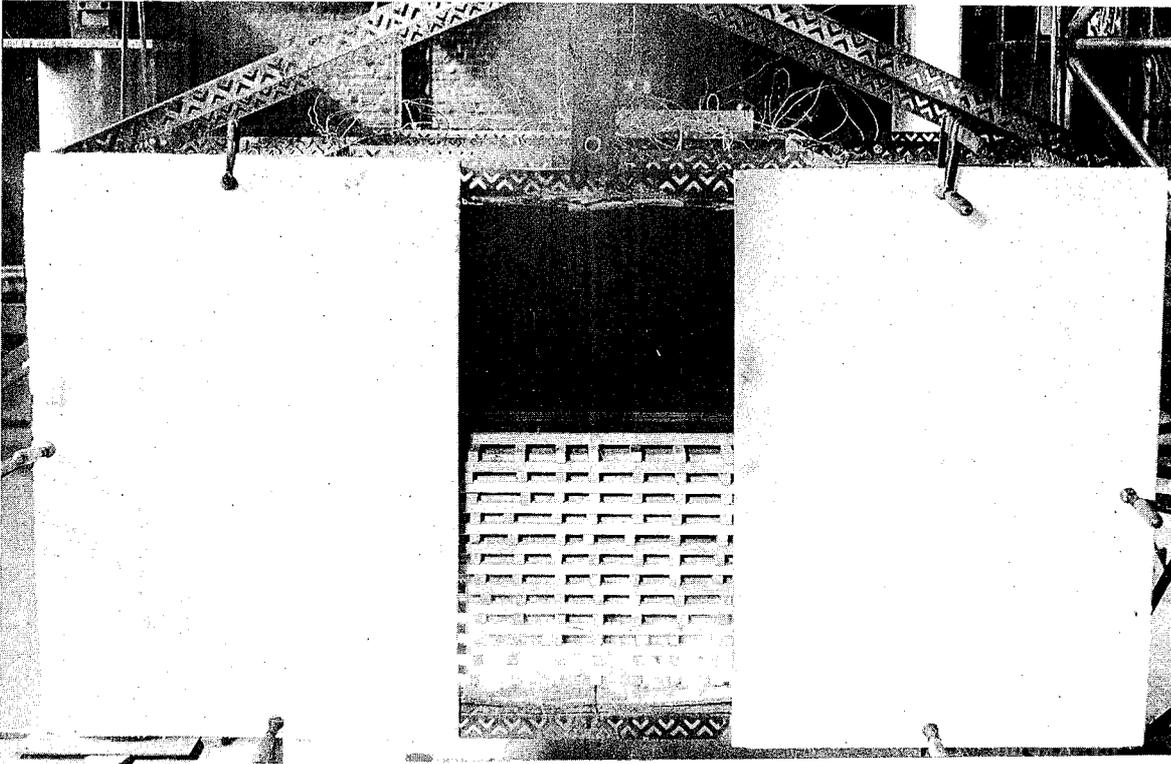


Bild 10. Aussehen nach 5 Sekunden Versuchsdauer

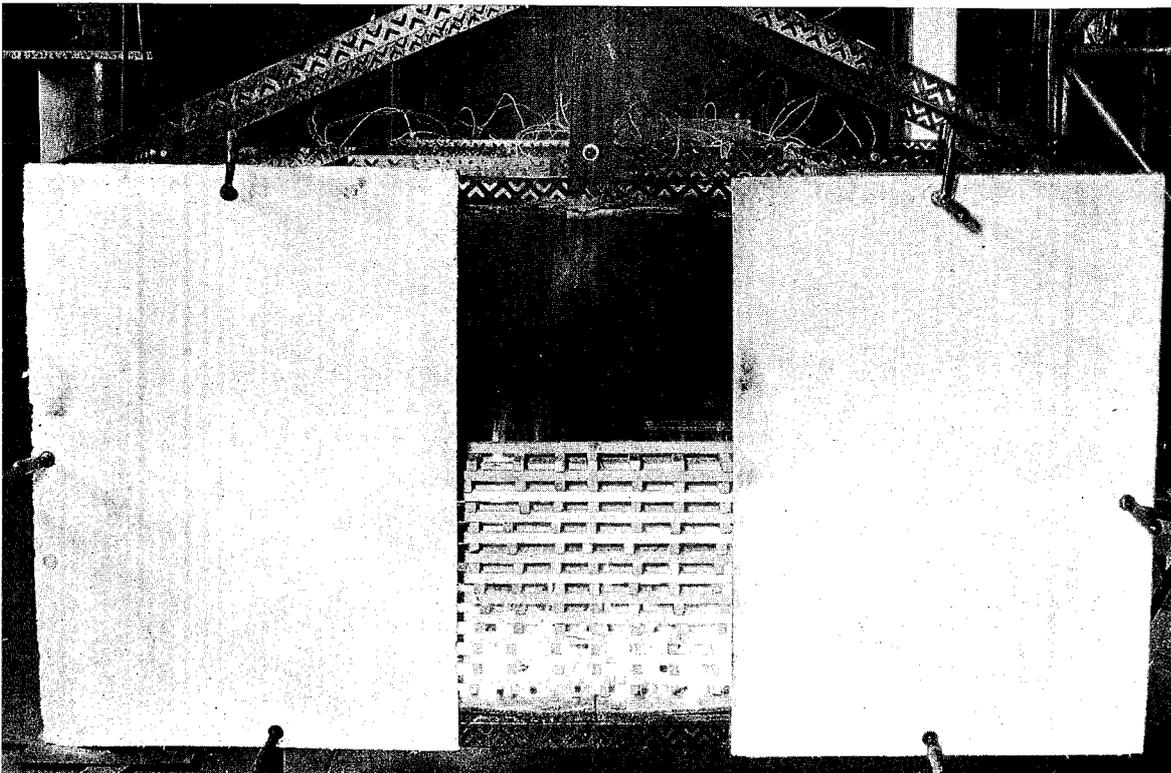


Bild 11. Aussehen nach der 2. Versuchsminute

Versuch (1) 23 (Fortsetzung)

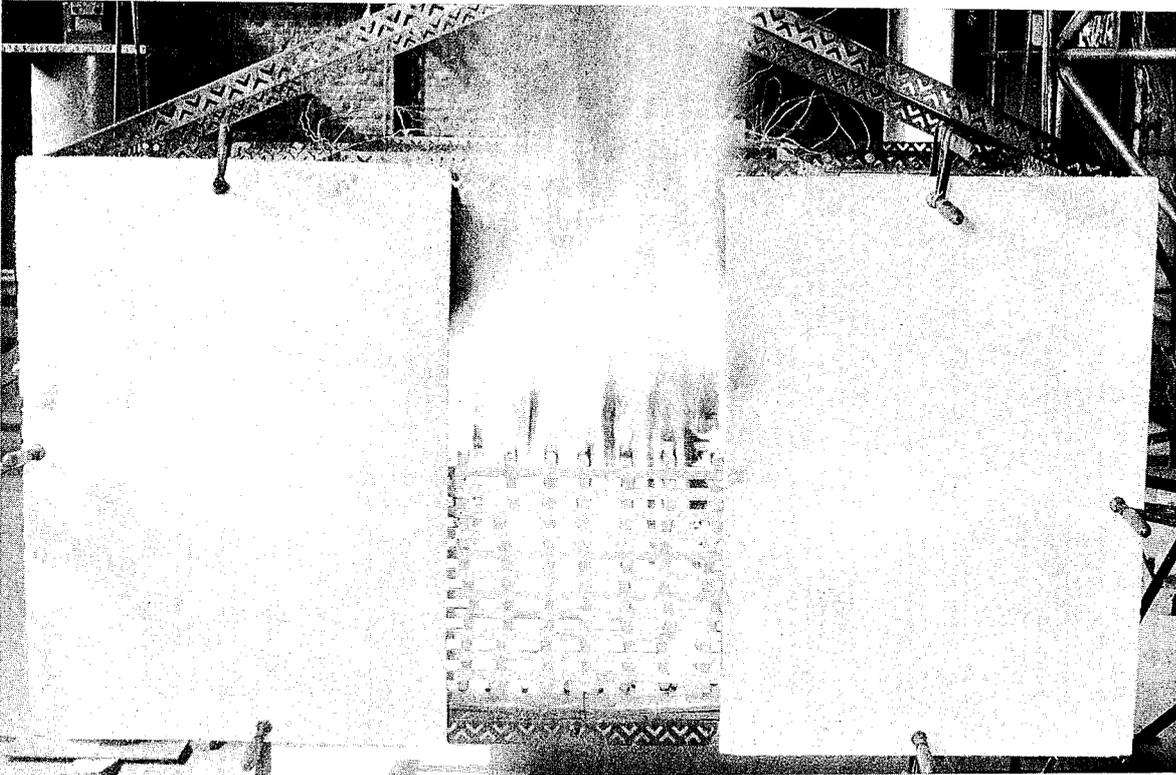


Bild 12. Aussehen nach der 8. Versuchsminute

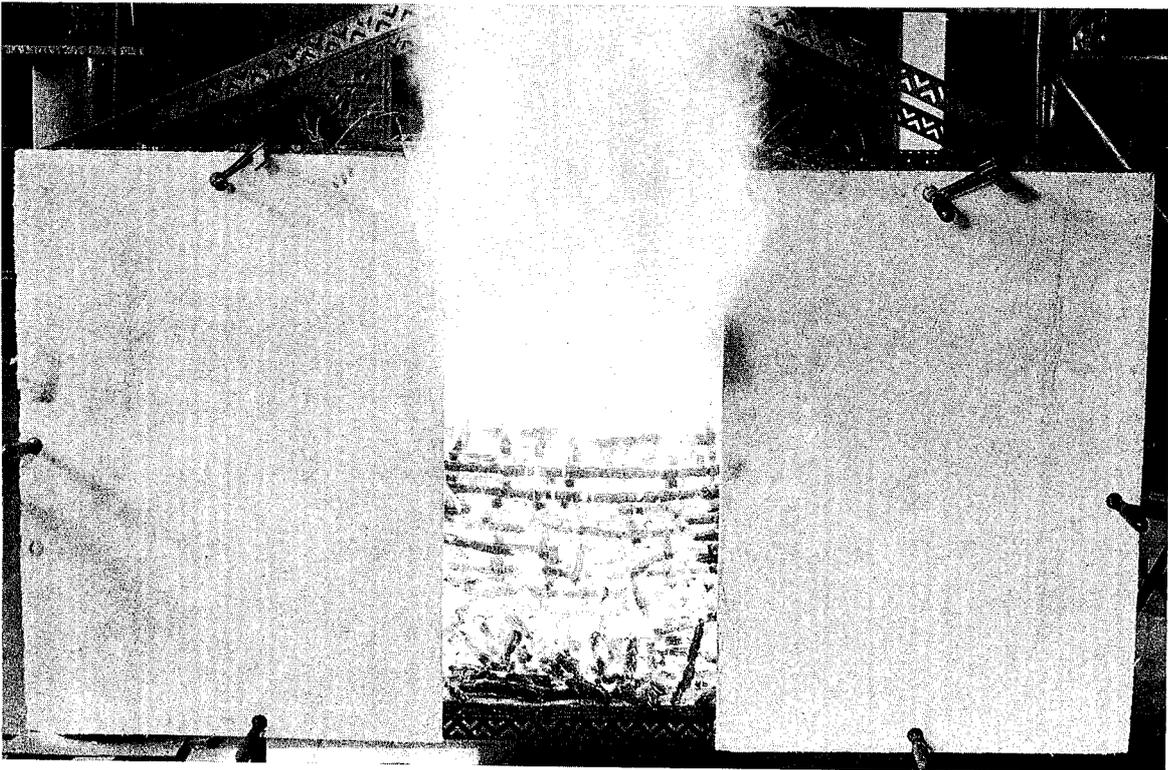


Bild 13. Aussehen nach der 12. Versuchsminute

Versuch (1) 23 (Fortsetzung)

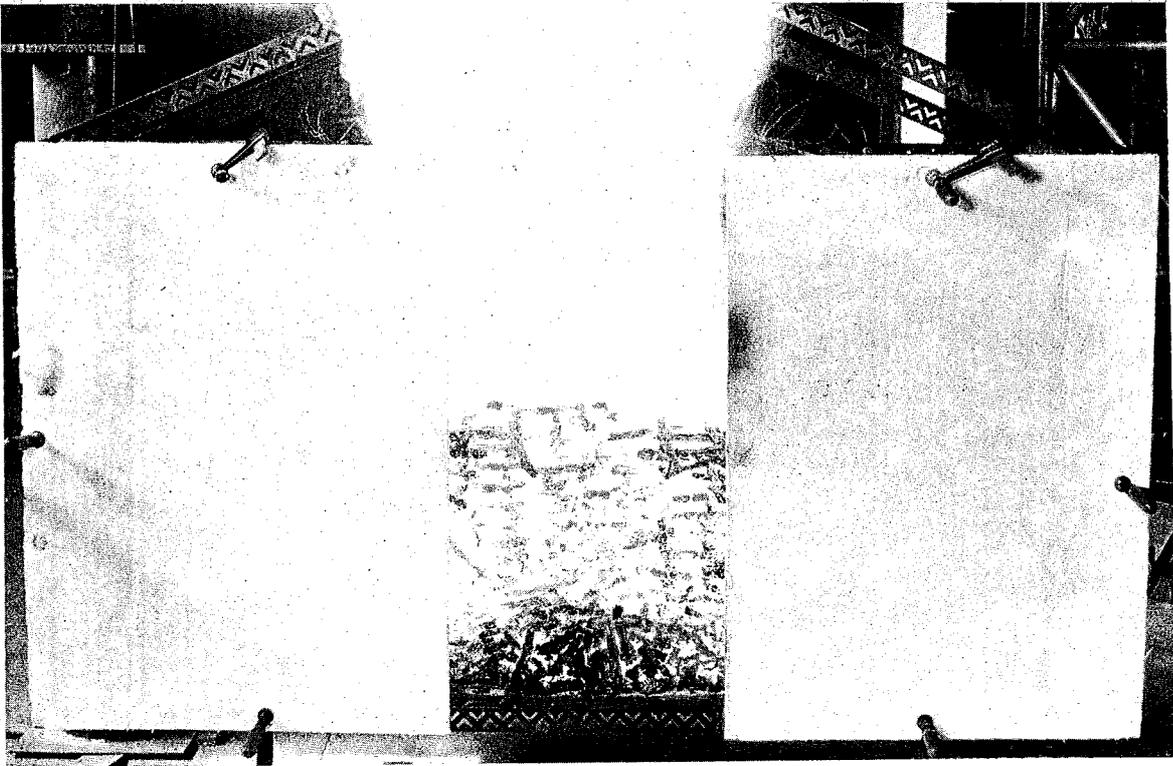


Bild 14. Aussehen nach der 16. Versuchsminute

Bildfolge von dem

Versuch (1) 24

Versuchsserie D

Brandraumgröße 2 m x 2 m x 1 m

Fensteranteil $\frac{A_F}{A} = \frac{1}{4}$

Brandlast $q = 30 \text{ kg m}^{-2}$

Brandlastverteilung 2/1 (d = 2 cm, a = 2 cm)

Versuch (1) 24

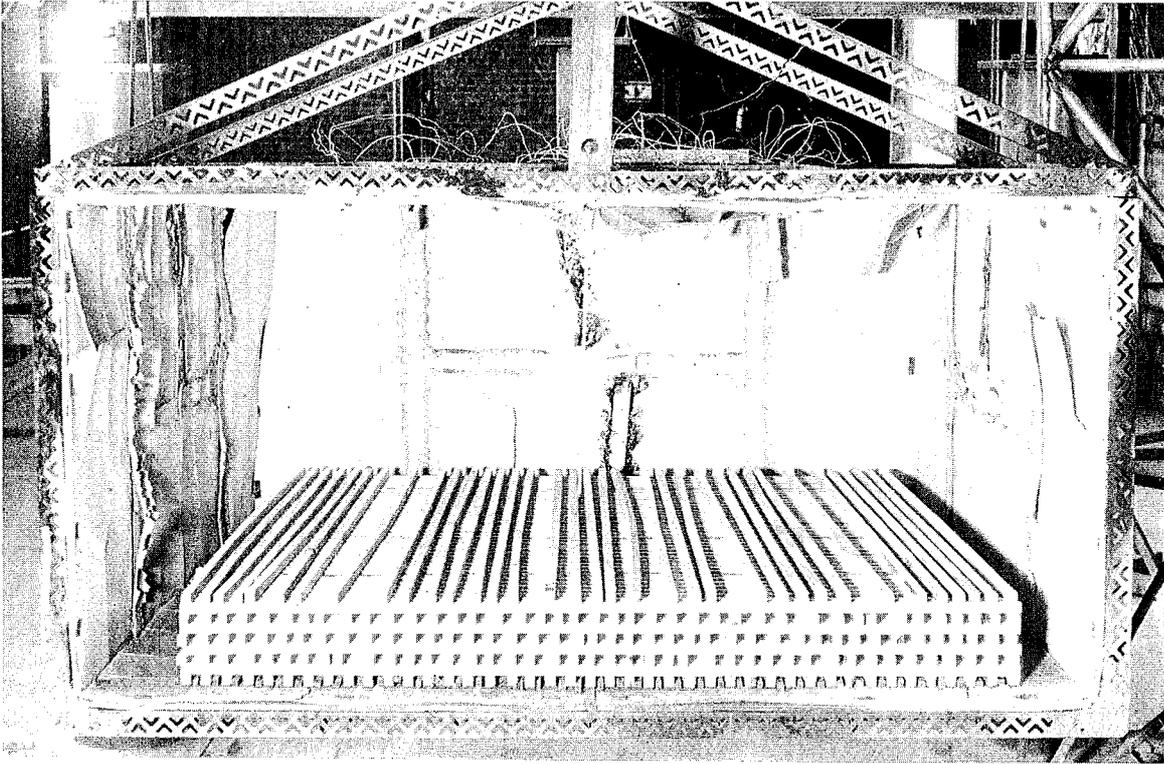


Bild 15. Aussehen vor dem Anbringen der 1/4 Öffnung

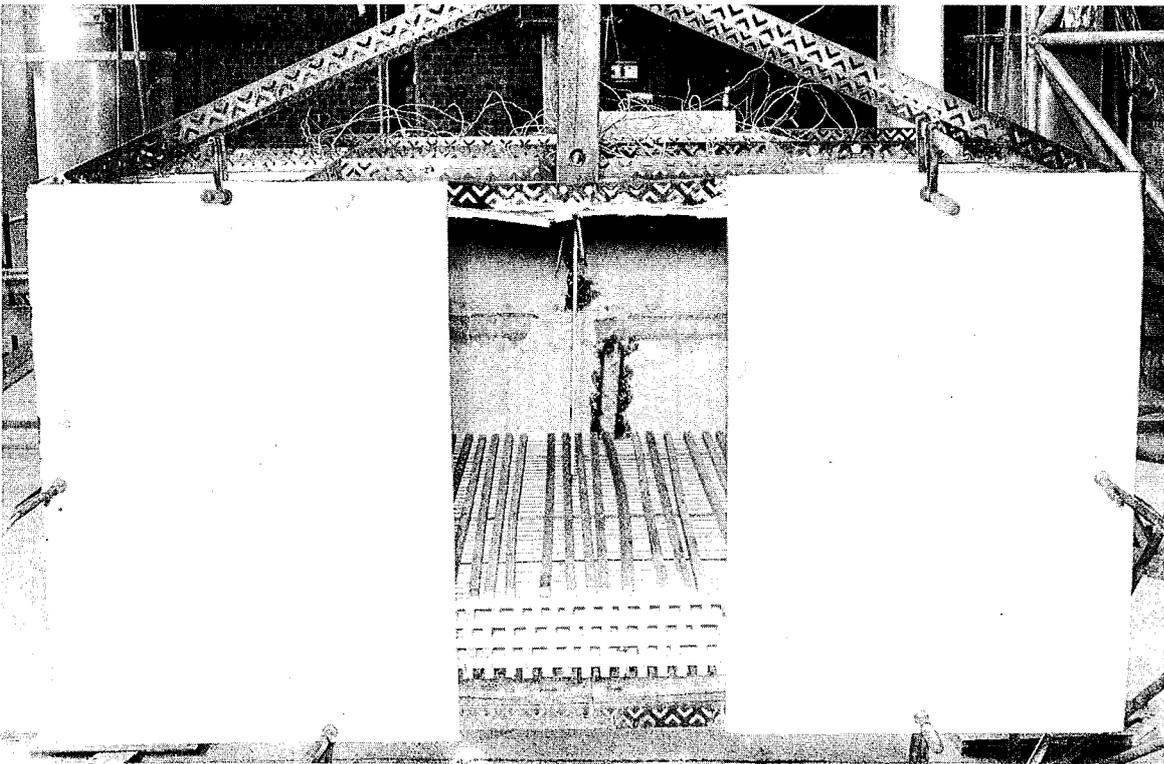


Bild 16. Aussehen vor dem Versuch mit 1/4 Öffnung

Versuch (1) 24 (Fortsetzung)

