

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten.

33

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

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

Forschungsbericht Nr. 33

Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten.

von
Dipl.-Ing. Peter Fuchs

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Mai 1978

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, zum einen das Brandgeschehen bei einem Brand in einem geschlossenen Raum mit Ventilationsöffnung zu beschreiben, zum anderen einige physikalische Vorgänge beim Löschen eines Brandes mit Feststoffen als Brandgut zu erläutern. Bei der Untersuchung des Brandgeschehens interessieren in erster Linie folgende Fragen:

- a) Wie lange dauert ein Brand bei vorgegebenen Bedingungen?
- b) Welche Temperaturen entstehen dabei im Brandraum?

Die Beantwortung dieser Fragen ist von enormer volkswirtschaftlicher Bedeutung, wenn man die jährlich durch Feuer entstehenden Schäden bedenkt.

Es ist daher das Ziel einer theoretischen Betrachtung, diese Fragen zu beantworten, zumal genaue Kenntnisse des Brandgeschehens auch für die Beurteilung der Vorgänge beim Löschen eines Brandes unerlässlich sind.

Zur Simulation von Zimmerbränden wurde eine Versuchsanlage im Maßstab 1 : 1 erstellt, die so ausgelegt ist, daß alle Daten, die für die Beurteilung der Größe und Verlaufes eines Brandes erforderlich sind, gemessen werden können.

Da es bei der Bekämpfung von Bränden, insbesondere von Zimmerbränden, immer wieder vorkommt, daß durch überschüssiges Löschwasser erhebliche Schäden verursacht werden, wurden im Rahmen dieses Forschungsprogrammes Löschmittel und -methoden mit dem Ziel untersucht, die Brandbekämpfung zu verbessern und die Schadenswassermenge zu verringern.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
1. Einleitung	1
2. Theoretische Beschreibung des Brand- geschehens	2
2.1 Modellvorstellung	2
3. Löschversuche mit verschiedenen Löschmitteln	9
3.1. Untersuchung der Löschwirkung ver- schiedener Löschmittel an Modell- bränden	9
3.1.1 Versuchseinrichtung	9
3.1.2 Versuchsdurchführung	10
3.1.3 Versuchsauswertung	11
3.1.4 Brandverhalten	12
3.1.5 Löschwirkung der verschiedenen Löschmittel	13
3.1.6 Löschmittelverbrauch	14
3.1.7 Löschzeiten	16
3.1.8 Temperaturmessung	16
3.2 Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab	18
3.2.1 Versuchsanlage und Messeinrichtung	18
3.2.2 Versuchsbedingungen und Versuchs- durchführung	20
3.2.3 Brandentwicklung	21
3.2.4 Temperaturentwicklung	22
3.2.5 Optische Rauchdichte	24
3.2.6 Schadenswasser	25
3.2.7 Löschmittel und Löschzeiten	25
4. Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Modellvorstellung	32
5. Zusammenfassung	37
6. Formelzeichen	39
7. Literaturverzeichnis	41
8. Tabellen und Bilder	45

Die Löschwirkung verschiedener Löschmittel wurde aus Kostengründen zunächst an Modellbränden aus Holzkrippen untersucht und die Erkenntnisse bei den Löschversuchen vollentwickelter Zimmerbrände in natürlichem Maßstab mit Möbeln als Brandgut angewendet.

Die Brände in natürlichem Maßstab wurden in Zusammenarbeit mit der Berufsfeuerwehr Karlsruhe möglichst praxisnah gelöscht.

2. THEORETISCHE BESCHREIBUNG DES BRANDGESCHEHENS

2.1 Modellvorstellung

Bei der Untersuchung des Brandablaufes geht man im allgemeinen von folgender Modellvorstellung aus [1 -10]:

In einem Raum mit bestimmten Abmessungen befindet sich das Brandgut. Durch eine Fensteröffnung kann Frischluft dem Brandgut zuströmen und Rauchgas austreten. Die Strömung der Gase wird hauptsächlich von Dichtegradienten verursacht, die aufgrund eines Temperaturunterschiedes bestehen. In Bild 1 ist das schematische Strömungsprofil der ein- und ausströmenden Gase zu sehen. Die ein- und ausströmenden Gasmengen lassen sich nach [1, 2, 9, 10] wie folgt berechnen:

Gasaustritt:

$$\frac{\rho_R v_R^2}{2g} = h_{Rx} (\rho_L - \rho_R) \quad (1)$$

Gaseintritt:

$$\frac{\rho_L v_L^2}{2g} = h_{Lx} (\rho_L - \rho_R) \quad (2)$$

Durch Integration über das Strömungsprofil und Einführen eines Strömungsbeiwertes α erhält man mit

$$\frac{\rho_L}{\rho_R} = \frac{T_R}{T_L} \quad (3)$$

$$V_R = \alpha \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_R^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{T_R}{T_L} - 1} \quad (4)$$

$$V_L = \alpha \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_L^{3/2} \cdot \sqrt{1 - \frac{T_L}{T_R}} \quad (5)$$

Für stöchiometrische Verbrennung gilt

$$\frac{h_R}{h_L} = \left(\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}} \cdot \frac{T_R}{T_L} \cdot \sqrt{\frac{1 - T_L/T_R}{T_R/T_L - 1}} \right)^{2/3} = \left(\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{T_R}{T_L} \right)^{1/3} \quad (6)$$

V_{Rst} und V_{Lst} können nach [11] in Abhängigkeit vom Heizwert des Brandstoffes berechnet werden.

Damit folgt mit

$$F = b \cdot h \quad (7)$$

$$V_R = \alpha \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot F \cdot \sqrt{h} \sqrt{\frac{T_R}{T_L} - 1}$$

$$\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}} \cdot \left(\frac{T_R}{T_L} \right)^{1/2} \cdot \left(1 + \left(\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{T_R}{T_L} \right)^{1/3} \right)^{-2/3} \quad (8)$$

$$V_L = \alpha \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot F \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{1 - \frac{T_L}{T_R}} \cdot \left(1 + \left(\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{T_R}{T_L} \right)^{1/3} \right)^{-3/2} \quad (9)$$

$$\phi = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot F \cdot \sqrt{h} \quad (9a)$$

Wenn die Luftzahl λ verschieden von 1 ist, muß in Gleichung (8) und Gleichung (9) $\frac{V_{Rst}}{V_{Lst}}$ ersetzt werden durch

$$\frac{V_{Rst} + (\lambda - 1) \cdot V_{Lst}}{\lambda \cdot V_{Lst}}$$

Der Faktor ϕ in Gleichung (8) und Gleichung (9) wird auch als "Ventilationsparameter" bezeichnet, da \dot{V}_L ab Temperaturen über 300 °C kaum noch zunimmt und in diesem Temperaturbereich wesentlich vom Ventilationsparameter ϕ abhängt. Mit Hilfe der oben angegebenen Gleichung lassen sich die Rauchgas- bzw. Frischluftströme recht genau bestimmen.

Schwierigkeiten dagegen bereitet die Berechnung des zeitlichen Massenverlustes der Brandstoffe \dot{m} für den die Beziehung.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad (10)$$

gilt.

Der zeitliche Massenverlust \dot{m} wird von verschiedenen Autoren [1, 2, 9] nach der Gleichung

$$\dot{m} = k_1 \cdot F \cdot \sqrt{h} \quad (11)$$

berechnet.

In dieser Gleichung wird der zeitliche Massenverlust \dot{m} proportional zur Fensterfläche und zur Wurzel aus der Fensterhöhe gesetzt.

Harmathy [1] leitet aus der Auswertung einer Vielzahl von Versuchsdaten ein Kriterium für die Berechnung des zeitlichen Massenverlustes in der stationären Phase ab.

Das Brandverhalten in der stationären Phase wird in 2 Bereiche eingeteilt, zum einen der Brand, bei dem die Ventilationsbedingung den maßgeblichen Einfluß hat, und zum anderen der Brand, bei dem die reaktionsfähige Oberfläche des Brandgutes den Brandverlauf beeinflußt. Dementsprechend wird der zeitliche Massenverlust \dot{m} einmal proportional zum Ventilationsparameter ϕ

$$\dot{m} = k_1 \cdot \phi \quad (12)$$

und zum anderen proportional zur Brennstoffoberfläche F_B

$$\dot{m} = k_2 \cdot F_B \quad (13)$$

gesetzt.

Bei dieser Berechnung des zeitlichen Massenverlustes bleibt die Temperatur im Brandraum unberücksichtigt bzw. wird $T > 300^\circ \text{C}$ angenommen, obwohl diese einen maßgeblichen Einfluß auf die entstehende Brandgasmenge hat, wie noch gezeigt wird.

Mit dem zeitlichen Massenverlust \dot{m} sowie dem Heizwert des Brandgutes kann der entstehende Verbrennungswärmestrom berechnet werden. Ein Teil dieses Wärmestromes wird von den Brandgasen durch Konvektion, Strahlung und Leitung an die Raumwände und an das Brandgut übertragen, während der andere Teil durch Strahlung, Wärmeleitung durch Wände und Transport mit den Brandgasen aus dem Raum abgeführt wird.

Daraus ergibt sich folgende Wärmebilanz:

$$\dot{Q}_r = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l + \dot{Q}_t + \dot{Q}_B \quad (14)$$

Die Werte für \dot{Q}_s , \dot{Q}_l und \dot{Q}_t kann man nach den bekannten Wärmeübertragungsgleichungen berechnen.

Für die Bestimmung von \dot{Q}_B ist die Oberfläche der Brandstoffe und deren geometrische Anordnung im Brandraum eine maßgebliche Einflußgröße.

Die Berechnung von \dot{Q}_r hängt davon ab, wie genau der zeitliche Massenverlust \dot{m} bestimmt werden kann. Dabei ergibt sich allerdings das Problem, daß bei einem vollentwickelten Brand ein Teil der Verbrennung außerhalb des Raumes vonstatten gehen kann, sodaß noch ein Faktor zur Korrektur des dem Brandraum zugeführten Wärmestromes eingeführt werden muß.

Thermogravimetrische Messungen [12, 13] ergaben, daß der Gewichtsverlust bzw. der zeitliche Massenverlust \dot{m} eine Funktion der Probertemperatur ist, d.h.:

$$\dot{m} = f_1(T_B) \quad T_B = \text{Brandguttemperatur} \quad (15)$$

Wenn die Brandguttemperatur eine eindeutige Funktion der Raumtemperatur T ist, also

$$T_B = f_2(T) \quad (16)$$

dann gilt auch

$$\dot{m} = f_3(T) \quad (17)$$

Diese Beziehung setzt voraus, daß eine integrale Betrachtung der Vorgänge im Brandraum zulässig ist und gilt auch für die Entstehungsphase.

Die Einführung der Raumtemperatur als Parameter ist sinnvoll, weil diese Größe maßgeblich ist für Schäden an Gebäuden oder Gebäudeteilen.

Die Verbrennung eines festen Brandstoffes ist eine Reaktion, die in zwei Schritten abläuft. Im ersten Schritt entstehen brennbare Gase (Pyrolyse) und im zweiten Schritt reagieren diese Gase mit Luftsauerstoff (Verbrennung). Somit kann der zeitliche Massenverlust \dot{m} proportional zur Pyrolysegeschwindigkeit p gesetzt werden:

$$\dot{m} (T) = K \cdot m_0 \cdot p (T) \quad (18)$$

oder

$$p (T) = \dot{m} (T) \cdot m_0^{-1} \cdot K^{-1} \quad (19)$$

$p (T)$ ist als Volumenstrom der pro Masseneinheit entstehenden Pyrolysegase zu verstehen.