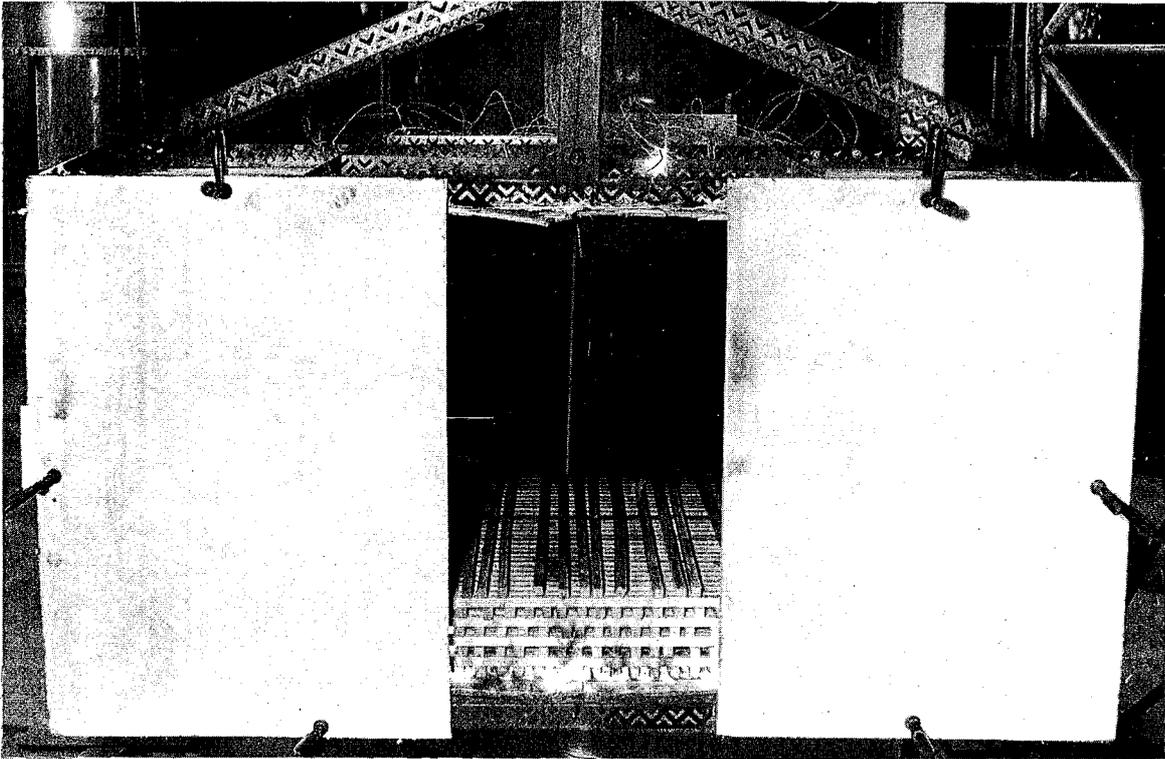


Bild 17. Aussehen nach 5 Sekunden Versuchsdauer

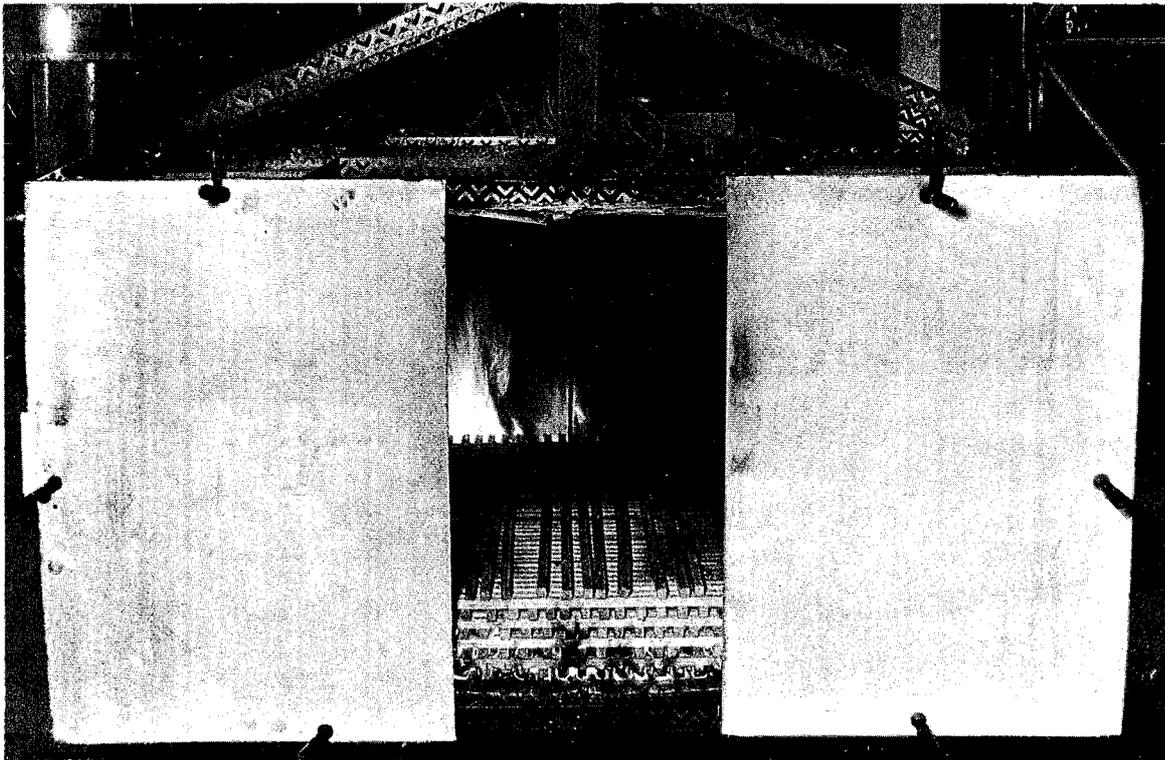


Bild 18. Aussehen nach der 2. Versuchsminute

Versuch (1) 24 (Fortsetzung)

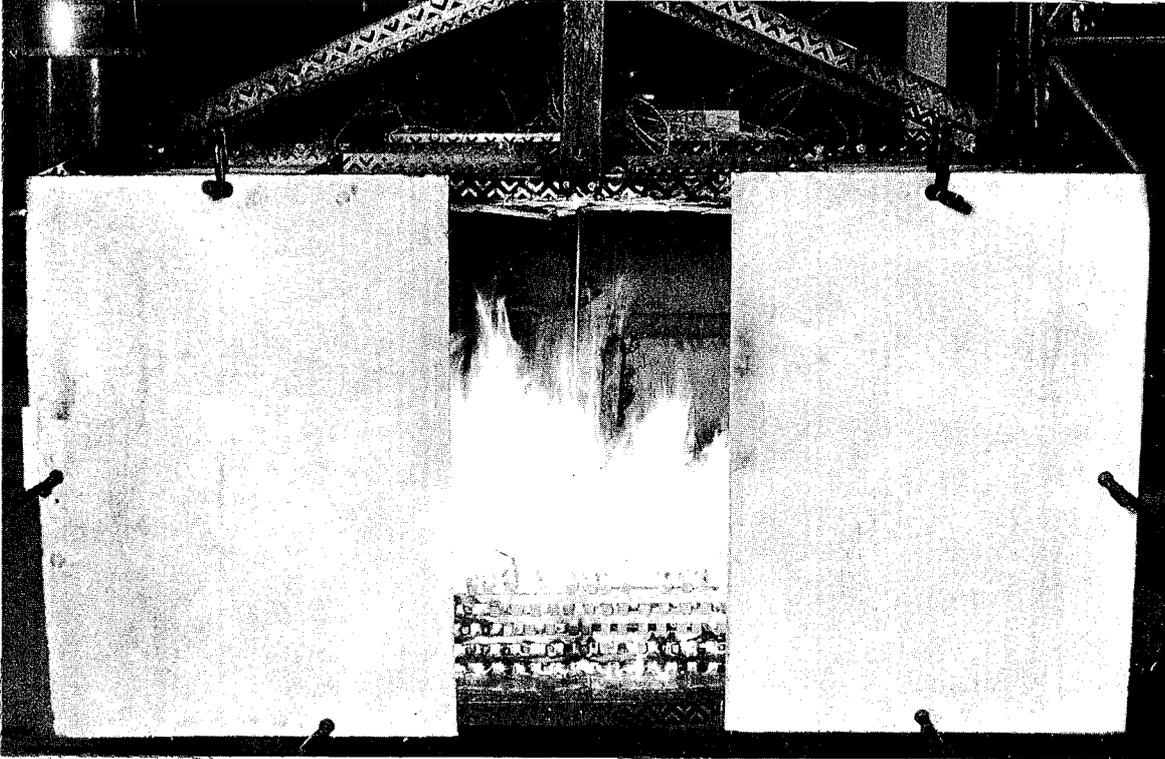


Bild 19. Aussehen nach der 4. Versuchsminute

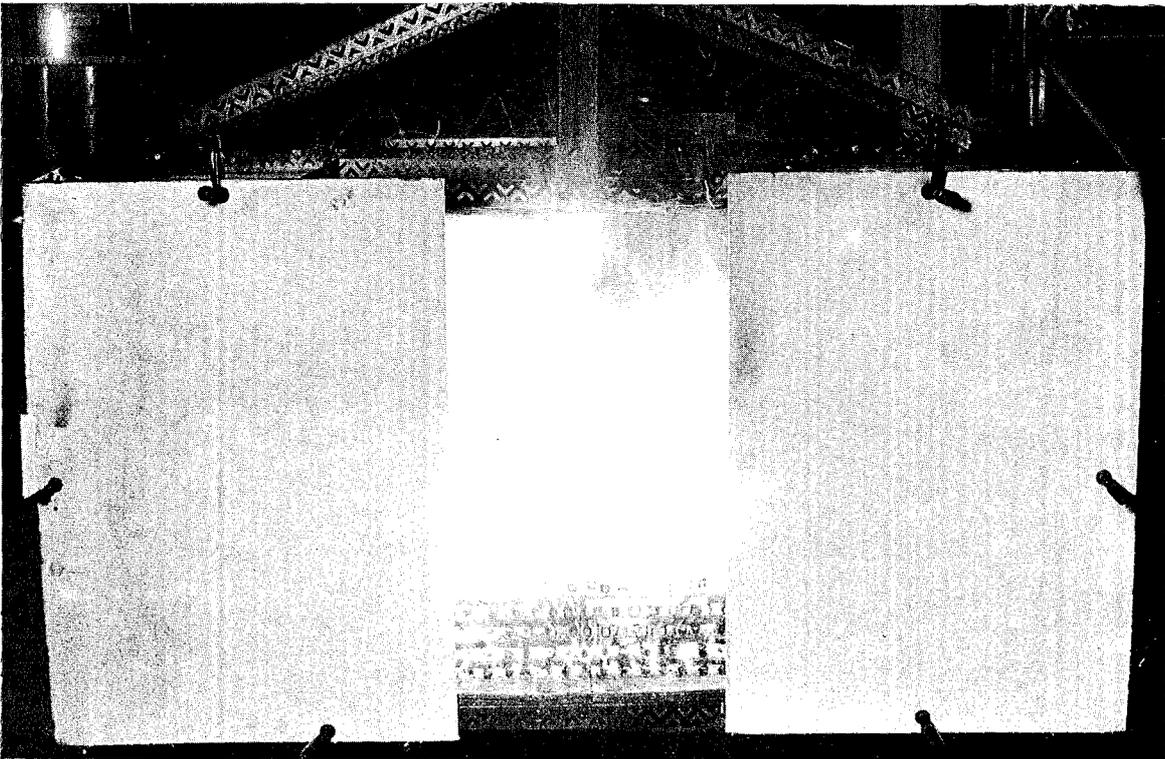


Bild 20. Aussehen nach der 5. Versuchsminute

Versuch (1) 24. (Fortsetzung)

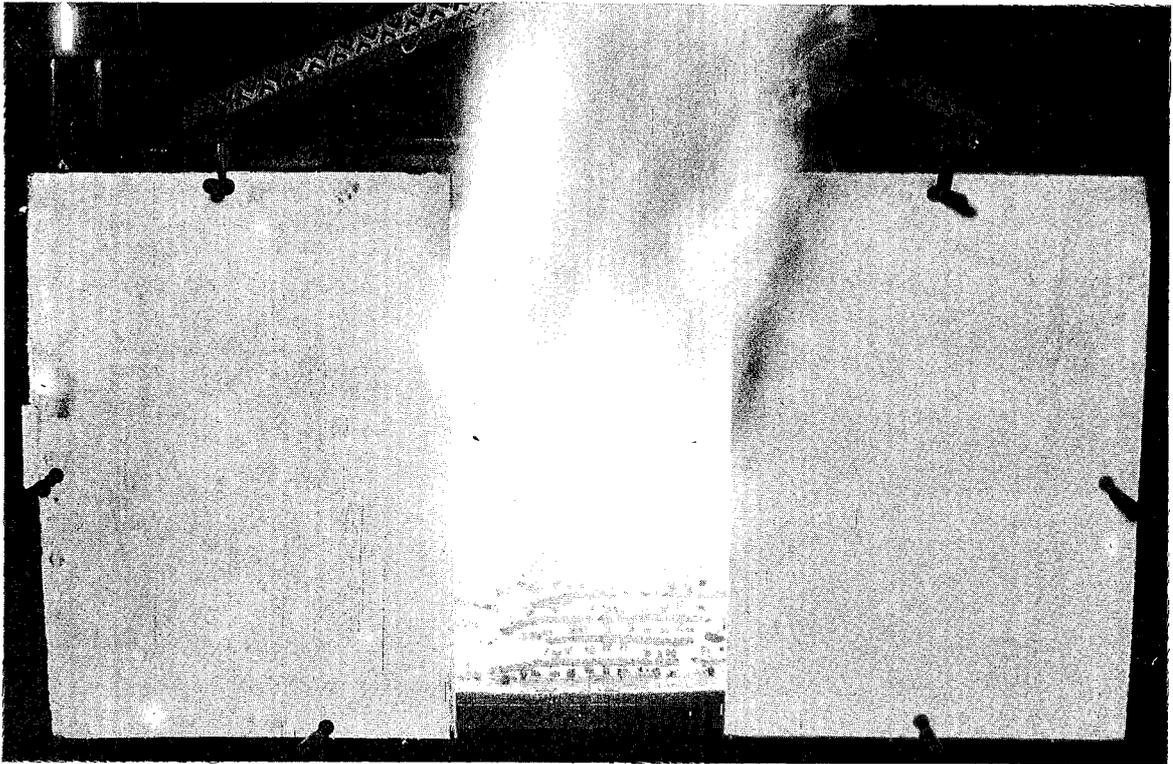


Bild 21. Aussehen nach der 10. Versuchsminute

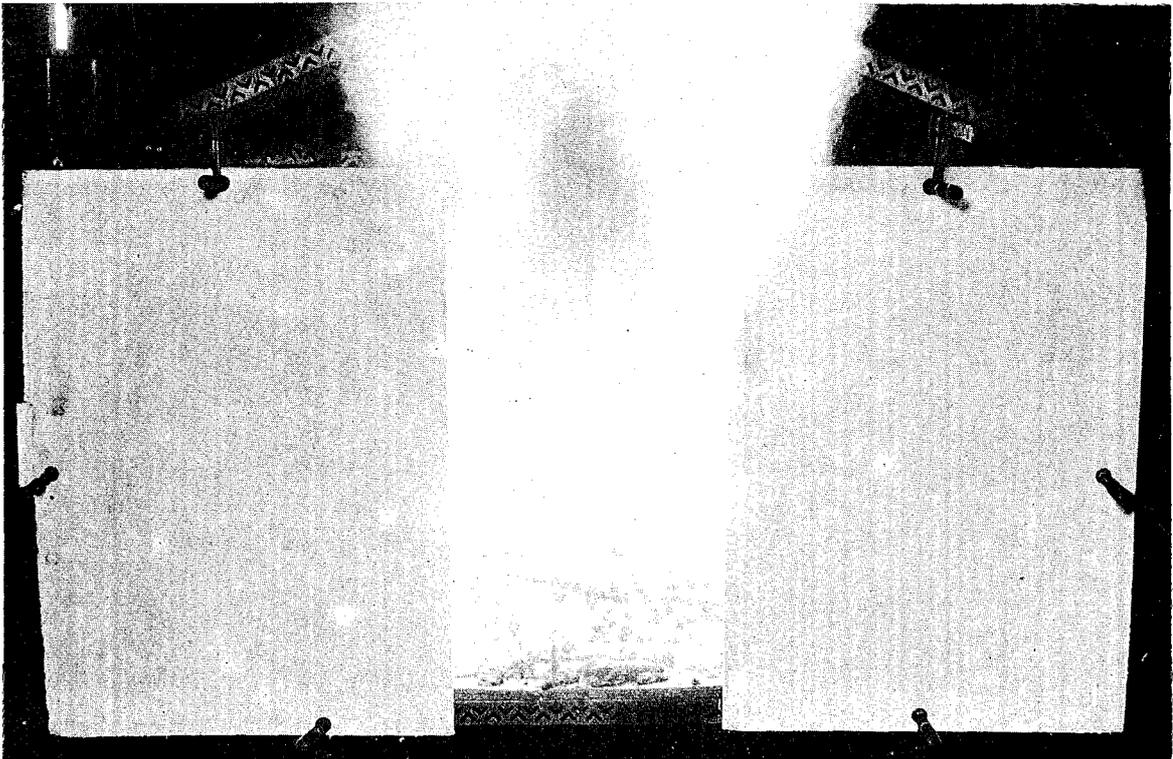


Bild 22. Aussehen nach der 13. Versuchsminute

Bildfolge von dem
Versuch (1) 27

Versuchsserie D

Brandraumgröße 2 m x 2 m x 1 m

Fensteranteil $\frac{A_F}{A} = 1$

Brandlast $q = 40 \text{ kg m}^{-2}$

Brandlastverteilung 1/3 (d = 1 cm, a = 3 cm)

Versuch (1) 27

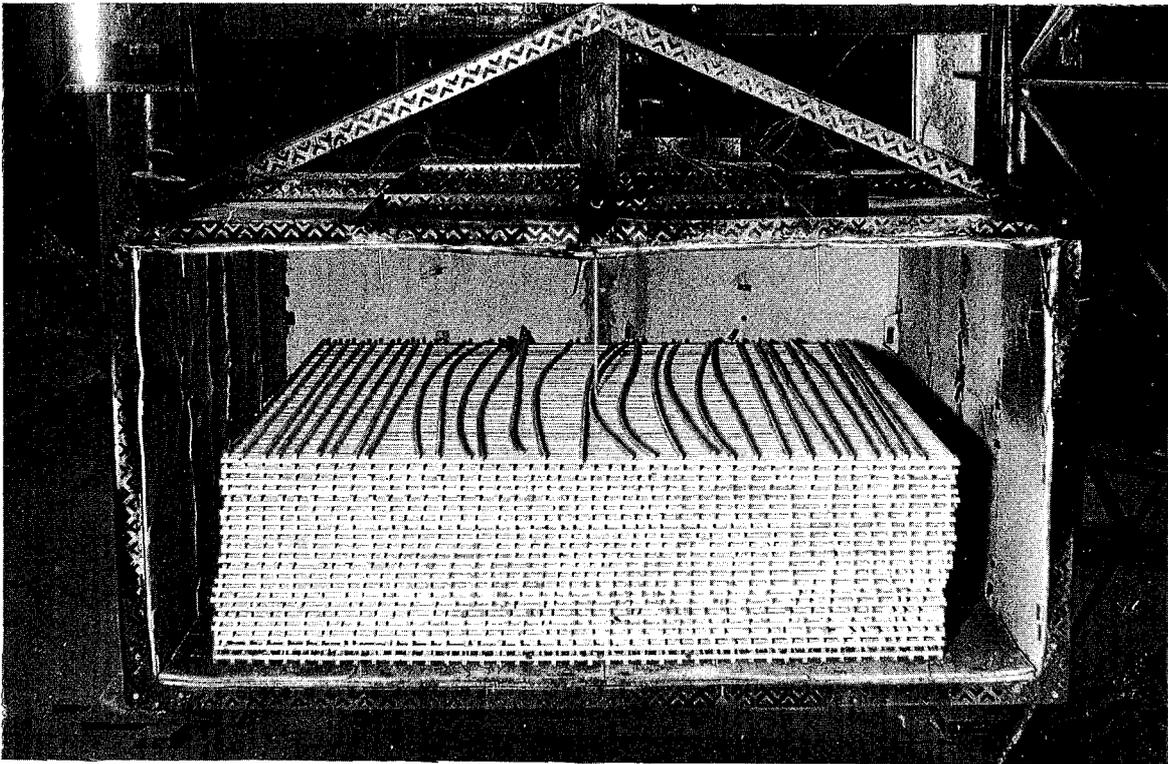


Bild 23. Aussehen vor dem Versuch

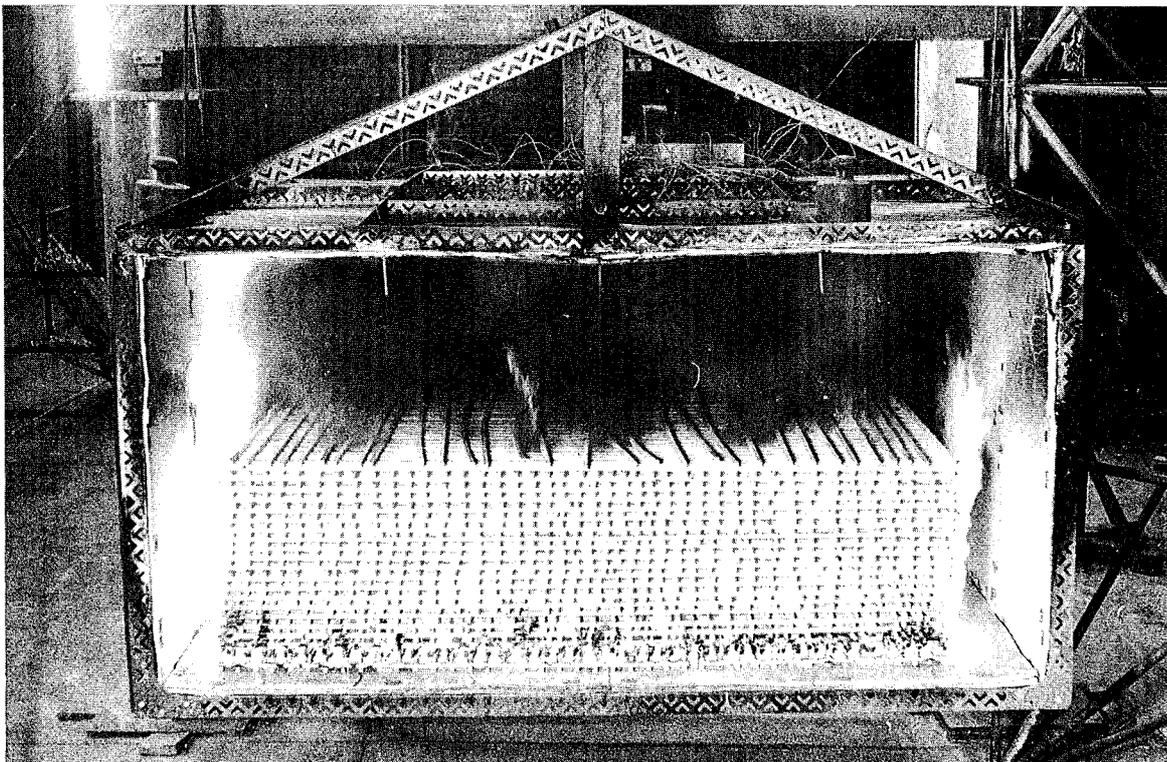


Bild 24. Aussehen nach 5 Sekunden Versuchsdauer

Versuch (1) 27 (Fortsetzung)

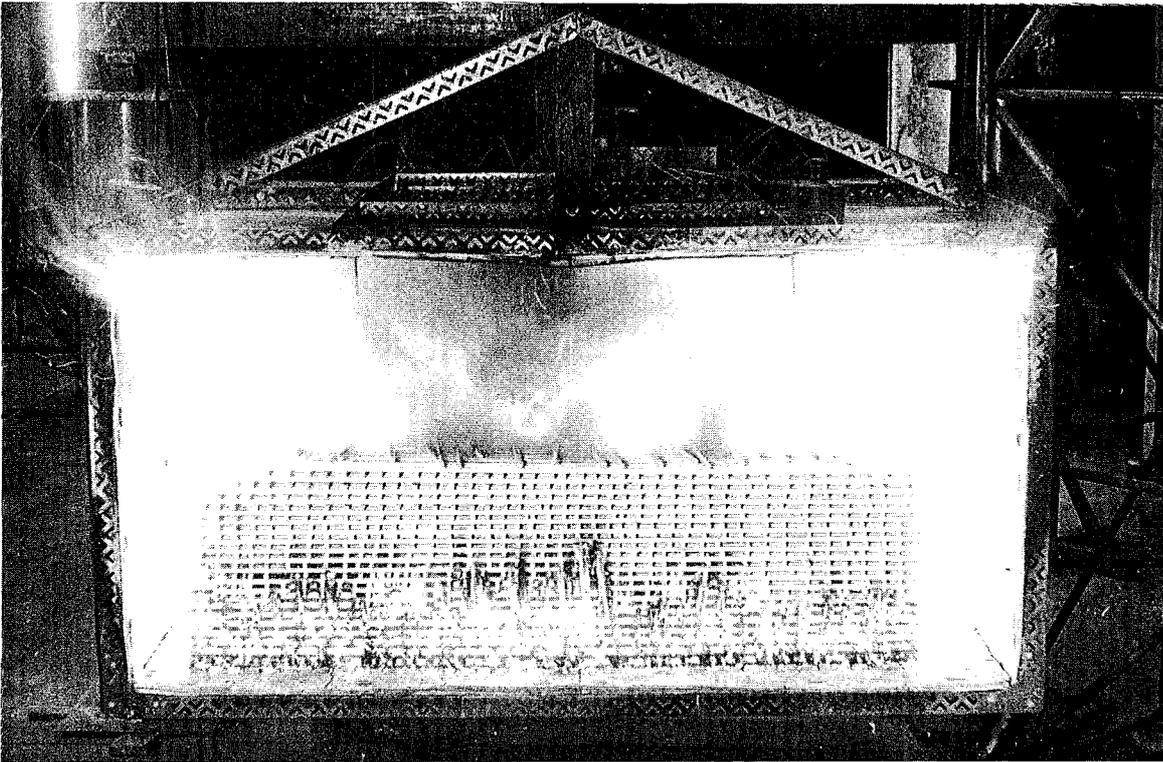


Bild 25. Aussehen nach der 2. Versuchsminute

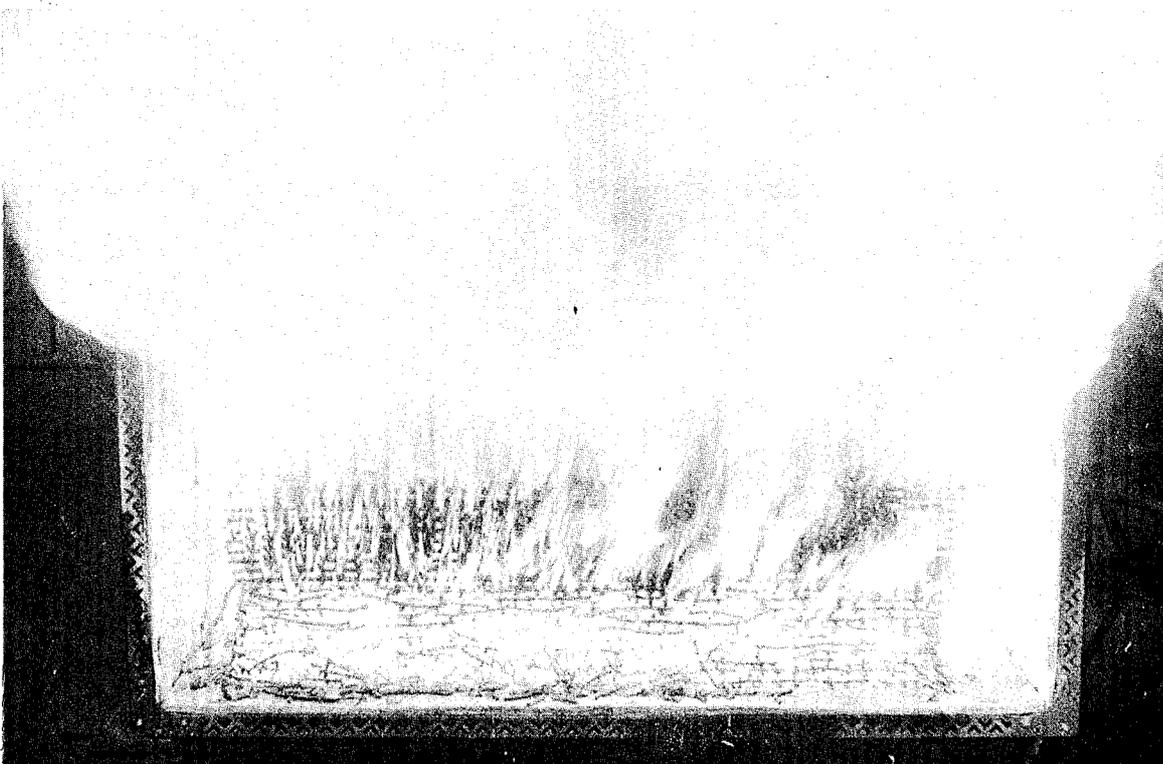


Bild 26. Aussehen nach der 5. Versuchsminute

Bildfolge von dem

Versuch (1) 31 A

Versuchsserie A

Brandraumgrößen 1 m x 1 m x 0,5 m

Fensteranteil $\frac{A_F}{A} = 1$

Brandlast $q = 20 \text{ kg m}^{-2}$

Brandlastverteilung 2/3 (d = 2 cm, a = 6 cm)