Der Faktor K setzt sich zusammen aus der volumenbezogenen Brandgutoberfläche und der Brandbelastung:

$$K = F_{Bv} \cdot B \quad (20)$$

Betrachtet man die Pyrolyse in erster Näherung als Reaktion erster Ordnung und setzt für die Pyrolysegeschwindigkeit $p (T)$ die Arrhenius - Gleichung an, so erhält man

$$p (T) = H \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \quad (21)$$

Daraus folgt für die Aktivierungsenergie E

$$E = \ln \frac{p(T)_1}{p(T)_2} \cdot \frac{R}{1/T_2 - 1/T_1} \quad (22)$$

und für den Häufigkeitsfaktor H

$$H = p(T) \cdot e^{E/R \cdot T} \quad (23)$$

Aus Gleichung (18) und Gleichung (21) folgt

$$\dot{m}(T) = K \cdot m_0 \cdot H \cdot e^{-E/R \cdot T} \quad (24)$$

Man kann also den zeitlichen Massenverlust \dot{m} direkt aus der Raumtemperatur errechnen, wenn der Faktor K, die Anfangsmasse m_0 sowie die Stoffgrößen H und E bekannt sind.

Zu der Berechnung der im Brandraum frei werdenden Wärmemenge ist zu berücksichtigen, daß bei Luftmangel unverbranntes Gas aus dem Raum austreten kann.

Zur Bestimmung der Anteile der Gasmengen, die im Raum verbrennen, berechnet man die Luftzahl λ nach Gleichung (25)

$$\lambda = \frac{V_L}{V_{Lst} \cdot \dot{m}} \quad (25)$$

V_L wird nach Gleichung (9) berechnet und V_{Lst} nach [11] mit dem nach Gleichung (24) errechneten zeitlichen Massenverlust.

Die Dauer des Brandes ist von der Anfangsmasse und dem zeitlichen Massenverlust nach der Beziehung

$$\int_0^t \dot{m} dt = m_0 \quad (26)$$

abhängig.

Die im folgenden beschriebenen Brand- und Löschversuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Löschwirkung verschiedener Löschmittel bei Bränden im Modell und im natürlichen Maßstab zu untersuchen. Zur Beurteilung des Brandgeschehens nach den oben angegebenen theoretischen Grundlagen wurden die Ergebnisse der Versuche im natürlichen Maßstab aus Teil 1 [14] und Teil 2 [15] dieses Forschungsprogramms und der vorliegenden Versuche herangezogen.

3. LÖSCHVERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN LÖSCHMITTELN

3.1 Untersuchung der Löschwirkung verschiedener Löschmittel an Modellbränden

3.1.1. Versuchseinrichtung

Da die Löschwirkung verschiedener Löschmittel wegen der bei Brandversuchen auftretenden starken Schwankungen von Temperatur und Abbrandgeschwindigkeit nur durch eine genügend hohe Anzahl von Einzelversuchen statistisch gesichert werden kann, wurden diese Untersuchungen aus Kostengründen an Modellbränden durchgeführt.

Die Brandlast bestand aus einer Kiefernholzkrippe nach Bild 2 mit 5 Lagen à 7 Stäben mit den Abmessungen 50 cm x 2,5 cm x 2,5 cm. Die Holzkrippe ruhte auf einer Wägeeinrichtung, mit der die Masse der Krippe auf ca. 0,3 % genau bestimmt werden konnte. Mit dieser Wägeeinrichtung konnte der zeitliche Verlauf des Massenverlustes während der Verbrennung registriert werden.

Die Temperatur an der Stelle 1 im Innern der Krippe (siehe Bild 2) wurde mit einem Mantelthermoelement aus Chromel / Alumel mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm gemessen.

Die Anlage ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Aus einem Vorratsgefäß mit einem Inhalt von ca. 10 l wurde die Löschflüssigkeit mittels Druckluft mit einem Druck von 2,5 bar durch eine Dralldüse auf die Krippe aufgegeben. Die Zeitdauer der Löschmittelbeaufschlagung konnte mit Hilfe eines Magnetventiles genau festgelegt werden. Die Düse war ca. 80 cm über der Mitte der Holzkrippe angeordnet, sodaß bei einem Sprühwinkel von ca. 50° die gesamte Krippe besprüht wurde. Die Öffnungszeiten des Magnetventils und damit die Zeit t der Löschmittelbeaufschlagung wurden elektronisch gemessen. Multipliziert man diese Zeit mit der Durchflußrate \dot{W} , so ergibt sich der Verbrauch W an Löschmittel.

$$W = \dot{W} \cdot t \quad (27)$$

Aus der Bestimmung der Anfangsmenge W_0 und der Restmenge W_e im Vorratsbehälter war eine Kontrolle der Rechnung möglich.

$$W = W_0 - W_e \quad (28)$$

3.1.2. Versuchsdurchführung

Die Zündung der Holzkrippen erfolgte mit 50 ml Spiritus in einer Zündwanne der Größe 100 mm x 100 mm x 10 mm im Schnittpunkt der Diagonalen ca. 10 cm unter der Holzkrippe. Nach durchschnittlich 6,5 Minuten war der Spiritus verbrannt. Die Branddauer der Holzkrippen betrug im Mittel ca. 16 Minuten.

Wenn ca. 50 % der anfänglichen Masse verbrannt waren, wurde das Löschmittel so lange auf das Brandgut aufgegeben, bis keine Flammen mehr sichtbar waren. Der Brand galt als gelöscht, wenn innerhalb 2 Minuten keine Rückzündung erfolgte.

Es wurde mit folgenden Löschmitteln gelöscht:

- Wasser (Trinkwasserqualität)
- Wässrige Lösung von Diammoniumphosphat in
Konzentrationen von 2,5 bis 40 Gew.-%.
- Wässrige Lösung von Ammoniumsulfat in
Konzentrationen von 5 bis 43 Gew.-%.
- Wässrige Lösung von Kaliumhydrogenkarbonat in
Konzentrationen von 5 bis 25 Gew.-%.
- Wässrige Lösung von Natriumhydrogenkarbonat in
Konzentrationen von 5 bis 8 Gew.-%.
- Wässrige Lösung von Fluortensid in
Konzentration von 5 Gew.-%.

Nach jeder Versuchsserie mit einer der Salzlösungen wurden zur Kontrolle Versuche mit Wasser als Löschmittel durchgeführt, womit etwaige Schwankungen experimenteller Art erfaßt werden konnten.

3.1.3 Auswertung

Da prinzipiell bei Experimenten, insbesondere bei Brandversuchen, zufällige Veränderungen verschiedener Einflußgrößen nicht auszuschließen sind, ist es notwendig, mit Hilfe statistischer Aussagen die Ergebnisse zu analysieren, um Fehlschlüsse zu vermeiden. Daher wurden die hier durchgeführten Untersuchungen nach statistischen Methoden beurteilt [16].

Es wurde für die jeweils vorliegende Anzahl von Einzelversuchen ein Konfidenzintervall berechnet, das den Bereich eingrenzt, in dem mit 95 % Wahrscheinlichkeit der Mittelwert aus allen theoretisch möglichen Versuchswerten liegt.

Die Ergebnisse werden in der Form

$$[\bar{x} \pm s]$$

angegeben.

Hierin ist:

- \bar{x} der arithmetische Mittelwert aus n Versuchen
- $\bar{x} + s$ obere Grenze des Konfidenzintervalls
- $\bar{x} - s$ die untere Grenze des Konfidenzintervalls

3.1.4 Brandverhalten

Die anfängliche Masse M_0 der Holzkrippen betrug im Mittel 6,0 kg.

Die Branddauer t bis 50 % der anfänglichen Masse verbrannt waren, betrug

$$t = 15,94 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$$

Zu dem Zeitpunkt, an dem 50 % der anfänglichen Masse verbrannt waren, wurde der Löschvorgang eingeleitet. In diesem Stadium war der zeitliche Massenverlust \dot{m} nach Gleichung (10) konstant.

Der zeitliche Massenverlust betrug

$$\dot{m} = 0,467 \text{ kg/min} \pm 0,012 \text{ kg/min.}$$

In Bild 4 ist aus 110 Versuchen der Bereich des Konfidenzintervalls des Massenverlustes der Brandlast über der Versuchszeit t aufgetragen. Man kann davon ausgehen, daß für alle Lösversuche zum Zeitpunkt des Lösens im Rahmen der experimentellen Schwankungen gleiche Bedingungen hinsichtlich des zeitlichen Massenverlustes \dot{m} vorlagen.

3.1.5 Löschwirkung der verschiedenen Löschmittel

Zur Beurteilung der Löschwirkung wurden folgende Kriterien herangezogen:

1. Verbrauch an Löschmittel
2. Löszeit, d.h. die Zeitspanne von Einsetzen des Löschvorganges bis zum Ende des Löschvorganges
3. Temperaturverlauf in der Krippe während des Löschens

Visuelle Beobachtungen zeigten, daß jedes Löschmittel typische Eigenschaften besitzt.

Wasser löschte die Flammen erst relativ spät, es war eine deutliche Glutbildung zu beobachten, doch kam es selten zu Rückzündungen.

Wässerige Lösungen von Diammoniumphosphat löschte den Brand sehr schnell, es war keine Glutbildung zu erkennen, die Oberfläche der Holzstäbe war dunkel bis schwarz gefärbt, es fanden kaum Rückzündungen statt.

Wässerige Lösungen von Ammoniumsulfat löschte den Brand rasch, allerdings kam es oft zu Rückzündungen.

Wässerige Lösungen von Kaliumhydrogenkarbonat löschte die Flammen sehr schnell, allerdings erfolgte sehr rasch eine Rückzündung, die Oberfläche der Holzstäbe glühte noch nach dem Löschen sehr intensiv.

Wässerige Lösungen von Natriumhydrogenkarbonat löschte den Brand erst nach relativ hohen Aufgaberraten, wobei es zu häufigen Rückzündungen kam. Die Holzoberfläche glühte noch nach dem Ablöschen sehr lange nach und sehr intensiv.

Wässrige Lösungen von Fluortensid zeigte Löscheigenschaften ähnlich denen von Wasser, die Oberfläche der Holzkrippe wurde rasch benetzt, es kam selten zu Rückzündungen. Wenn sie eintraten ging die Brandausbreitung allerdings sehr langsam vonstatten.

3.1.6 Löschmittelverbrauch

Als ein Kriterium zur Beurteilung der Löschwirkung eines Löschmittels diene, wie oben erwähnt, die zum Löschen notwendige Menge. Mit dem Verbrauch an Wasser als Bezugsgröße wurden die Löschmittelmengen der anderen Löschmittel normiert. In Bild 5 sind die normierten Löschmittelmengen der verschiedenen Löschmittel in Abhängigkeit von den jeweiligen Konzentrationen aufgetragen. Der Übersichtlichkeit wegen sind die Werte für gleiche Konzentrationen etwas versetzt gezeichnet. Die genauen Konzentrationen sowie Mittelwerte und Konfidenzintervallgrenzen des Löschmittelverbrauchs der verschiedenen Löschmittel sind aus Tabelle 1 zu entnehmen. Man erkennt, daß schon wässrige Lösungen mit 2,5 Gew.-% Diammoniumphosphat den Verbrauch um 25 % senken. Bei höheren Konzentrationen verringert sich der Löschmittelbedarf bis auf das ca. 0,3 fache der Wassermenge. Die höchste Konzentration, also die gesättigte Lösung, zeigte keine weitere Steigerung der Löschwirkung hinsichtlich des Löschmittelbedarfs. Bei Wasser als Löschmittel wurden aus insgesamt 25 Versuchen für den Verbrauch ein Mittelwert von $2,79 \text{ l} \pm 0,35 \text{ l}$ errechnet. Auf den Mittelwert wurden die Werte der Verbrauchsmessungen anderer Löschmittel bezogen.

Wässrige Diammoniumphosphatlösungen zeigten schon bei einer Konzentration von 2,5 Gew.-% eine Reduzierung des Verbrauchs auf $2,21 \text{ l} \pm 0,64 \text{ l}$. Bei Konzentrationen von 5 Gew.-%, 10 Gew.-% und 15 Gew.-% wurden mit $1,45 \text{ l} \pm 0,33 \text{ l}$, $1,55 \text{ l} \pm 0,62 \text{ l}$ und $1,54 \text{ l} \pm 0,67 \text{ l}$ in etwa gleiche Mengen ermittelt.