Versuch (1) 31 A

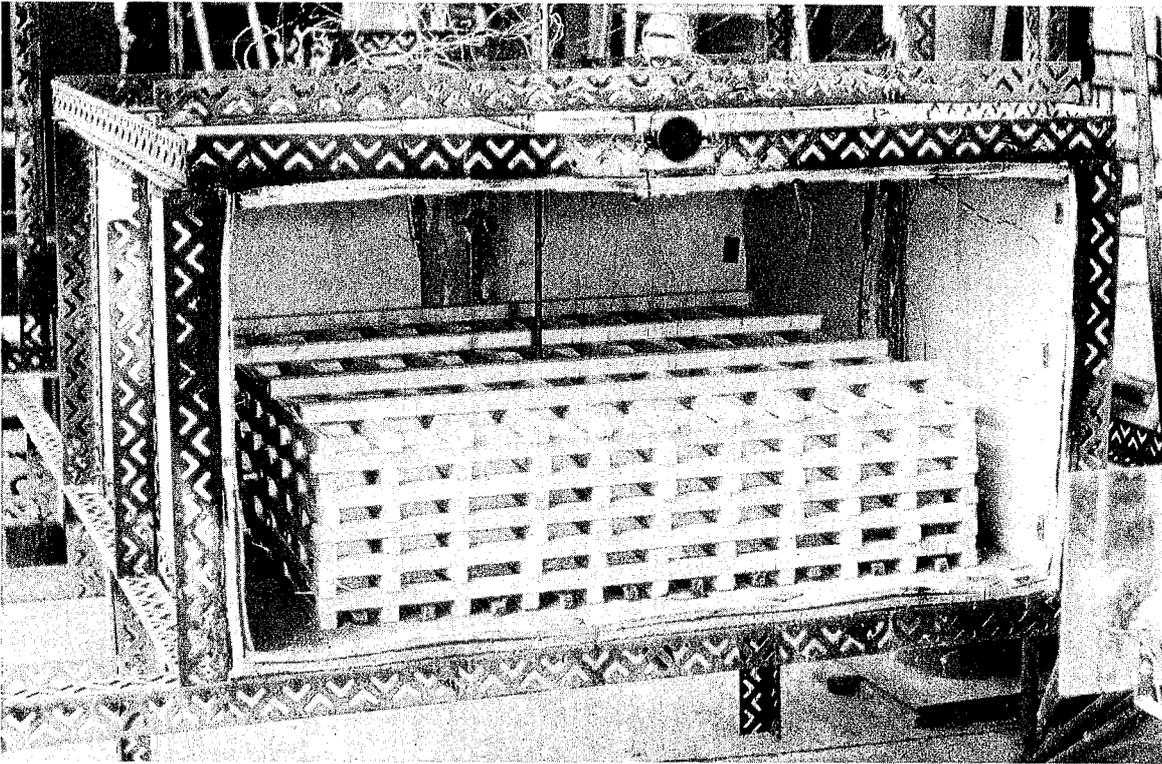


Bild 27. Aussehen vor dem Versuch

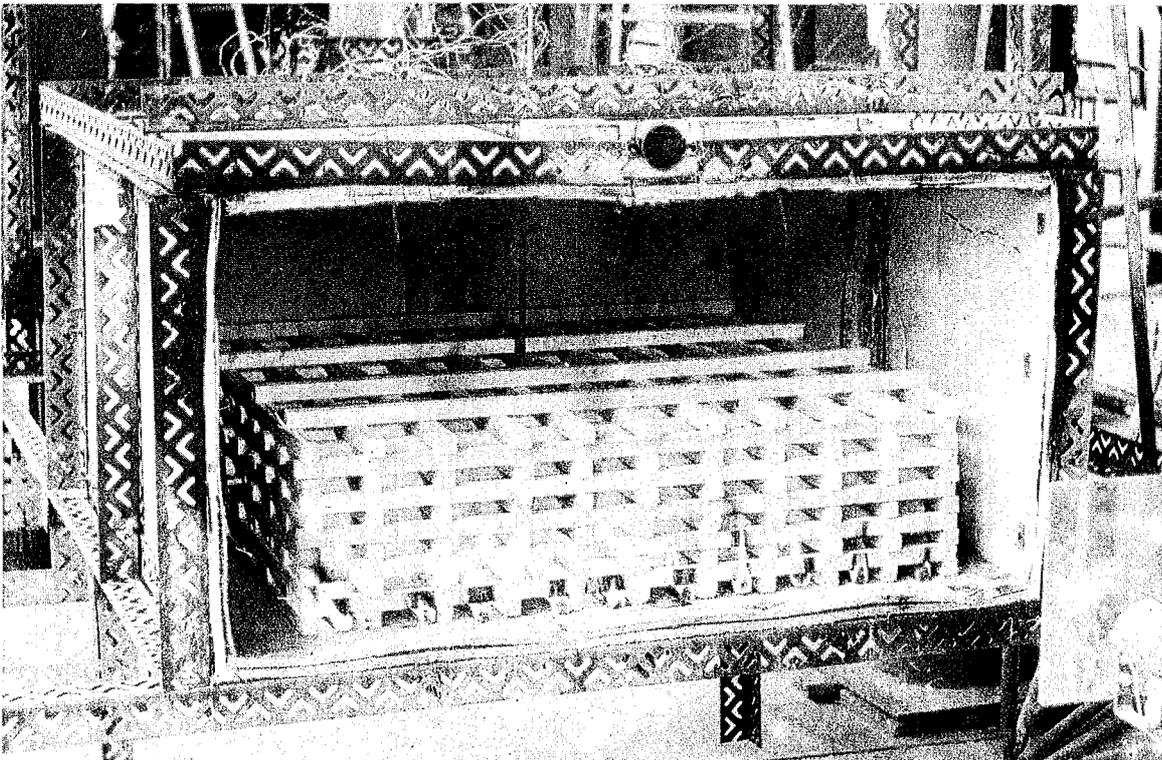


Bild 28. Aussehen nach 5 Sekunden Versuchsdauer

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

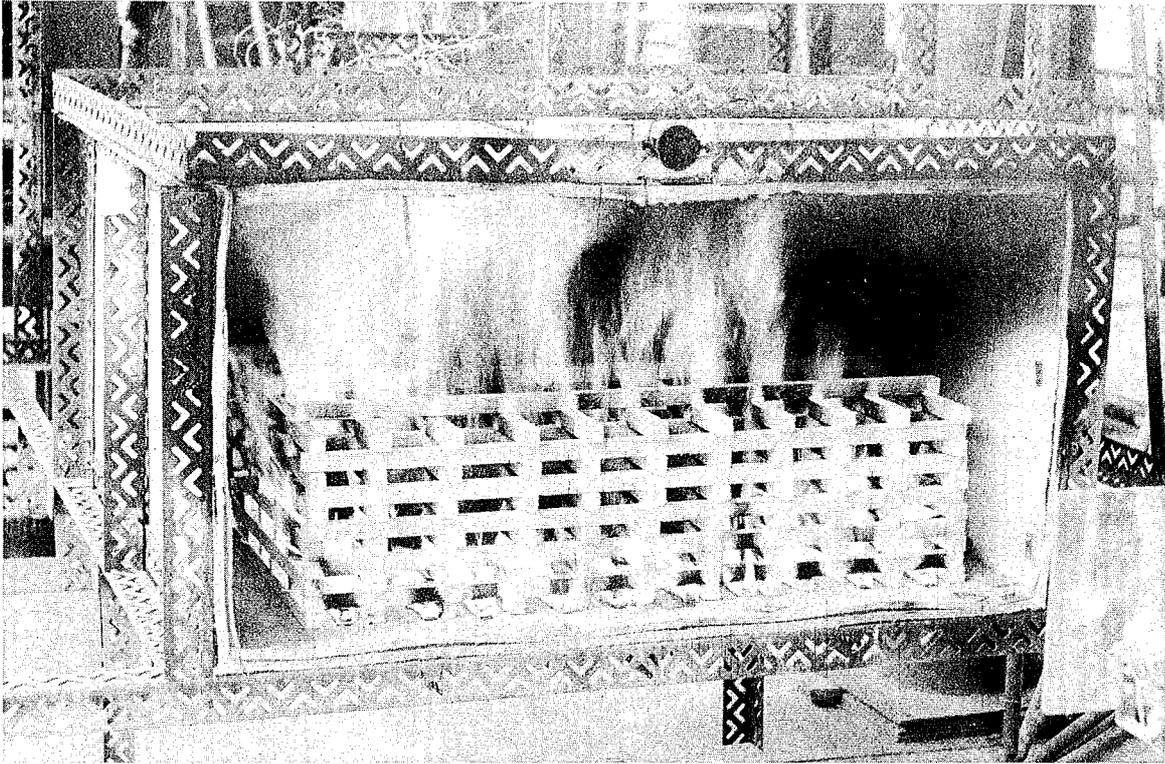


Bild 29. Aussehen nach der 1. Versuchsminute

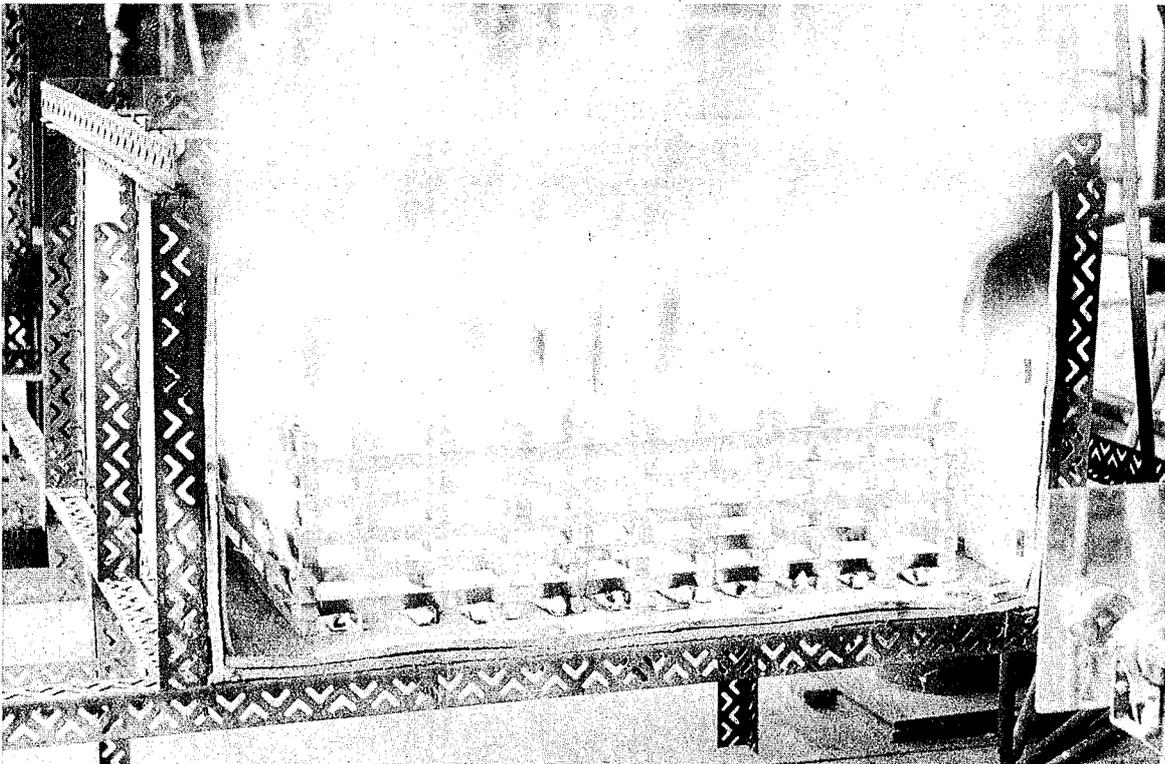


Bild 30. Aussehen nach der 2. Versuchsminute

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

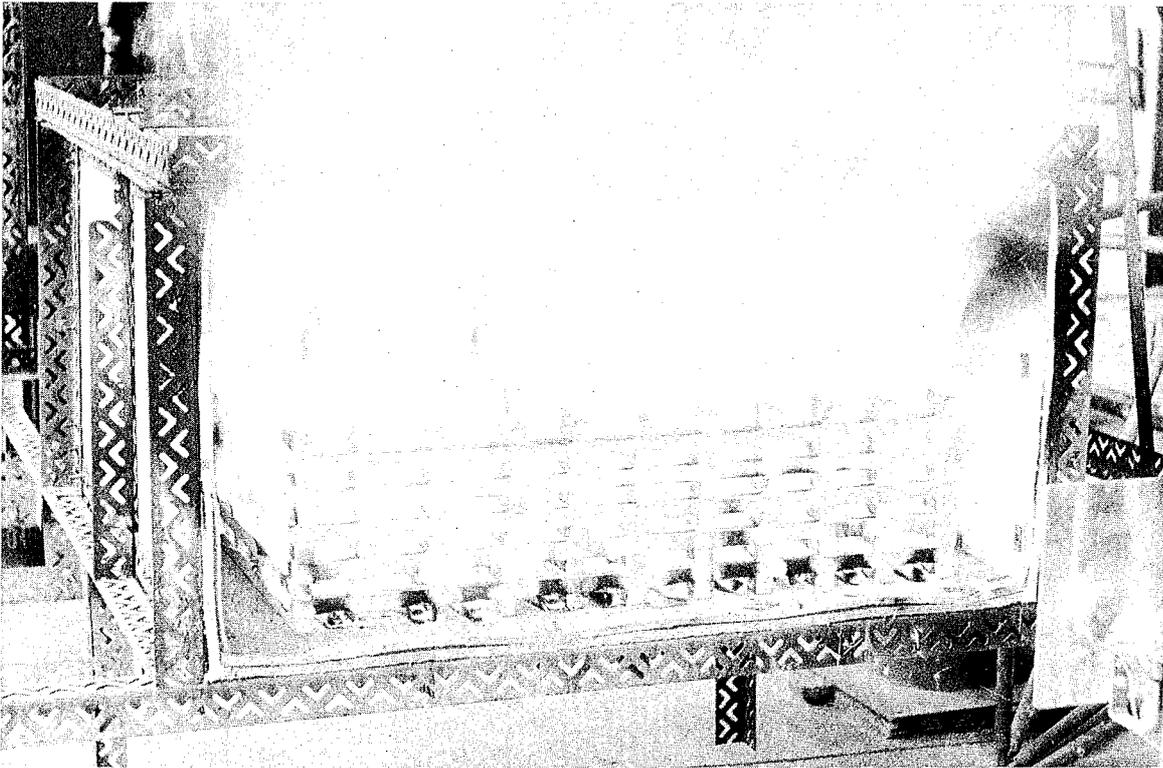


Bild 31. Aussehen nach der 4. Versuchsminute

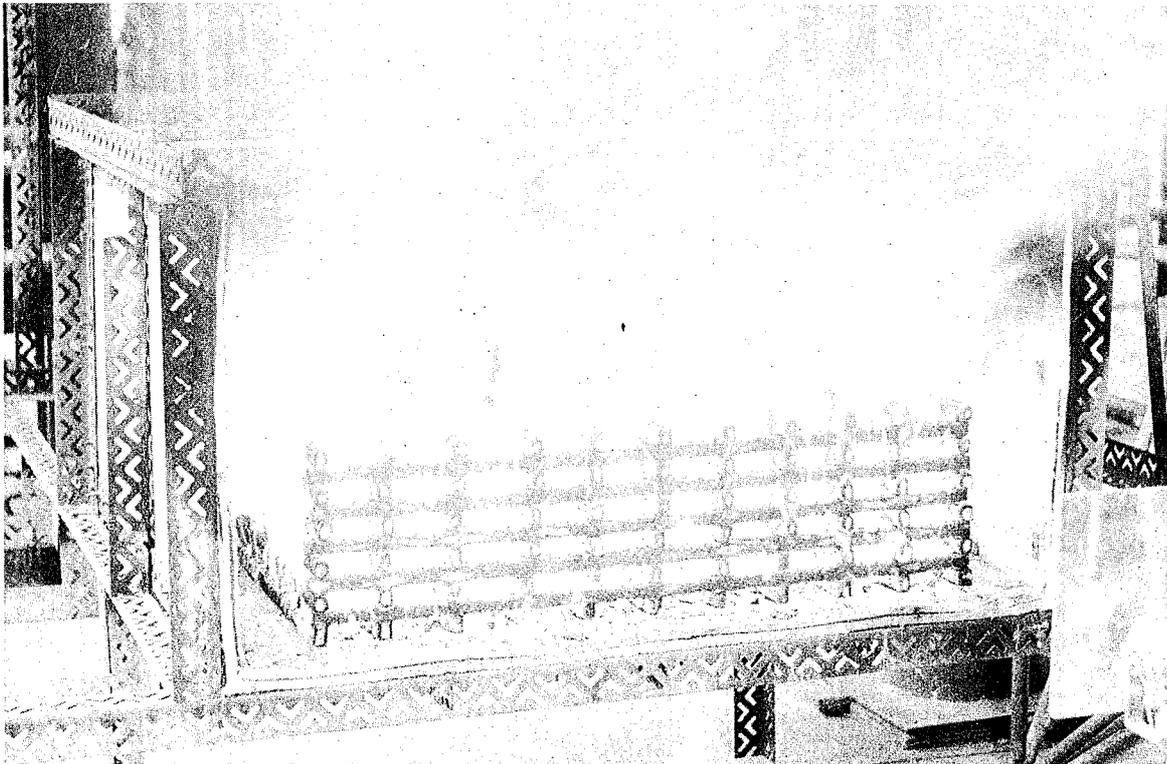


Bild 32. Aussehen nach der 6. Versuchsminute

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

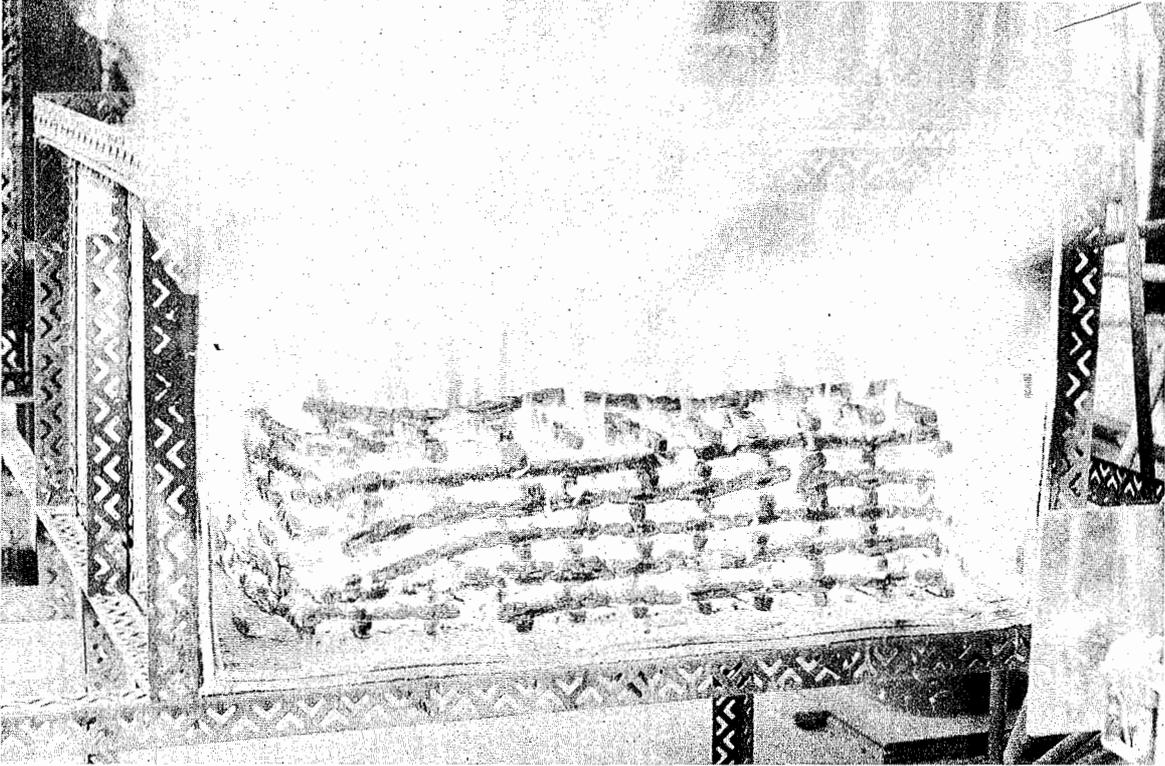


Bild 33. Aussehen nach der 10. Versuchsminute

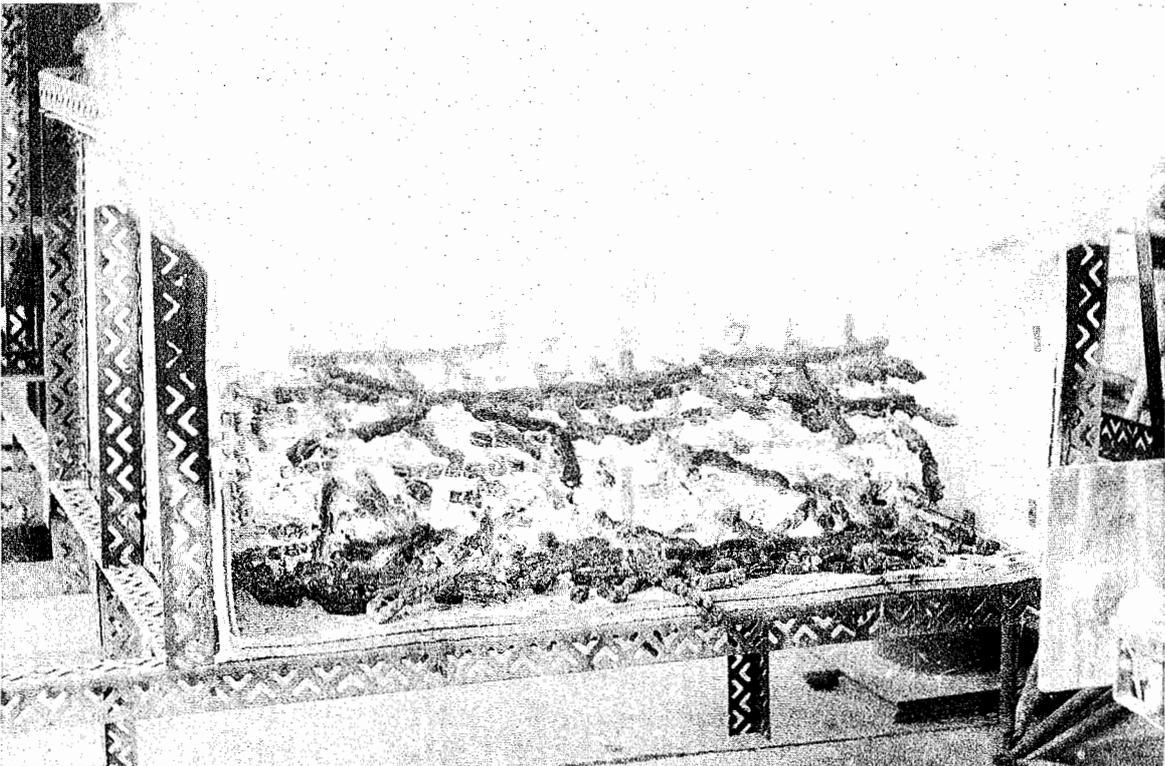


Bild 34. Aussehen nach der 16. Versuchsminute

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

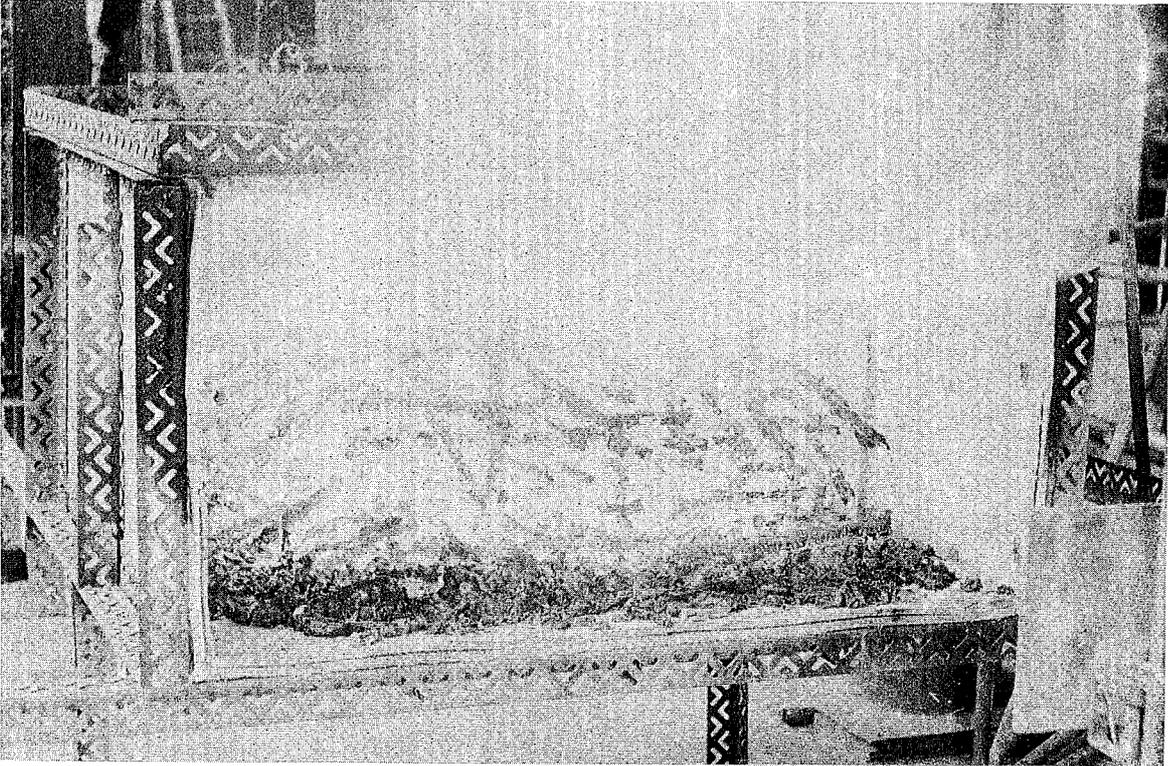


Bild 35. Aussehen nach der 20. Versuchsminute

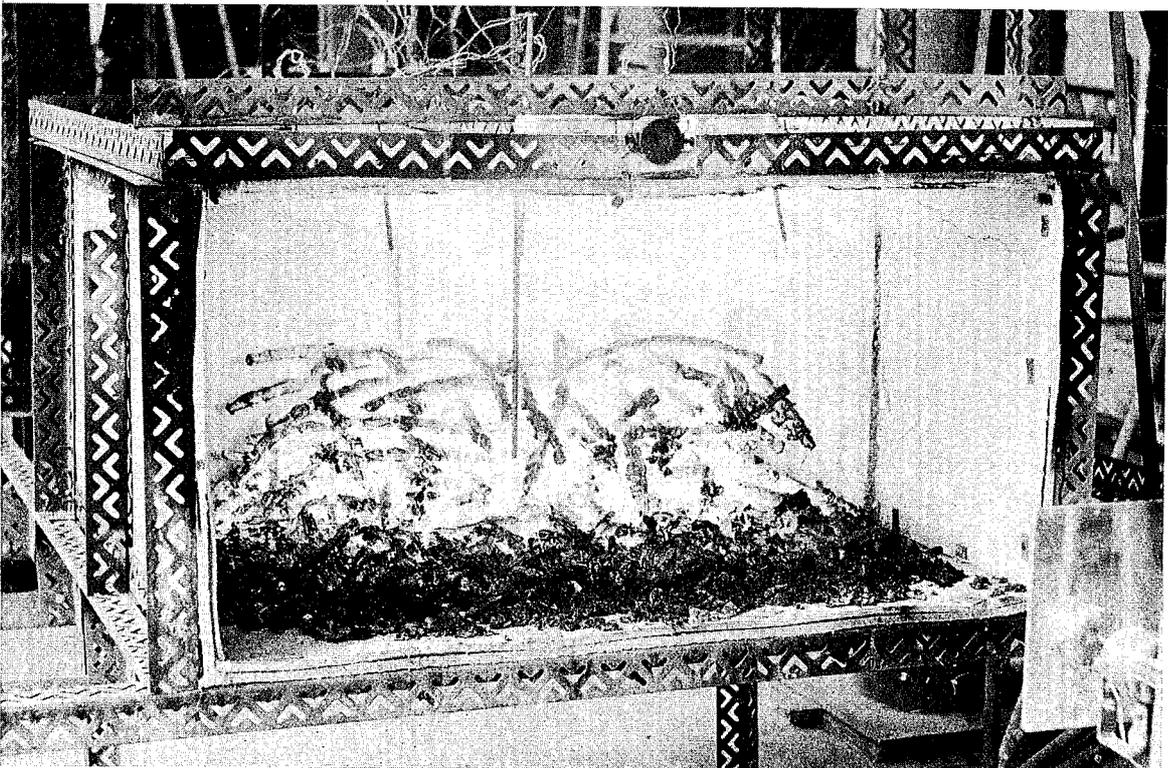


Bild 36. Aussehen nach der 26. Versuchsminute

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

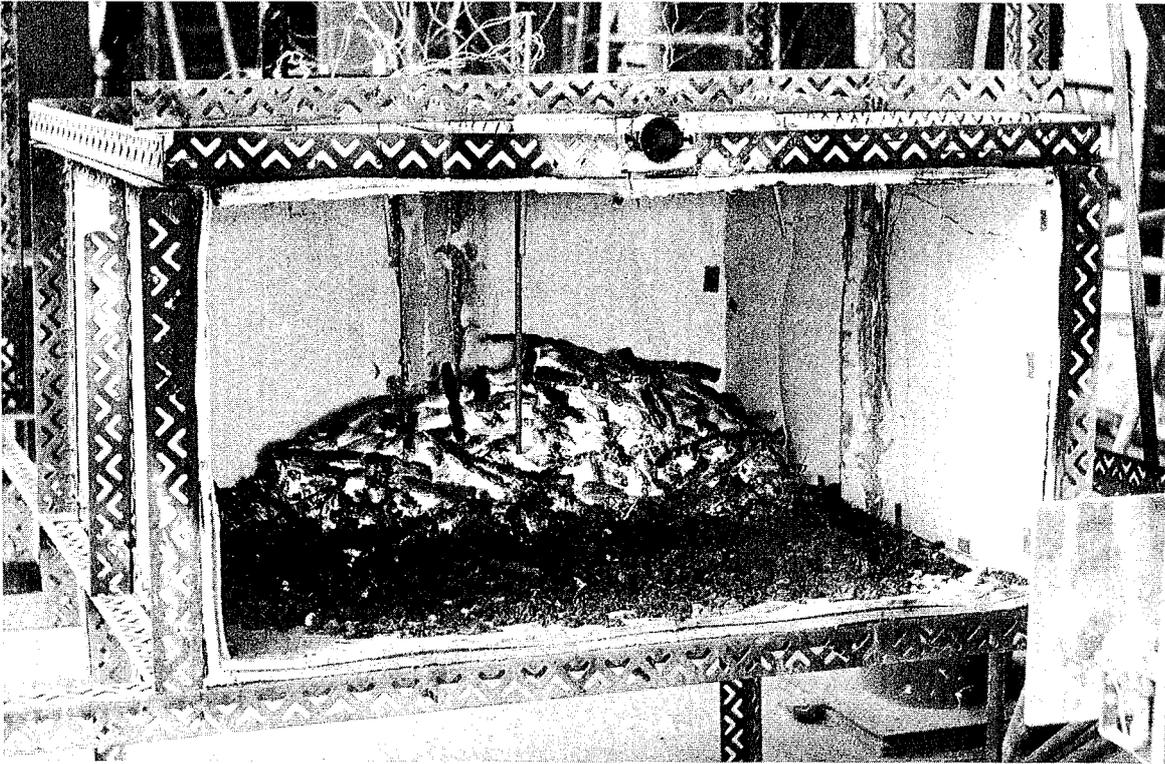


Bild 37. Aussehen nach der 30. Versuchsminute

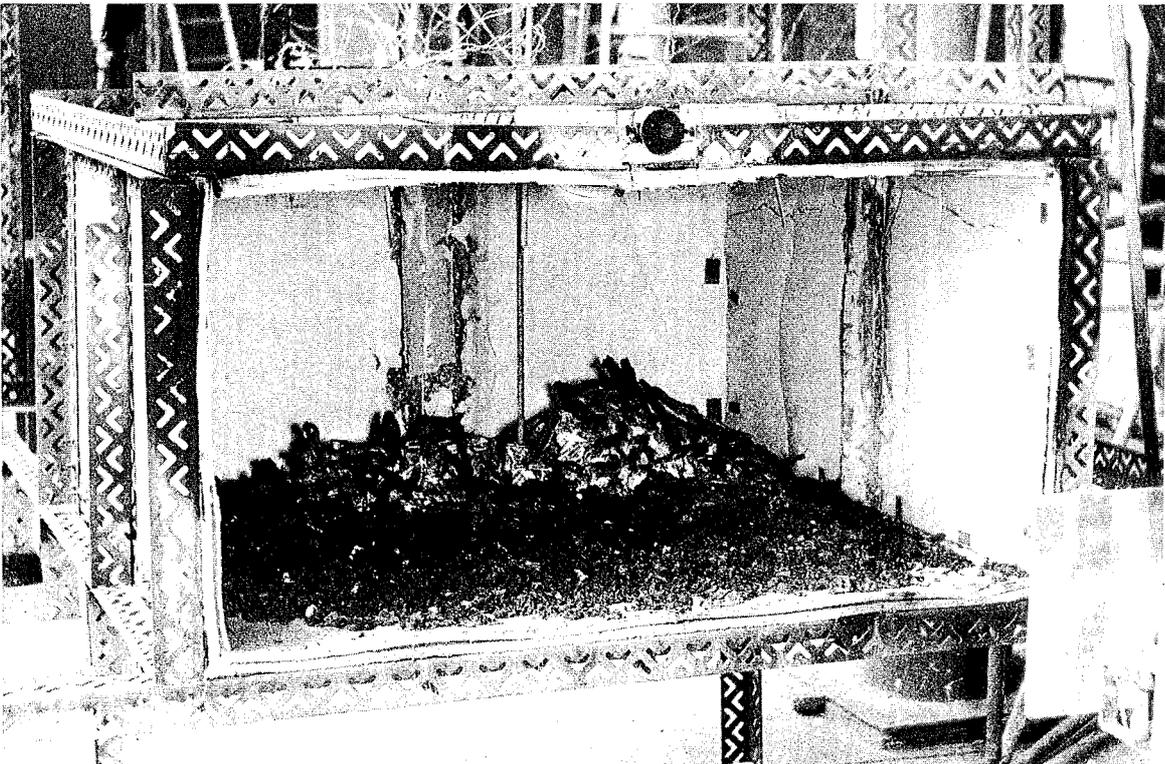


Bild 38. Aussehen nach der 34. Versuchsminute

Versuch (1) 31 A (Fortsetzung)

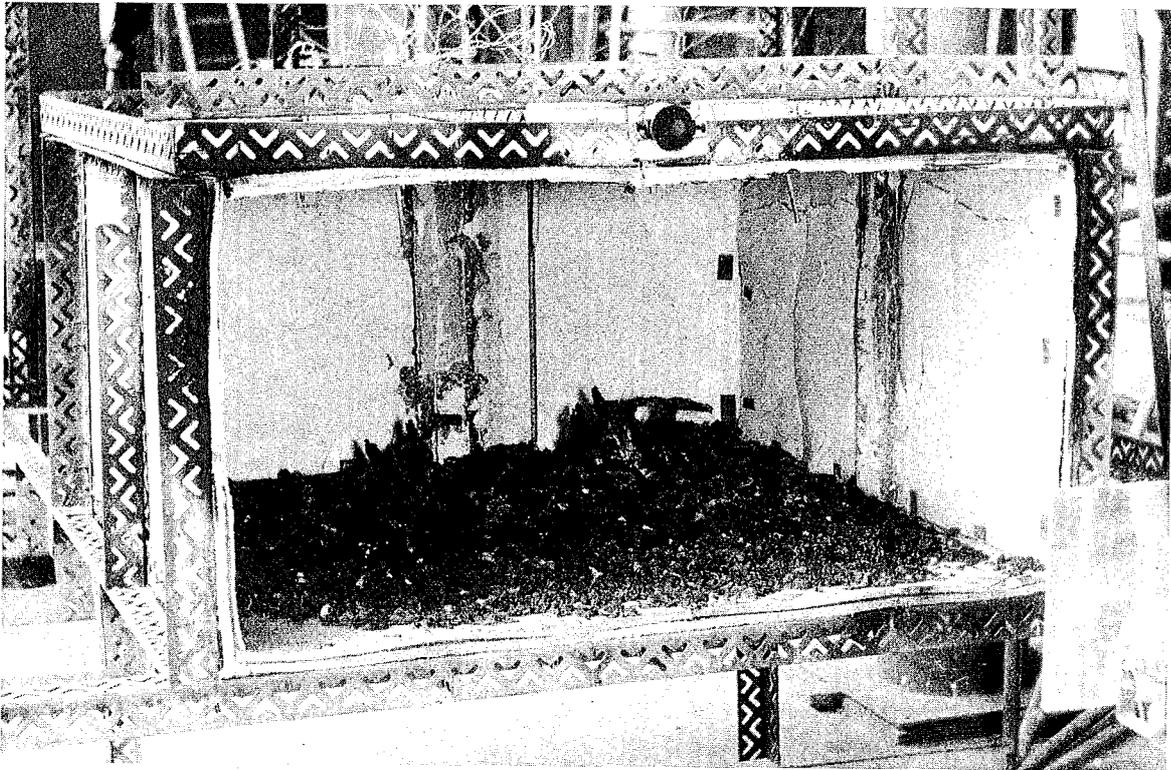


Bild 39. Aussehen nach der 36. Versuchsminute

Anhang A

zeitlicher Verlauf
der Brandraumtemperaturen
des Gewichtsverlustes
und der Wärmestrahlung

bei den in Karlsruhe und Berlin gleichartig
ausgeführten Versuchen

Tabelle 2. Übersicht über Darstellungen der Meßwerte für die Brandlastverteilung 2/1 ¹⁾ und die Bilder des Versuchsablaufes

Versuchs- serie	Brandraum- abmessungen			Fenster- anteil	Brandlast	Diagramm- Bezeichnung	Bild Nr.
	b	l	h				
C	200 (2-1-1) (Maßstab 1 m)	100	100	1/4	20	Z 1	-
					40	Z 2	
				1	20	Z 3	
					40	Z 4	
D	200 (2-2-1) (Maßstab 1 m)	100	100	1/4	20	Z 5, Z 11 ²⁾	13...20
					30	Z 9, Z 11	
					40	Z 6, Z 11	
				1	20	Z 7, Z 11	-
					30	Z 10, Z 11	
					40	Z 8, Z 11	

1) Brandlastverteilung 2/1 bedeutet: Kantenlänge eines Holzstabes 2 cm, lichter Abstand 1-fache Kantenlänge (2 cm).

2) Der Streubereich der Meßwerte für die Brandlastverteilung 2/3 (Holzstabkantenlänge 2 cm, lichter Abstand 6 cm) ist auf Diagramm Z 12 zusammengestellt.

Bild Z1		Zeichen
Versuchsreihe	Versuch Nr.	
1	1,6	o
2	27	e
3	9,10	x

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße	
Maßstab 1 m	
Breite	Tiefe
2	1
Höhe	
1	

Brandlast 20 kg/m²

Ventilation 1/4

Brandlastverteilung 2/1

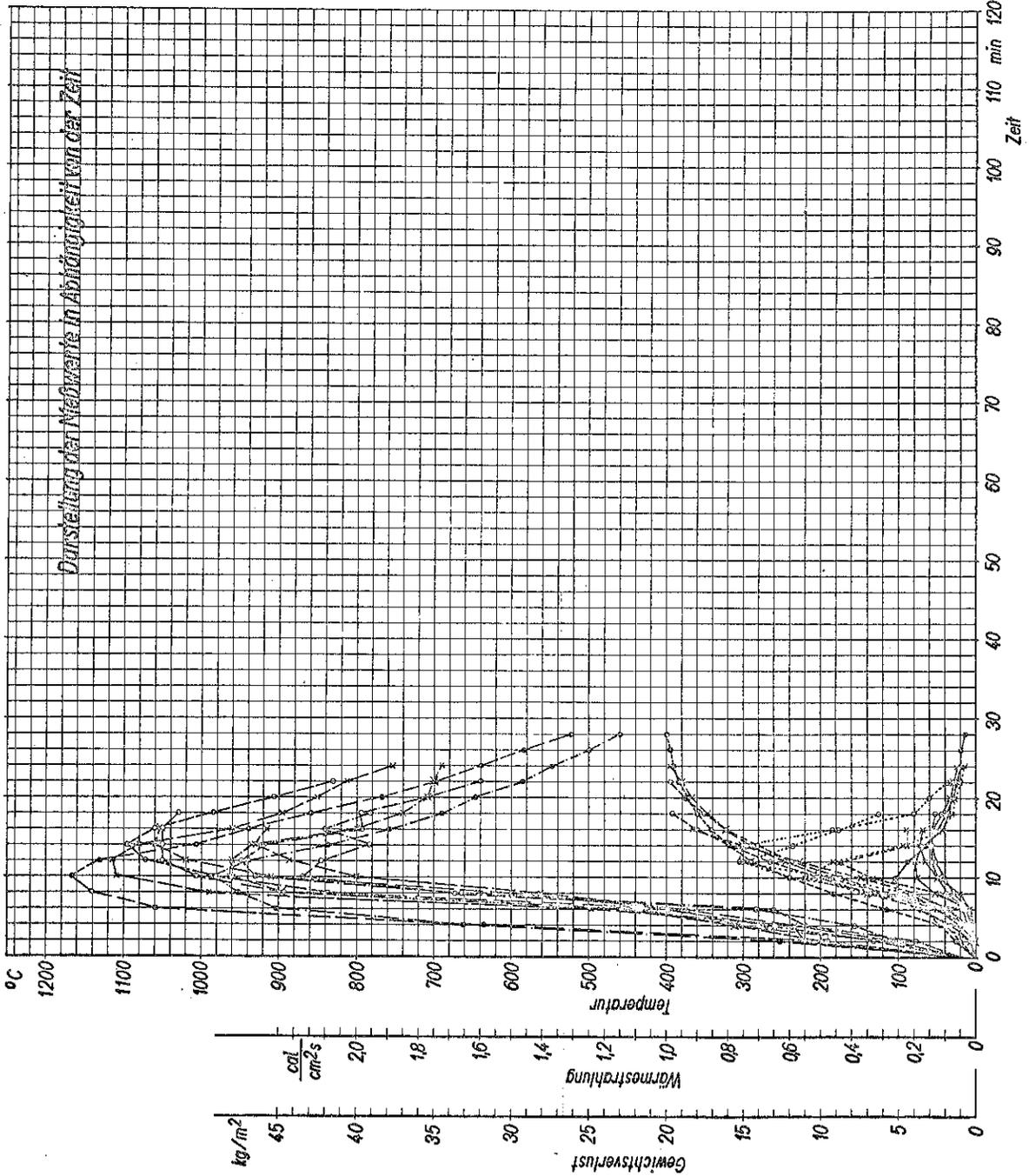
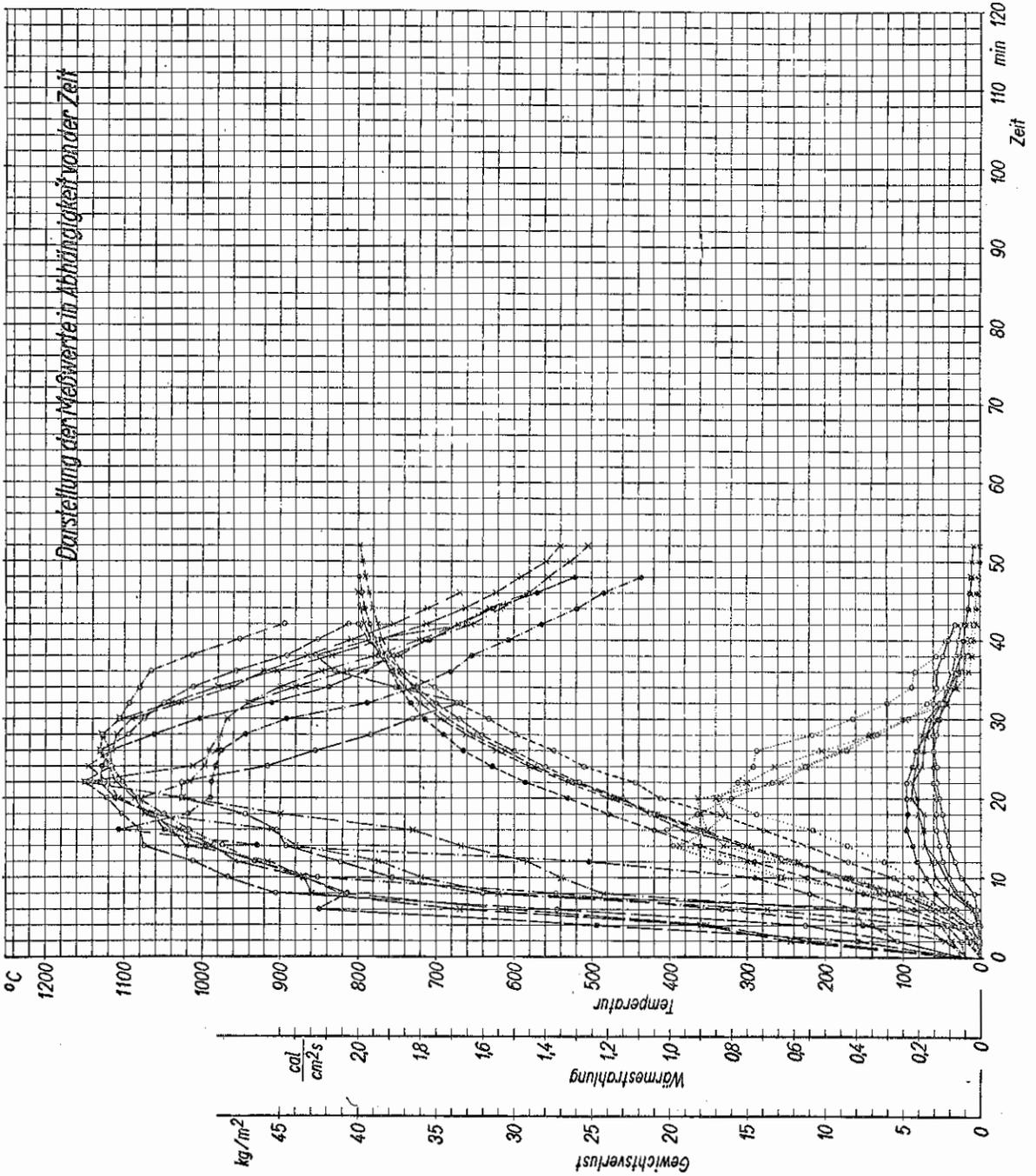


Bild Z 2		Zeichen		
Versuchsreihe	Versuch Nr.	○	●	x
1	5,8	○	●	x
2	28	○	●	x
3	13,14	○	●	x

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße		
Maßstab	1 m	
Breite	Tiefe	Höhe
2	1	1