Bei einer Konzentration von 20 Gew.-% sank der Verbrauch auf $0,93 \text{ l} \pm 0,21 \text{ l}$, was einer Steigerung der Löschwirkung in Bezug auf den Löschmittelverbrauch gegenüber Wasser um ca. 300 % entspricht.

Bei Konzentrationen von 27 Gew.-% und 40 Gew.-% wurden $2,0 \text{ l} \pm 0,23 \text{ l}$ bzw. $1,82 \text{ l} \pm 0,19 \text{ l}$ gemessen. Mit einer wässrigen Diammoniumphosphatlösung bei einer Konzentration von 20 Gew.-% wurde mit $0,93 \text{ l} \pm 0,21 \text{ l}$ der niedrigste Löschmittelbedarf dieser Untersuchungen gemessen.

Bei Verwendung von wässrigen Ammoniumsulfatlösungen wurden bei einer Konzentration von 20 Gew.-% mit $1,24 \text{ l} \pm 0,17 \text{ l}$ der niedrigste Verbrauch mit diesem Löschmittel gemessen. Der höchste Verbrauch lag bei einer Konzentration von 5 Gew.-% mit $2,34 \text{ l} \pm 0,52 \text{ l}$. Bei 10 Gew.-% und 15 Gew.-% wurden mit $1,61 \text{ l} \pm 0,38 \text{ l}$ bzw. $1,57 \text{ l} \pm 0,6 \text{ l}$ in etwa die gleiche Löschmittelmenge ermittelt. Bei einer gesättigten Lösung mit einer Konzentration von 43 Gew.-% wurde mit $1,59 \text{ l} \pm 0,26 \text{ l}$ in etwa die gleiche Löschmittelmenge benötigt wie bei den Konzentrationen von 10 Gew.-% bzw. 15 Gew.-%. Der niedrigste Verbrauch wurde mit Ammoniumsulfatlösungen ebenso wie mit Diammoniumphosphatlösungen bei einer Konzentration von 20 Gew.-% gemessen, also mit einer Konzentration die niedriger ist als die der gesättigten Lösungen.

Bei Verwendung von wässrigen Lösungen mit Kaliumhydrogenkarbonat wurde bei einer Konzentration von 5 Gew.-% der Löschmittelbedarf zu $2,84 \text{ l} \pm 0,62 \text{ l}$ gemessen. Bei Konzentrationen von 10 Gew.-%, 15 Gew.-%, 20 Gew.-% und 25 Gew.-% wurden mit durchschnittlich $2,0 \text{ l}$ in etwa die gleichen Löschmittelmengen gebraucht. Hier ist ab einer Konzentration von 10 Gew.-% keine weitere Steigerung der Löschwirkung zu beobachten.

Bei wässrigen Lösungen von Natriumhydrogenkarbonat wurden mit einer Konzentration von 5 Gew.-% ein Löschmittelverbrauch von $2,7 \text{ l} \pm 0,30 \text{ l}$ gemessen. Dieser Wert entspricht etwa dem Wert, der mit Wasser ermittelt wurde.

Bei einer Konzentration von 8 Gew.-% wurde ein Löschmittelverbrauch von $3,33 \text{ l} \pm 0,77 \text{ l}$ ermittelt. Dieser Wert liegt deutlich höher als der für Wasser ermittelte Löschmittelbedarf. Eine Erklärung für diesen Vorgang ist darin zu suchen, daß verschiedene Salze, darunter auch Natriumhydrogenkarbonat einen katalytischen Effekt bei der chemischen Umsetzung von Kohlenstoff zu Kohlendioxyd ausüben [17]. Es ist möglich, daß bei Konzentrationen von 8 Gew.-% dieser Effekt insofern eine bedeutende Rolle spielt, daß die Verbrennungsreaktion durch die Beaufschlagung mit Natriumhydrogenkarbonat beschleunigt wird.

3.1.7 Löschzeiten

In Bild 6 sind die Werte in Abhängigkeit von der Konzentration aufgezeichnet. Man erkennt, daß die Löschzeiten für alle Versuche etwa gleich groß waren. Deutliche Abweichungen ergeben sich lediglich für wässrige Lösungen mit 5 Gew.-% Diammoniumphosphat, mit 5 Gew.-% Ammoniumsulfat sowie mit 10 Gew.-% Kaliumhydrogenkarbonat. Die längeren Löschzeiten ergeben sich daraus, daß hier häufigere Rückzündungen auftraten, sodaß sich die Zeitspanne bis zum Ablöschen der Krippe vergrößerte. Es kann daher gesagt werden, daß der Einfluß der Konzentrationen bzw. der Löschmittelmengen auf die Löschzeiten bei den vorliegenden Versuchen gering ist.

3.1.8 Temperaturmessung

Die Bestimmung der Temperatur beschränkte sich bei den vorliegenden Messungen auf eine Stelle in der Mitte der Holzkrippe, sodaß dieser Wert nur mit gewissen Einschränkungen als charakteristische Temperatur während des Löschvorganges zu betrachten ist.

In Bild 7 sind die Mittelwerte der Temperatur T_e mit Konfidenzintervall eingetragen, die unmittelbar nach dem Löschvorgang in Innern der Krippe gemessen wurden.

Die Werte streuen im allgemeinen sehr stark, was sich in der Breite der Konfidenzintervalle niederschlägt. Es ist zu erwarten, daß die Abkühlung der Holzkrippen während des Löschens im wesentlichen von der beaufschlagten Wassermenge abhängt, da die beigefügten Substanzen verglichen mit Wasser dem Brandgut kaum Wärme entziehen.

Dieser Vorgang ist allerdings auf Bild 7 wegen der starken Streuung nicht eindeutig zu erkennen. Bemerkenswert ist, daß bei Verwendung einer Fluortensidlösung mit 5 Gew.-% als Löschmittel die Temperatur T_e deutlich niedriger lag als die mittleren Temperaturen der übrigen Versuche. Dies ist auf die ausgeprägte Netzwirkung des Fluortensids zurückzuführen.