Brandlast 40 kg/m²
 Ventilation 1/4
 Brandlastverteilung 2/1



Darstellung der Messwerte in Abhängigkeit von den Zeit

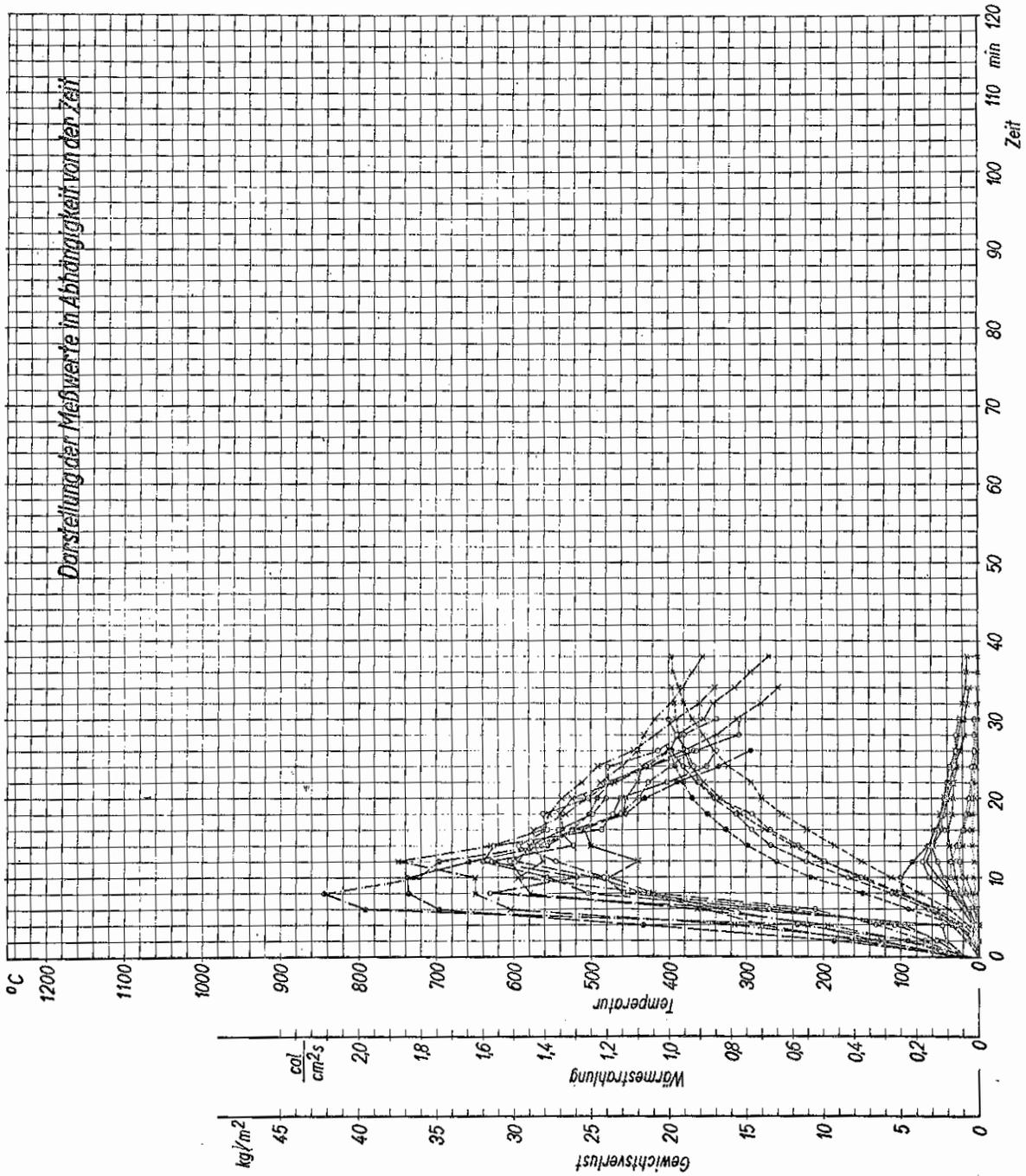


Bild Z3		
Versuchsreihe	Versuch Nr.	Zeichen
1	2,4	○
2	31	●
3	11,12	x

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	Flamme
Fenster	Flamme

Kastenmaße		
Maßstab 1 m		
Breite	Tiefe	Höhe
2	1	1

Brandlast 20 kg/m²

Ventilation 1

Brandlastverteilung 2A

Darstellung der Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit

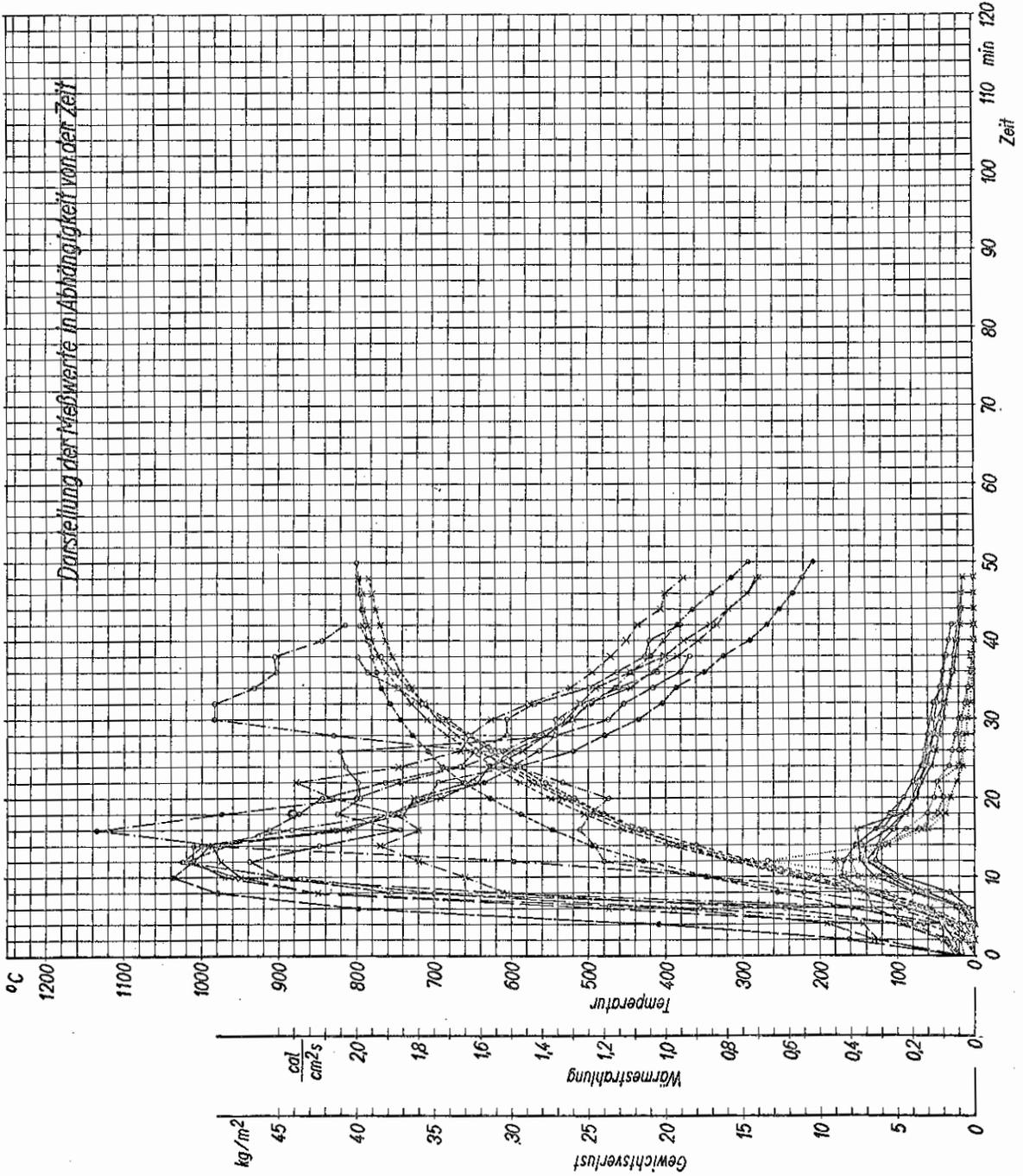


Bild Z 4		Zeichen	
Versuchsreihe	Versuch Nr.	o	e
1	3,7	o	e
2	32	e	e
3	15,16	e	x

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße	
Maßstab 1 m	
Breite	Tiefe
2	1
Höhe	
1	

Brandlast 40 kg/m²
 Ventilation 1
 Brandlastverteilung 2/1

Bild Z5	Versuchsreihe	1	2
	Versuch Nr.	10,15	14,18
	Zeichen	○	●

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastennmaße	
Maßstab 1 m	
Breite	Tiefe
2	2
Höhe	
1	

Brandlast 20 kg/m²
 Ventilation 1/4
 Brandlastverteilung 2/1

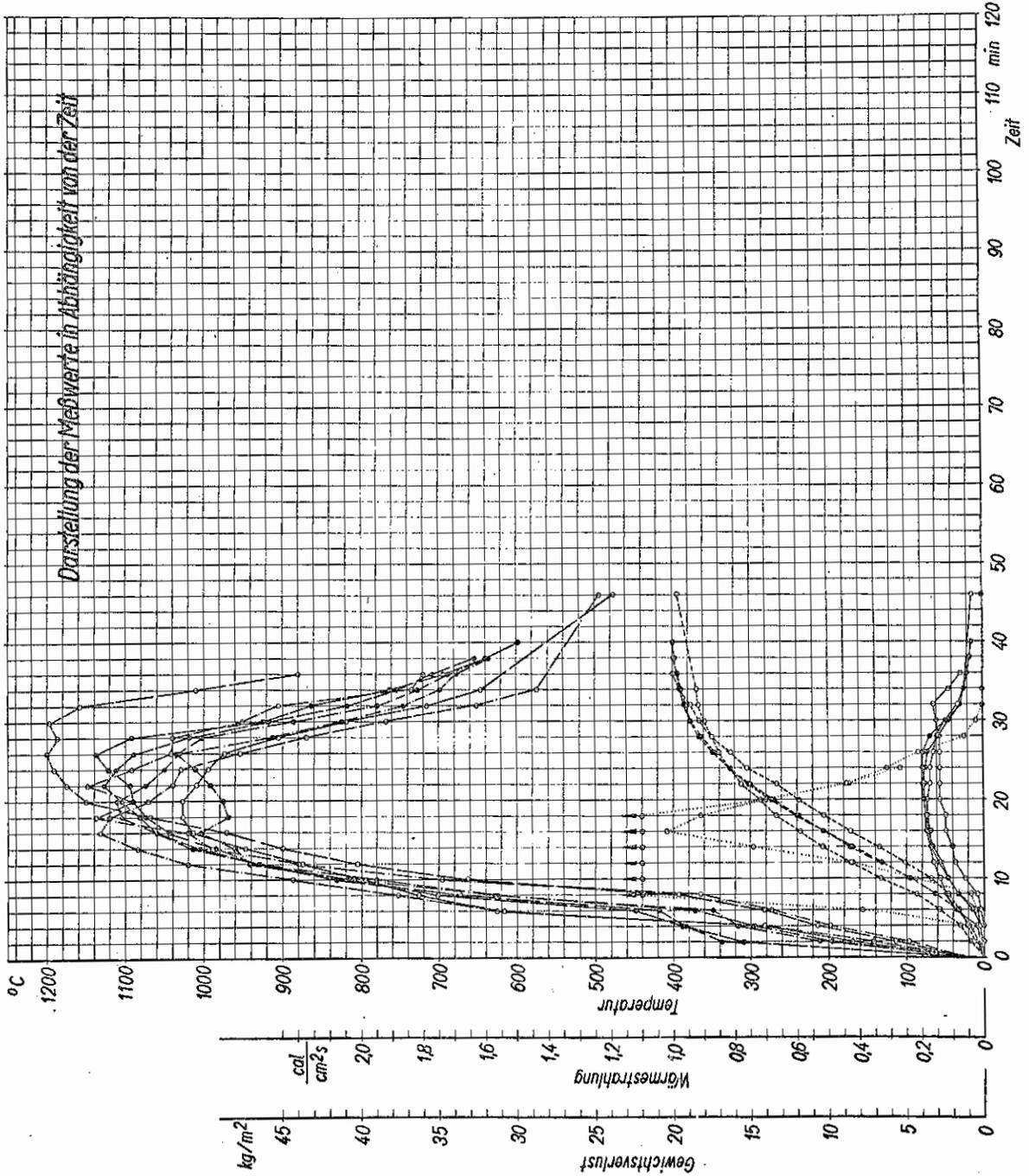


Bild Z 6	Versuchsreihe	1	2	Zeichen ○ ●
	Versuch Nr.	11, 16	15, 19	

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße	
Maßstab 1 m	
Breite	Tiefe
2	2
Höhe	
1	

Brandlast 40 kg/m²

Ventilation 1/4

Brandlastverteilung 2/1

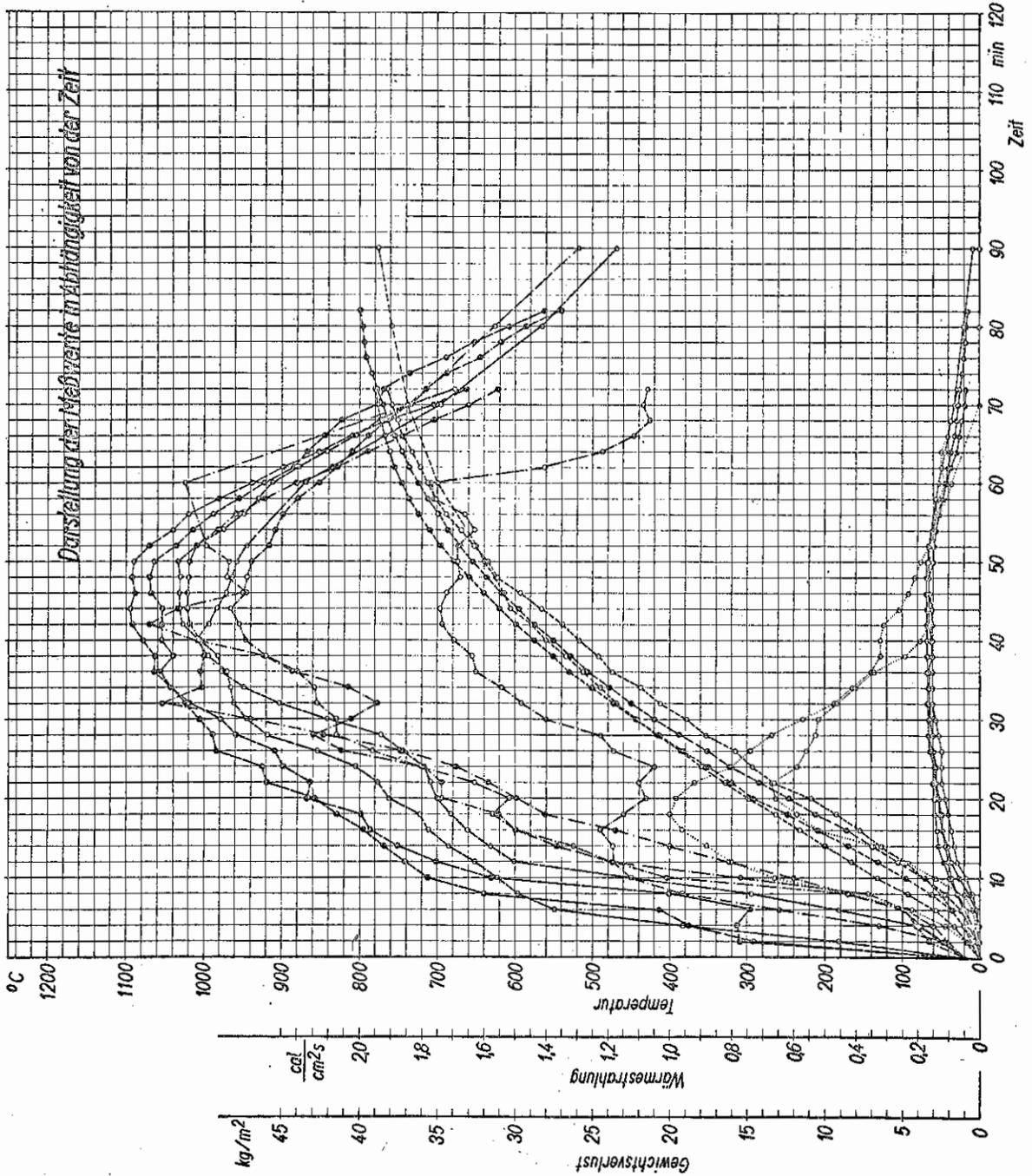


Bild Z 7	Versuchsreihe	1	2	Zeichen	○	●
	Versuch Nr.	9,12	16,20			

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße	
Maßstab	1 m
Breite	2
Tiefe	2
Höhe	1

Brandlast 20 kg/m²

Ventilation 1

Brandlastverteilung 2/1

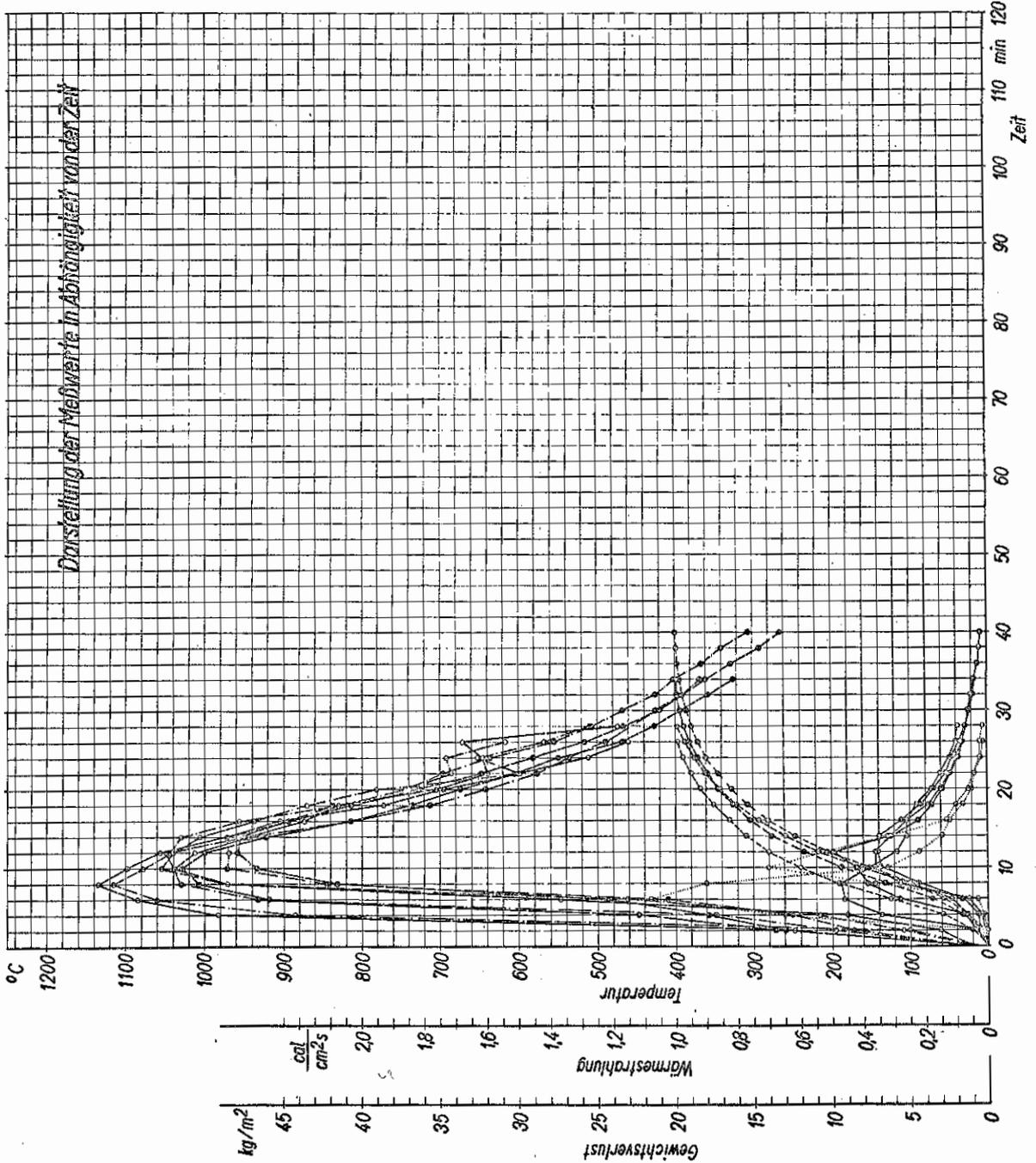


Bild Z 8	Versuchsreihe	1	2
	Versuch Nr.	13,14	17,21
	Zeichen	○	●

Gewichtsverlust	
Temperatur	Decke
Boden	
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße	
Maßstab 1 m	Höhe 1
Breite 2	Tiefe 2

Brandlast 40 kg/m²

Ventilation 1

Brandlastverteilung 2/1

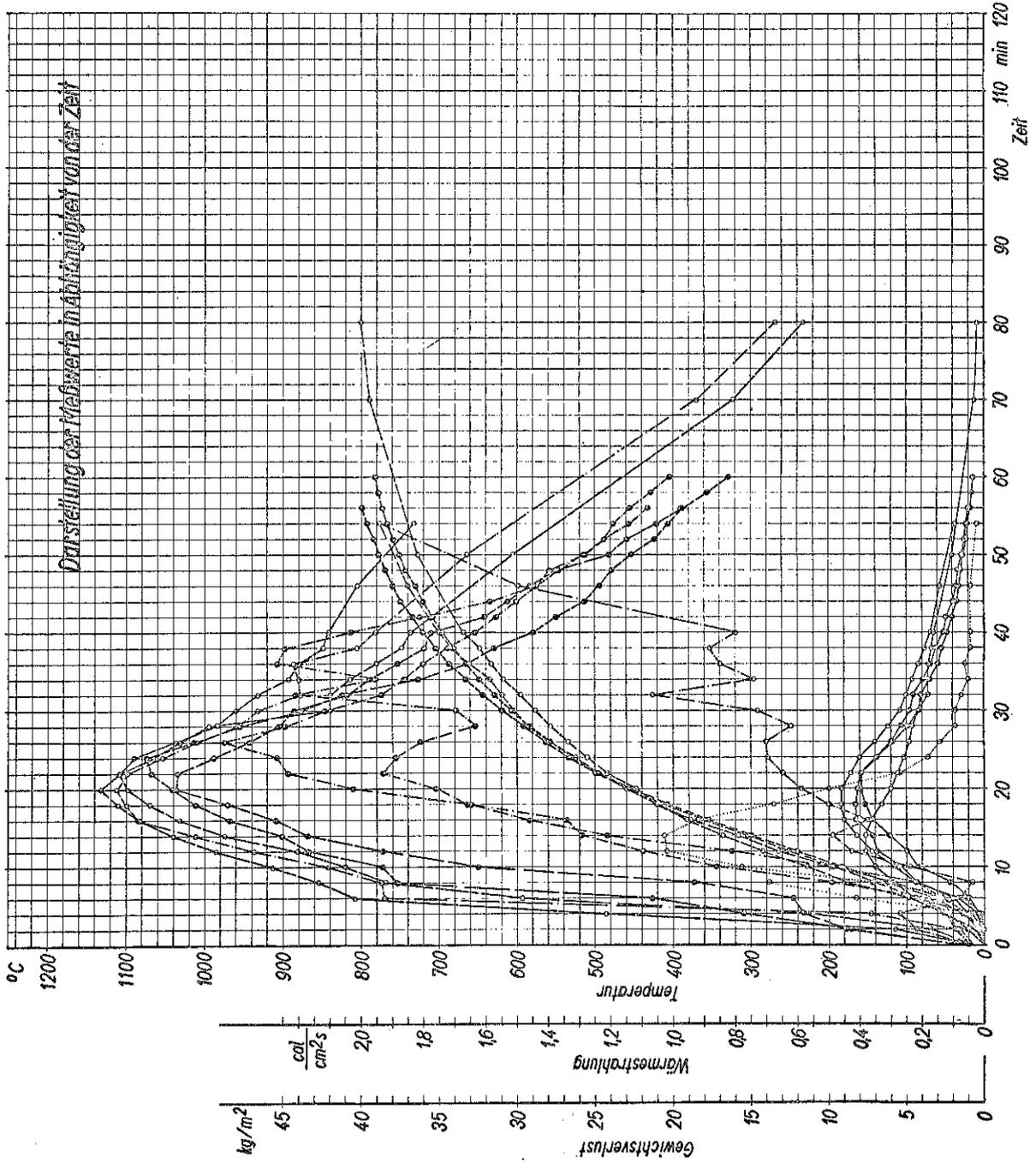


Bild Z9	Versuchsreihe	1	2
	Versuch Nr.	24	24
	Zeichen	o	e

Gewichtsverlust	
Temperatur	
Boden	Decke
Wärmestrahlung	
Fenster	Flamme

Kastenmaße		
Maßstab 1 m		
Breite	Tiefe	Höhe
2	2	1

Brandlast 30 kg/m²
 Ventilation 1/4
 Brandlastverteilung 2/1

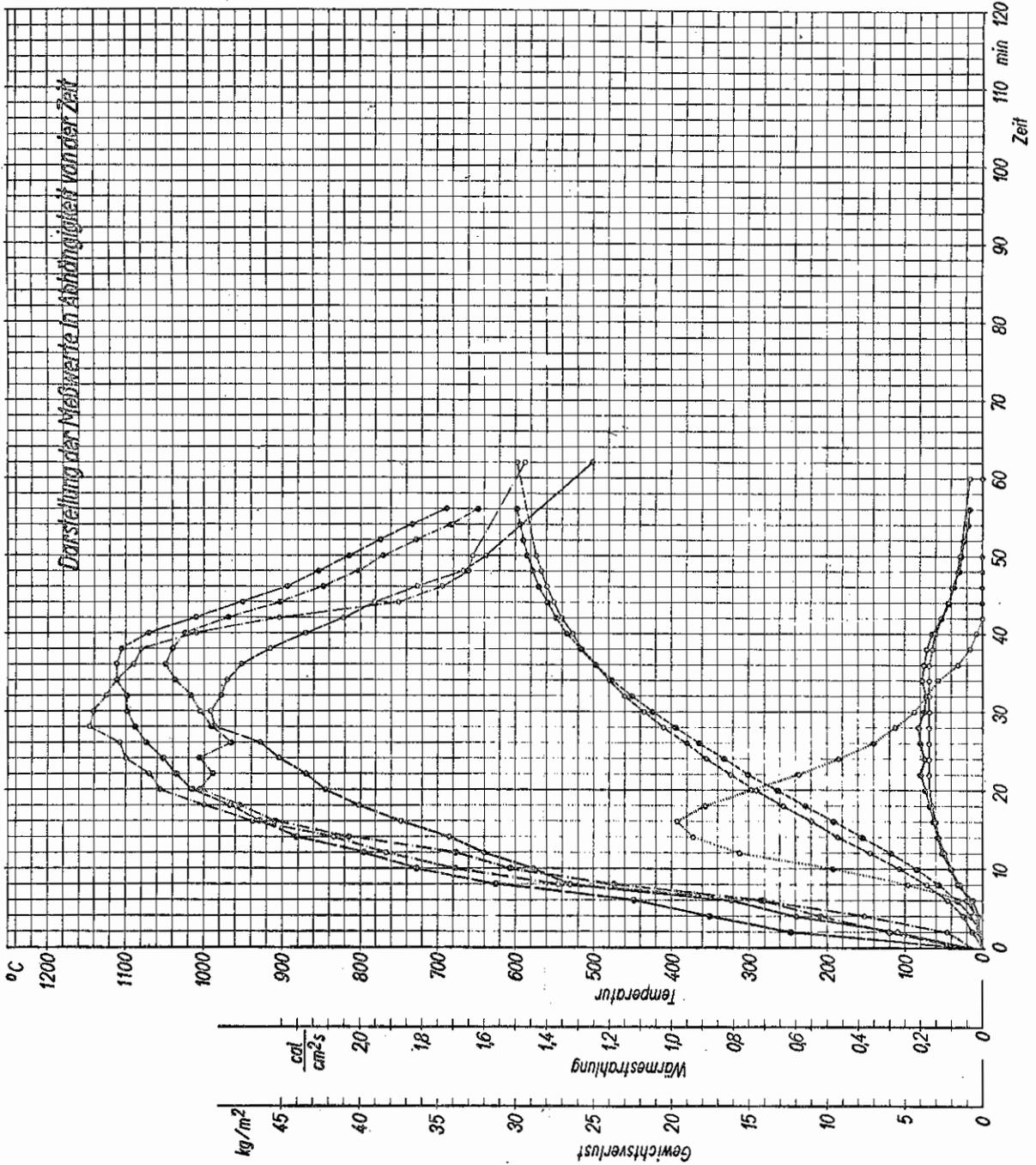


Bild Z10	Versuchsreihe	1	2	Zeichen	o	e
	Versuch Nr.	19	26			

Gewichtsverlust	Temperatur
Boden	Decke
Wärmestrahlung	Flamme
Fenster	

Kastenmaße	
Maßstab	1 m
Breite	2
Tiefe	2
Höhe	1

Brandlast 30 kg/m²
 Ventilation 1
 Brandlastverteilung 2/1

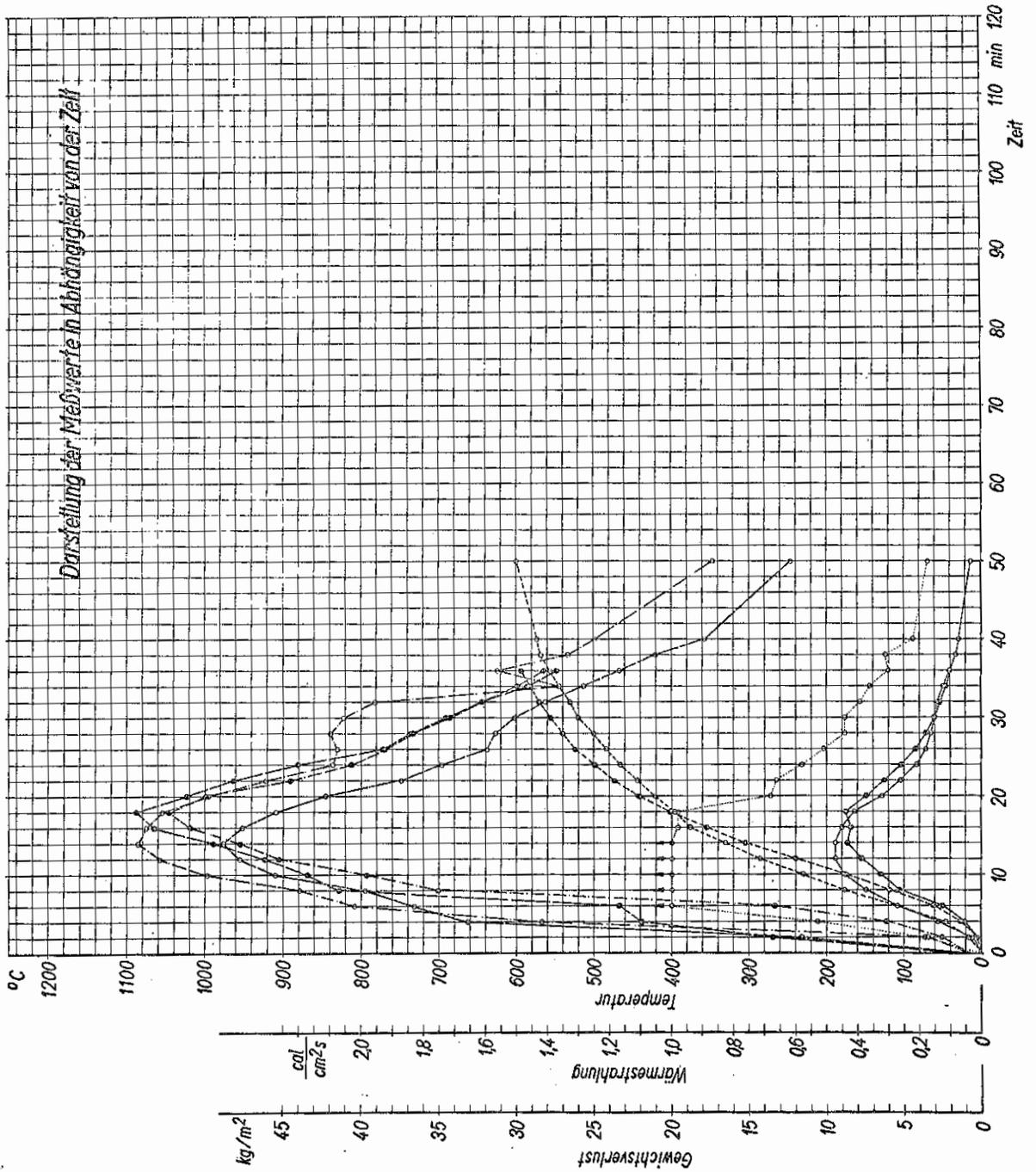
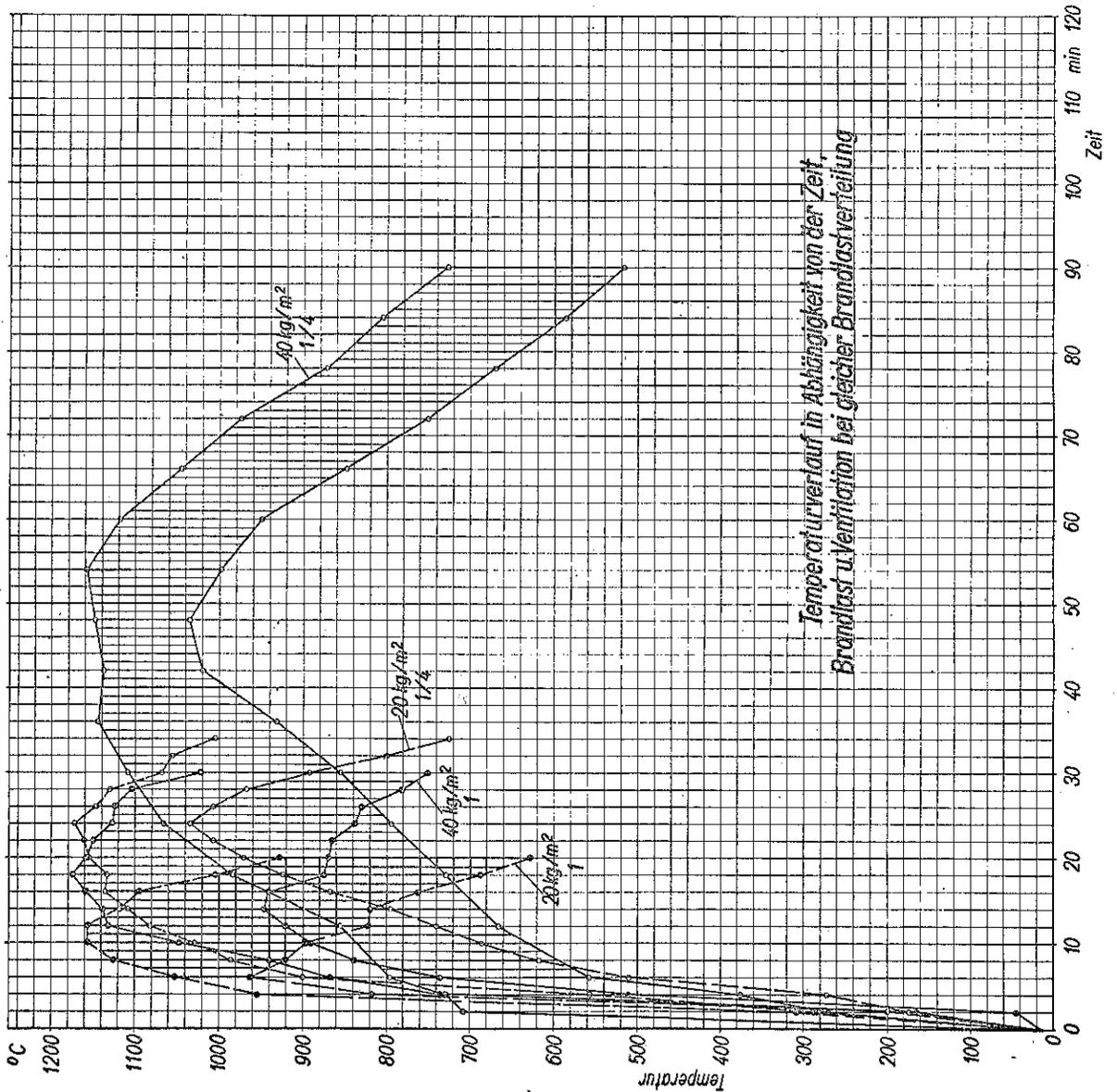


Bild Z11	Versuchsreihe	1	Zeichen	○ ●
	Ventilation	1/4 1		

Brandlast	—	20 kg/m ²
	—	40 kg/m ²
Brandlastverteilung	2/1	

Kastenmaße	Maßstab	1 m
	Breite	2
	Tiefe	2
	Höhe	1

Brandlast 20 kg/m²
40 kg/m²
Ventilation 1/4, 1



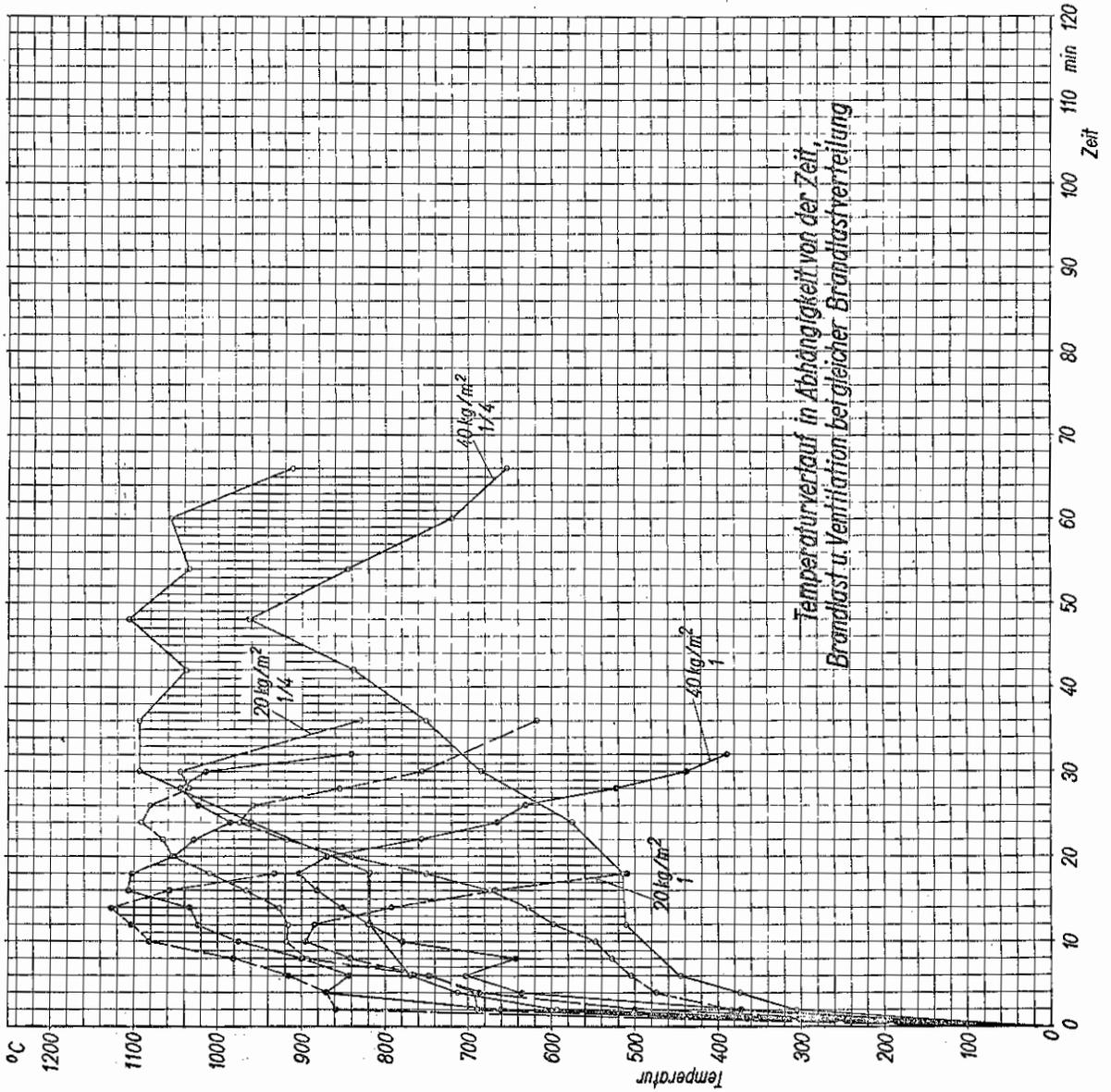
Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit,
Brandlast u. Ventilation bei gleicher Brandlastverteilung