Die Ergebnisse dieser Versuche stimmen gut mit Untersuchungen von Kida [18] und Metz [19] überein, die bei ähnlichen Modellbränden eine Reduzierung der Löschmittelmenge bei Salzlösungen, insbesondere Ammoniumphosphatlösungen von ca. 2/3 erreichten.

Der Reduzierung der Löschmittelmenge entspricht direkt eine Steigerung der Löschwirkung, die auf spezielle chemische Eigenschaften der Salzlösungen beruht. Diese Eigenschaften wirken inhibitorisch auf die Verbrennungsreaktion des Brandgutes, wie dies in ähnlicher Weise bei Trockenlöschpulver bekannt ist. Allerdings ist mit Pulvern keine wesentliche Abkühlung des Brandgutes zu erzielen, sodaß die hier angewendete Kombination der Kühlwirkung des Wassers und der inhibitorischen Wirkung der Salze eine optimale Löschwirkung besitzt.

Die inhibitorische Wirkung der Salze beruht auf einem chemisch-physikalischen Eingriff in die spezifische Verbrennungsreaktion eines bestimmten Brandgutes mit Luftsauerstoff, sodaß evtl. unterschiedliche inhibitorische Effekte bei verschiedenen Brandgütern erzielt werden. Dies ist bei der Beurteilung der hier dargestellten Versuche zu berücksichtigen.

3.2. Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab

3.2.1 Versuchsanlage und Meßeinrichtung

Da die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Modelluntersuchungen auf Brände in natürlichem Maßstab wegen der Vielzahl schwer zu kontrollierender Versuchsparameter bislang noch nicht allgemein möglich ist, wurden Brand- und Löschversuche in einem Versuchsraum natürlicher Größe durchgeführt um die Ergebnisse der Modellversuche mit denen in natürlichem Maßstab zu vergleichen.

Die Versuche wurden in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in einem Versuchsraum mit einer Grundfläche von ca. 12,8 m² und einer Höhe von ca. 2,80 m durchgeführt, der bereits für die Untersuchungen in Teil 1 [14] und Teil 2 [15] dieses Forschungsprogrammes benutzt wurde.

Die Wände bestehen aus 15 cm starken Gasbetonsteinen und sind innen mit 15 mm starken Asbestzementplatten verkleidet, die die Wände vor einer Zerstörung durch Wärmeeinwirkung schützen. Die Decke besteht aus einer Stahlkonstruktion an der ebenfalls feuerfeste Asbestzementplatten angebracht sind. Ein Zwischenboden ist als Waageplattform konstruiert, sodaß die lichte Höhe im Versuchsraum ca. 2,20 m beträgt. Der Zwischenboden wird über zwei Waagebalken auf drei Kraftmeßdosen abgestützt. Diese Kraftmeßdosen bilden ein Dreieck, dessen Schwerpunkt aus meßtechnischen Gründen mit dem Schwer-

punkt des Zwischenbodens übereinstimmt. Bild 8 zeigt den Grundriß des Versuchsraumes mit der Anordnung der Waagebalken und der Kraftmeßdosen. Das Meßsignal der Kraftmeßdosen wird von einem Trägerfrequenzmeßverstärker verstärkt und mittels einer elektronischen Schaltung in eine digitale Anzeige umgewandelt. Ein Analoglinienschreiber registriert die momentane Masse des Brandgutes mit einer Genauigkeit von 0,1 Gew.-% während des Versuches. Der Raum unter dem Zwischenboden ist als Auffangwanne ausgebildet, sodaß sich dort Wasser bzw. Löschflüssigkeit ansammeln kann, das anschließend mittels einer Pumpe abgepumpt und in einem Gefäß mengenmäßig als Teil des Schadenswassers erfaßt werden kann. Durch eine 100 cm x 100 cm große Fensteröffnung können die während eines Versuches auftretenden Rauchgase abziehen und Frischluft in den Versuchsraum einströmen. Vor der Fensteröffnung ist eine Meßeinrichtung installiert, die die optische Dichte der aus dem Fenster austretenden Rauchgase bestimmt. Diese Meßeinrichtung arbeitet wie folgt:

Eine Lichtquelle strahlt mit konstanter Intensität in 10 cm Abstand parallel zur Fensterfront ca. 10 cm unter der Fensteroberkante auf einen Empfänger. Befindet sich rauchfreie Luft zwischen Strahler und Empfänger, so trifft das Licht mit der Intensität I_0 auf den Empfänger. Wird das Licht durch Rauchpartikel abgeschwächt, so gelangt nur noch der Anteil I auf den Empfänger. Ein zweiter Empfänger ist elektronisch so mit der Meßanordnung geschaltet, daß das von der Umgebung (z.B. Hallenfenster) eingestrahelte Licht kompensiert wird. Das Verhältnis I/I_0 beschreibt also quantitativ die optische Dichte der Rauchgase.

Die zum Löschen benötigte Wasser- bzw. Flüssigkeitsmenge wird von einem elektronischen Wasserzähler gemessen. Die Durchflußmenge und daraus resultierend der gesamte Verbrauch wird auf einem Schreiber registriert.

Im Versuchsraum sind 24 Thermoelemente verteilt, deren Thermospannungen von zwei Zwölfpunktdruckern erfaßt werden. Die Temperatur der Vergleichsstelle wird thermostatisch auf 0 °C gehalten. Es werden Mantelthermoelemente aus Chromel / Alumel mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm verwendet. Die Lage der Thermoelemente im Versuchsraum ist aus Bild 9 zu erkennen. Die an den Wänden und am Zwischenboden angebrachten Thermoelemente liegen an diesen Bauteilen an, während die Thermoelemente an der Decke ca. 5 cm in den Versuchsraum hineinragen.

Bild 10 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage.

3.2.2 Versuchsbedingungen und Versuchsdurchführung

Nachdem im ersten Teil des Forschungsprogramms [14] Holzkrippen als Brandgut dienten, wurden - wie schon im zweiten Teil [15] - bei den hier vorliegenden Untersuchungen alte Möbel verwendet. Dabei wurde der Versuchsraum mit folgenden Gegenständen jeweils eingerichtet:

- 1 Teppich
- 1 Couch
- 1 Tisch
- 4 Sessel
- 3 Stühle
- 1 großer Schrank
- 2 kleine Schränke sowie
Papier, Holz und Textilien.

Die Verteilung der Brandlast im Versuchsraum ist aus Bild 11 zu ersehen. Die gesamte Menge des Brandgutes betrug jeweils ca. 380 kg, was einer Brandbelastung von ca. $31,7 \text{ kg/m}^2$ entspricht. Es wurde darauf geachtet, daß die Textilanteile an der Gesamtmasse bei allen Versuchen in etwa gleich waren. Die äußere Oberfläche des Brandgutes betrug im Mittel ca. 40 m^2 . Die Masse des Brandgutes bei den einzelnen Versuchen ist in Tabelle 2 eingetragen. Die Zündung erfolgte jeweils am großen Schrank gegenüber der Fensteröffnung (siehe Bild 11) mittels 300 ml Spiritus in einer Zündwanne der Größe 20 cm x 30 cm x 3 cm.

Das Ablöschen des Brandes wurde nach Möglichkeit von demselben Feuerwehrmann vorgenommen. Damit wurde vermieden, daß der Löscherfolg von der Geschicklichkeit der jeweils mit dem Löschen beauftragten Person abhängt, wie dies bei früheren Untersuchungen festgestellt wurde [20, 21].

Das Löschen erfolgte zu dem Zeitpunkt, an dem ca. 40 % des Brandgutes abgebrannt waren. Damit wurde hier der Zeitpunkt des Löschangriffes durch den Abbrand während des Versuches festgelegt und nicht wie bei anderen Untersuchungen durch eine willkürliche Zeitspanne (z.B. 2 min nach Feuerübersprung) [20, 21]. Die Zeitspanne bis zum Löschangriff, also die Branddauer, ist für alle Versuche in Tabelle 2 eingetragen. Aus dieser Tabelle geht hervor, welche Löschmethoden und Löschmittel bei den jeweiligen Versuchen angewendet wurden.

3.2.3 Brandentwicklung

Um die Brandentwicklung beurteilen zu können, wurde die momentane Masse des Brandgutes während des Versuches sowie der zeitliche Temperaturverlauf im Brandraum

gemessen. Durch Differentiation der momentanen Masse nach der Zeit erhält man den zeitlichen Massenverlust. In den Bildern 12 und 13 ist der Verlauf der Restmasse bezogen auf die Anfangsmasse in Abhängigkeit von der Versuchszeit $t - t_{40}$ für alle Versuche dargestellt. t_{40} gibt die Zeitspanne zwischen Zündung und dem Zeitpunkt an, an dem die Anfangsmasse zu 40 Gew.-% verbrannt ist. Die Differenz $t - t_{40}$ berücksichtigt, daß die Dauer der Brandentstehungsphase bei den Versuchen stark schwankte. Diese Unterschiede zeigen sich in den Bildern 12 und 13 im unterschiedlichen Anfangspunkt der Kurven. Im linearen Teil ist der zeitliche Massenverlust für alle Versuche etwa gleich, was an der Steigung der Kurve zu sehen ist. Der zeitliche Massenverlust \dot{m} betrug im Mittel ca. 11,2 kg/min. Er ist für alle Versuche in Tabelle 2 eingetragen. Bei Versuch 1 und 7 weicht der maximale zeitliche Massenverlust aus ungeklärten Gründen von den anderen Versuchen ab, die hinsichtlich Brandentwicklung und zeitlichem Massenverlust \dot{m} vergleichbar sind mit den im Teil 1 [14] und Teil 2 [15] dieses Forschungsprogramms durchgeführten Versuchen.

3.2.4 Temperaturentwicklung

Ein weiteres Kriterium für die Beurteilung des Brandverlaufes ist der Temperaturanstieg im Brandraum. Die Bilder 14 bis 21 zeigen die an verschiedenen Stellen gemessenen Rauchgastemperaturen über der Versuchszeit t . Der Übersichtlichkeit wegen werden lediglich die Temperaturen der Rauchgase unter der Decke des Versuchsraumes dargestellt. Die Versuchszeit t gibt die gesamte Versuchsdauer von der Zündung bis zum Ende des Löschangriffs an.

Die Temperatur über der Zündstelle T 16 (siehe Bild 9) stieg bei allen Versuchen als erste an. Die heißen Rauchgase strömten in Richtung Fenster, sodaß die Temperatur an der Meßstelle T 14 in der Mitte der Decke anstieg. Als nach dem Feuerübersprung das gesamte Brandgut im Raum in Flammen stand, sank die Temperatur an der Stelle T 16 wieder ab, was darauf zurückzuführen ist, daß an diese Stelle des Raumes sauerstoffärmere Luft gelangte. Ein Teil des Sauerstoffs der vom Fenster her einströmenden Luft reagierte bereits auf dem Weg zum Innern, vom Fenster weg gelegenen Regionen des Raumes mit den Brandstoffgasen. Da mit zunehmender Entfernung immer weniger Sauerstoff zur Verfügung stand, war die Wärmeentwicklung nicht mehr so stark, sodaß an den entfernten Stellen die Temperaturen sanken.

Diese Tendenz ist bei allen Versuchen zu beobachten. Bei Möbelbränden ist nach einer mehr oder weniger langen Entstehungsphase ein steiler Anstieg der Temperatur im Raum zu verzeichnen. Die Dauer der Entstehungsphase ist zufälliger Natur, da sie von dem Brandgut bzw. dessen Brandeigenschaften sowie Art und Lage der Zündquellen abhängt. Entzündet sich das Brandgut rasch und ergibt sich eine große Brandausbreitungsgeschwindigkeit, dann ist die Entstehungsphase des Brandes kurz, der Feuerübersprung tritt bald auf und dementsprechend steigen die Temperaturen im Versuchsraum rasch an. Die Branddauer wird also bei den hier durchgeführten Versuchen im wesentlichen von dieser Brandentstehungsphase bestimmt. Da diese aber bei allen Versuchen stark variierte, wurden die mittleren Rauchgastemperaturen, die aus dem arithmetischen Mittel der an den Stellen T 14 bis T 18 gemessenen Rauchgastemperaturen bestimmt wurden, in den Bildern 22 und 23 über der Versuchszeit $t - t_p$ aufgetragen.