Bild Z12	Versuchsreihe	1	Zeichen	○ ●
	Ventilation	1/4 1		

Brandlast	--- 20 kg/m ²
	— 40 kg/m ²
Brandlastverteilung	2/3

Kastenmaße	
Maßstab	1 m
Breite	2
Tiefe	2
Höhe	1

Brandlast 20 kg/m²
40
Ventilation 1/4, 1



Anhang B

zahlenmäßige Auswertung der
Versuchsergebnisse

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Ver- suchs- serie	Brand- raum- abmes- sungen	Brandlast			Fenster- anteil	Bezeichnung des Einzel- versuches	Versuchsdauer bis zum Erreichen einer Restbrand- last von			Abbrandgeschwin- digkeit		Wärmestrahlungsflußdichte cal cm ⁻² s ⁻¹			Mittlere Brandraumtemperatur °C					
		d	a	q			t ₈₀ min	t ₅₅ min	t ₃₀ min	R _{80/55} kg min ⁻¹	R _{55/30} kg min ⁻¹	I _o 80/55	I _f 80/55	I _r 55/30	überhalb des Bodens	unterhalb der Decke				
A	E S O I T U (2) S O K I E I X E I	1	2	6	1/4	34 36 35	7,3	16,1	25,9	0,566	0,510	0,070	0,085	0,240	0,335	145	361	543	713	
							11,3	19,6	28,3	0,602	0,575	0,075	0,110	0,200	0,290	520	750	695	839	
							7,3	15,2	23,0	0,633	0,640	0,075	0,095	0,200	0,300	236	630	567	749	
		1	2	6	1/2	39 38 37	4,7	10,5	16,9	0,862	0,780	0,130	0,160	0,150	0,210	0,375	121	402	576	736
							8,7	14,7	22,2	0,830	0,670	0,150	0,210	0,315	0,380	566	798	768	957	
							4,4	10,0	16,2	0,893	0,806	0,145	0,180	0,405	0,430	243	672	639	775	
	1	2	6	1	33 32 31 31A	3,3	6,4	10,8	1,610	1,135	0,200	0,265	0,295	0,460	133	228	650	745		
						5,6	10,0	15,7	1,135	0,877	0,230	0,345	0,395	0,435	632	864	770	959		
						2,5	5,3	9,0	1,785	1,850	0,185	0,265	0,340	0,425	281	463	635	725		
	B	E I X E N X E I	2	2	6	1/4	1 2 3	13,6	20,3	26,8	1,50	1,49	0,17	0,24	0,25	700	895	760	995	
								12,5	19,6	25,8	1,4	1,4	0,21	0,25	0,22	0,20	785	940	810	1005
								14,2	21,6	29,0	1,34	1,36	0,14	0,21	0,15	0,20	640	900	700	965
2			2	6	1/2	9 12 10	13,5	21,6	29,1	0,99	1,83	0,13	0,18	0,118	641	890	692	916		
							13,2	23,6	35,1	1,44	1,30	0,23	0,25	0,25	0,163	775	990	810	1005	
							16,3	29,9	46,0	1,47	1,24	0,21	0,22	0,22	0,16	725	950	830	1005	
2	2	6	1	5 6	15,6	29,4	45,9	1,45	1,21	0,21	0,22	0,22	595	835	770	965				
					17,4	31,8	48,3	1,38	1,22	0,18	0,19	0,23	0,16	615	855	735	930			
					17,6	32,6	49,6	1,32	1,18	0,170	0,185	0,208	0,165	640	850	742	955			
2	2	6	1/2	20 30 40	7,1	12,2	17,7	1,98	1,82	0,33	0,46	0,49	840	1045	835	1045				
					9,8	16,3	24,3	2,08	1,80	0,33	0,46	0,39	0,425	890	1030	930	1110			
					11,9	22,1	33,8	1,96	1,71	0,33	0,46	0,39	0,425	545	760	890	1050			
2	2	6	1	5 6 2 4	8,5	12,8	15,0	2,36	2,69	0,32	0,47	0,47	860	980	760	965				
					7,4	11,1	15,7	2,66	2,13	0,52	0,62	0,09	0,10	995	1070	980	1060			
					9,4	14,4	19,4	2,0	2,02	0,26	0,35	0,11	0,13	675	700	700	830			
					9,1	13,3	18,2	2,4	2,03	0,35	0,43	0,11	0,13	785	910	780	960			
2	2	6	30	7 8	7,0	12,8	19,9	2,63	2,93	0,61	0,60	0,60	945	1035	990	1085				
					10,6	17,8	27,4	2,76	2,08	0,61	0,57	0,60	0,64	615	760	960	1085			
					9,2	16,2	25,0	2,86	2,29	0,52	0,57	0,36	0,30	520	740	960	1090			
					11,2	18,5	28,0	2,7	2,12	0,53	0,52	0,33	0,26	780	860	950	1055			
2	2	6	40	7 8	12,0	19,6	29,0	2,63	2,13	0,53	0,52	0,52	775	875	955	1080				

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Fortsetzung)

Ver- suchs- serie	Brandlast		Fenster- anteil	Bezeichnung des Einzel- versuches	Versuchsdauer bis zum Erreichen einer Restbrand- last von				Abbrandgeschwin- digkeit		Wärmestrahlungsflühdichte cal cm ⁻² s ⁻¹						Mittlere Brandraumtemperatur °C			
	d cm	a cm			q kg/m ²	80 % t ₈₀ min	55 % t ₅₅ min	30 % t ₃₀ min	R _{80/55} kg min ⁻¹	R _{55/30} kg min ⁻¹	vor der Öffnung			über der Öffnung			oberhalb des Bodens		unterhalb der Decke	
											I _o 80/55	I _o 55/30	I _r 55/30	I _r 80/55	I _r 80/55	I _r 55/30	I _b 80/55	I _b 55/30	I _b 80/55	I _b 55/30
C	2	2	20	(1)	6,1	9,4	12,6	3,04	3,12	0,070	0,130	0,230	0,700	611	855	769	1030			
				(1)	6,6	10,2	13,9	2,76	2,71	0,070	0,130	0,230	0,715	720	934	828	1068			
				(2)	5,0	7,9	11,6	3,43	2,69	0,19	0,24	0,42	0,348	793	950	1015	1140			
				(3)	6,9	9,8	13,5	3,45	2,88	0,14	0,19	0,33	0,42	690	870	875	1100			
				(3)	8,1	10,8	13,4	3,64	3,88	0,103	0,166	0,255	0,348	800	930	800	1010			
				(2)	7,3	11,9	16,8	3,32	3,06	0,17	0,21			860	930	935	1080			
				(1)	11,8	18,6	26,2	2,94	2,64	0,100	0,140	0,505	0,770	997	1095	884	963			
				(1)	9,5	15,5	24,0	3,34	2,36	0,120	0,140	0,830	0,790	-1)	-1)	1024	1121			
				(2)	8,3	14,0	21,1	3,51	2,82	0,19	0,23	0,723	0,785	590	975	915	1065			
				(3)	9,6	16,2	23,4	3,02	2,76	0,15	0,19	0,633	0,73	623	890	940	1070			
				(3)	9,7	16,0	23,2	3,16	2,78	0,146	0,193	0,633	0,73	805	965	955	1085			
				(2)	4,9	8,0	13,0	3,26	2,10	0,19	0,20			780	695	800	840			
				(2)	5,4	9,2	15,1	3,97	2,61	0,33	0,28			940	880	1010	955			
				(2)	7,0	11,9	16,9	4,13	2,85	0,33	0,33			410	755	1015	1055			
				(1)	7,1	11,2	16,9	2,44	1,76	0,100	0,130	0,040	0,050	460	578	552	590			
				(1)	6,8	10,6	15,1	2,64	2,22	0,110	0,175	0,060	0,080	486	595	530	608			
(2)	5,7	8,9	13,1	3,08	2,43	0,21	0,25	0,015	0,018	760	700	720	695							
(3)	6,2	13,7	20,0	1,82	1,59	0,080	0,085	0,04	0,05	573	535	465	490							
(3)	7,1	11,3	16,2	2,40	2,03	0,12	0,14	0,04	0,05	665	630	475	545							
(2)	7,3	11,0	14,9	4,09	3,79	0,26	0,32			665	815	865	870							
(1)	8,6	13,4	22,3	4,17	2,25	0,310	0,240	0,400	0,160	982	798	895	805							
(1)	9,0	14,0	21,9	4,00	2,54	0,280	0,260	0,360	0,170	412	504	996	879							
(2)	6,0	10,3	16,6	4,68	3,17	0,32	0,37	0,305	0,208	225	745	925	930							
(3)	8,8	13,5	21,3	4,21	2,62	0,308	0,283	0,305	0,208	683	835	950	830							
(3)	8,3	13,1	20,6	4,18	2,68	0,29	0,27	0,28	0,21	615	730	915	845							

1) Thermelemente in der 10. Minute ausgefallen

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Fortsetzung)

Versuchsreihe	Brandlast	Fensteranzugteil	Versuchsdauer bis zum Erreichen einer Restbrandlast von			Abbrandgeschwindigkeit	Wärmestrahlungsfußdichte		Mittlere Brandraumtemperatur						
			80 % t ₈₀ min	55 % t ₅₅ min	30 % t ₃₀ min		R _{80/55} kg min ⁻¹	R _{55/30} kg min ⁻¹	vor der Öffnung	über der Öffnung	oberhalb des Bodens	unterhalb der Decke			
d	a	g				cal cm ⁻² s ⁻¹		°C							
cm	cm	kg/m ²				I _o 80/55	I _o 55/30	I _f 80/55	I _f 55/30	b 80/55	b 55/30	c 80/55	c 55/30		
D	1	3	20	(1)	5,2	10,7	16,8	3,64	3,28	-	-	549	930	510	751
				(1)	7,0	16,0	25,7	3,34	3,09	0,650	0,670	251	808	544	755
				(1)	9,3	21,4	34,4	3,31	3,08	0,460	0,500	121	456	572	701
	2	2	20	(1)	7,5	12,3	19,1	4,17	2,94	>1,100 ²⁾	>1,100 ²⁾	881	1106	798	986
				(1)	10,7	16,4	22,7	3,51	3,18	0,430	0,470	947	1110	876	1110
				(2)	14,5	20,6	28,7	3,33	3,28	0,18	0,170	830	1060	860	1060
	2	2	40	(2)	9,1	14,6	20,7	3,62	3,30	0,14	0,19	860	970	900	1050
				(1)	10,6	18,8	28,8	3,66	3,00	0,170	0,170	871	1098	713	903
				(2)	12,1	20,4	29,8	3,63	3,20	0,15	0,15	840	1000	905	1055
	2	2	40	(1)	16,4	28,9	43,4	3,20	2,76	0,155	0,155	454	639	716	955
				(1)	12,0	24,0	40,0	3,33	2,50	0,125	0,125	597	845	724	951
				(2)	15,2	26,4	40,7	3,66	2,81	0,14	0,16	715	940	850	985
2	2	40	(2)	13,5	24,5	38,7	3,61	2,82	0,14	0,16	535	845	845	1000	
			(1)	4,8	10,7	16,0	3,39	3,77	0,080	0,105	513	760	495	663	
			(1)	7,2	16,0	25,0	3,41	3,33	0,085	0,110	339	879	508	734	
2	2	40	(1)	10,8	21,7	33,8	3,67	3,30	0,085	0,105	176	600	477	662	
			(2)	7,0	11,4	16,7	4,55	3,80	0,24	0,30	975	1015	965	1040	
			(2)	9,8	16,3	24,1	4,55	3,84	0,24	0,31	860	1040	920	1050	
2	2	40	(2)	10,9	19,9	31,3	4,45	3,52	0,24	0,27	410	735	860	985	
			(1)	3,3	6,0	10,0	7,40	5,00	0,300	0,418	637	916	631	841	
			(1)	4,9	9,5	16,8	8,70	5,48	0,295	0,400	185	380	642	815	
2	2	20	(1)	7,4	10,6	15,0	6,25	4,55	0,320	0,335	1018	1028	1000	975	
			(1)	4,8	7,7	12,0	6,90	4,65	0,456	0,405	1060	1088	1093	1100	
			(2)	6,2	9,7	14,3	5,55	4,40	0,36	0,24	995	1000	975	970	
2	2	40	(2)	7,0	11,0	15,9	5,00	5,14	0,24	0,33	800	960	770	930	
			(1)	6,4	11,4	20,0	6,00	3,48	0,395	0,430	940	1066	856	937	
			(2)	8,1	14,8	18,9	6,15	3,05	0,33	0,41	825	1000	900	1020	
2	2	40	(1)	7,6	15,1	28,4	5,34	3,01	0,290	0,290	901	1065	955	1089	
			(1)	9,3	15,5	25,6	6,45	3,96	0,430	0,430	150	234	908	1088	
			(2)	8,7	15,9	25,7	5,50	4,10	0,30	0,29	345	780	665	927	
2	2	40	(2)	16,2	26,1	39,9	5,50	4,05	0,32	0,34	390	625	890	995	
			(1)	1,5	2,9	4,2	5,12	5,51	0,195	0,290	502	647	698	750	
			(1)	3,2	5,5	9,0	7,70	5,72	0,240	0,350	281	435	610	755	
2	2	40	(1)	3,5	6,8	12,2	9,10	3,56	0,280	0,395	433	612	612	704	
			(1)	4,2	7,9	13,9	10,81	6,67	0,250	0,310	180	305	620	685	
			(1)	4,2	7,9	13,9	10,81	6,67	0,250	0,310	180	305	620	685	

- 1) Überschreitung des Meßbereiches
- 2) Radiometer ausgefallen
- 3) Thermoelemente ausgefallen

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Fortsetzung)

Versuchsreihe	Brandlast		Per- ster- an- teil	Bereich- ung des Einzel- versuches	Versuchsdauer bis zum Erreichen einer Restbrand- last von			Abbrandgeschwin- digkeit		Wärmeabstrahlungsflußdichte cal cm ⁻² s ⁻¹			Mittlere Brandraumtemperatur °C			
	d	a			q	80 %	55 %	30 %	R _{80/55}	R _{55/30}	vor der Öffnung	über der Öffnung	unterhalb des Bodens	oberhalb des Bodens	unterhalb der Decke	
	cm	cm	kg/m ²	min	min	min	kg min ⁻¹	kg min ⁻¹	I _{0,80/55}	I _{0,55/30}	I _{1,80/55}	I _{1,55/30}	t _{80/55}	t _{55/30}	t _{80/55}	t _{55/30}
E	1	3	20 30 40	(3) (3) (3)	3,7 4,9 5,6	6,0 8,6 10,2	8,6 12,7 15,5	8,53 8,09 8,35	0,16 0,20 0,20	0,26 0,24 0,24	1,03 1,28 1,37	1,63 1,58 1,53	720 880 570	940 960 965	920 965 755	1130 1150 990
	2	0,67	20 30 40	(3) (3) (3)	13,9 19,1 16,8	20,4 28,1 27,7	29,7 42,4 45,3	2,40 2,36 2,36	0,04 0,045 0,07	0,05 0,050 0,058	0,08 0,066 0,170	0,07 0,053 0,06	560 513 620	645 530 543	595 630 660	665 690 723
	2	2	20 30 40	(3) (3) (3)	6,4 8,0 8,5	9,3 10,7 13,5	12,6 13,2 20,8	6,75 6,15 6,14	0,11 0,21 0,19	0,15 0,18 0,20	0,42 1,05 1,05	0,49 0,59 0,65	770 1050 1075	985 935 1040	845 1160 1135	1035 1120 1130
	2	6	20 30 40	(3) (3) (3)	3,0 4,4 4,3	6,0 8,2 9,9	7,4 12,1 14,8	10,70 9,00 9,74	0,15 0,165 0,155	0,22 0,230 0,210	0,85 1,330 1,030	1,45 1,76 1,358	1070 930 900	990 685 610	1030 920 735	1165 1110 938
	4	4	20 30 40	(3) (3) (3)	4,5 5,4 7,1	7,3 9,0 12,4	10,4 13,6 20,1	8,05 9,36 8,45	0,120 0,19 0,20	0,140 0,19 0,188	0,445 0,88 1,18	0,380 0,59 0,60	990 1010 965	945 1015 1025	960 1105 1145	1030 1115 1150
	1	3	20 30 40	(3) (3) (3)	3,0 3,8 4,6	5,1 6,5 7,6	8,0 10,1 12,1	7,68 8,33 9,92	0,353 0,440 0,45	0,335 0,400 0,43	0,335 0,705 0,97	0,270 0,565 0,61	830 745 225	820 820 645	858 1010 890	852 945 945
	2	0,67	20 30 40	(3) (3) (3)	12,5 22,5 33,8	20,9 39,8 49,3	30,3 57,8 66,4	2,40 1,86 2,62	0,043 0,035 0,045	0,050 0,040 0,060	0,007 0,007 0,010	0,010 0,010 0,010	325 300 375	325 300 270	295 260 345	
	2	2	20 30 40	(3) (3) (3)	7,2 9,2 14,1	11,2 17,9 21,4	16,8 17,9 21,4	4,0 5,55 6,15	0,10 0,15 0,23	0,10 0,18 0,23	0,03 0,08 0,13	0,02 0,07 0,10	440 495 750	440 495 750	460 605 775	460 655 750
	2	6	20 30 40	(3) (3) (3)	2,8 3,6 4,0	4,6 5,9 6,7	6,6 8,7 10,1	11,20 11,75 11,75	0,34 0,33 0,34	0,39 0,42 0,41	0,32 0,61 0,77	0,27 0,63 0,63	900 715 345	865 810 770	900 915 860	875 925 925
	4	4	20 30 42	(3) (3) (3)	6,7 6,9 8,5	11,7 12,0 14,2	17,9 18,3 21,2	3,67 2,24 6,85	0,055 0,100 0,18	0,065 0,115 0,20	0,015 0,045 0,10	0,015 0,038 0,09	540 725 825	430 600 750	375 515 670	385 515 550