Bei einigen Versuchen traten während des Brandes Defekte an einzelnen Thermoelementen auf, sodaß die Brandraumtemperaturen an diesen Stellen nicht mehr exakt registriert werden konnten. Die arithmetische Mittelwertkurve errechnet sich für diese Versuche aus den in den Bildern angegebenen Rauchgastemperaturen.

t_b ist die Zeitspanne von der Zündung bis zum Löschangriff. Durch diese Darstellung liegt für alle Versuche der Beginn des Löschangriffs auf der Nulllinie $t - t_b = 0$.

Man ersieht aus dieser Darstellung, daß die Phase in der die mittleren Rauchgastemperaturen annähernd konstante maximale Werte annehmen, etwa gleichlang dauert. Sie schwankte zwischen etwa 10 und 16 Minuten.

3.2.5 Optische Rauchdichte

Die optische Rauchdichte konnte auch hier wie schon in Teil 2 [15] dieses Forschungsprogramms nur so lange gemessen werden, bis Flammen aus dem Fenster schlugen, da diese Flammen weitgehend optisch dicht sind und somit bei dieser Meßanordnung den Meßwert verfälschen. Die optische Rauchdichte ist sehr stark abhängig von den Materialeigenschaften des Brandgutes sowie von der Brandentwicklung im Entstehungsstadium des Brandes. Da aber gerade diese Einflußgrößen bei allen Versuchen stark variierten, kann die optische Rauchdichte der aus den Fenster austretenden Rauchgase nur im Komplex mit der Brandentwicklung und der Brandgutzusammensetzung beurteilt werden. Es zeigte sich, daß die Rauchentwicklung um so stärker war, je mehr Kunststoff im Versuchsraum verbrannte. Bild 24 zeigt einen typischen Verlauf der optischen Rauchdichte, d.h. der gemessenen Lichtintensität I/I_0 über der Versuchszeit t .

Das Ende der Messung ist mit einem Kreis gekennzeichnet, ab diesem Zeitpunkt schlugen Flammen aus dem Fenster. Der unstete Verlauf der Kurve erklärt sich damit, daß im Verlauf des Brandversuches nacheinander unterschiedliche Materialien verbrannten bzw. pyrolytisch zersetzt wurden, sodaß die Brandgaszusammensetzung bezüglich der optischen Rauchdichte starken Schwankungen unterworfen war.

3.2.6 Schadenswasser

Wie schon bei den früheren Untersuchungen [14, 15] wird auch hier diejenige Wassermenge als Schadenswassermenge betrachtet, die beim Aufgeben auf den Brand nicht verdampft. Die Schadenswassermenge setzt sich aus zwei Teilen zusammen:

1. Dem Anteil des Löschwassers, der sich in der Auffangwanne des Versuchsraumes sammelt, von dort abgepumpt und mengenmäßig erfaßt wird und
2. dem Anteil des Löschwassers, der nach dem Löschen auf dem Zwischenboden bzw. im Mobiliar verbleibt und als Gewichtsveränderung erfaßt wird.

In Tabelle 2 sind die Beträge der Schadenswassermenge und der verdampften Löschwassermengen für alle Versuche eingetragen.

3.2.7 Löschmittel und Löschzeiten

Die vorhergegangenen Untersuchungen [14, 15] haben gezeigt, daß mit den heute in der Praxis üblichen Löschmethoden keine erhebliche Reduzierung des Löschmittelbedarfs möglich ist. Eine Verkürzung der Löschzeit ist nur durch eine hohe Löschmittelbeaufschlagungsrate möglich, wie Versuche in Teil 2 des Forschungsprogrammes [14] zeigten.

Hohe Löschmittelbeaufschlagungsraten erfordern eine außerordentliche gute Handhabung des Gerätes sowie gutes Reaktionsvermögen des Feuerwehrmannes, da sonst die Gefahr besteht, daß durch überschüssiges Löschmittel beträchtlicher Schaden angerichtet wird. In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß durch gute Schulung und ständige praktische Übung der Feuerwehr die Qualität des Löschangriffes d.h. die benötigte Löscheinheit, die benötigte Löschmittelmenge sowie die Vermeidung von Wasserschäden, mit den heute zur Verfügung stehenden Löscheräten optimiert werden kann. Bei den vorangegangenen Untersuchungen [15] wurden bei Verwendung eines CM - Strahlrohres im Mittel folgende Werte gemessen:

Löschwasserverbrauch	ca. 215 l
Löschzeit	ca. 6,5 Minuten
Schadenswasser	ca. 116 l
verdampfte Löschwassermenge	ca. 98 l

Diese Werte können als Bezugsgrößen zur Beurteilung der Löschwirkung anderer Löschmittel betrachtet werden.

Eine Beziehung für die Löschwassermenge und Löscheinheit in Abhängigkeit von der Größe der brennenden Fläche gibt Baldwin [22] wie folgt an:

$$\text{Wasserbeaufschlagung} \quad \dot{W} = 1,24 \cdot F^{0,66} \quad (29)$$

$$\text{Löscheinheit} \quad t_e = 1,66 \cdot F^{0,56} \quad (30)$$

Wobei F die Grundfläche des Brandes ergibt.

Daraus errechnet sich der Gesamtbedarf an Löschwasser

$$W = \dot{W} \cdot t \cdot 60 = 2,06 \cdot 60 \cdot F^{1,22} \quad (31)$$

Diese empirischen Zusammenhänge wurden bei der Auswertung einer Reihe von britischen und amerikanischen Meßergebnissen gefunden und können lediglich als grobe Abschätzung dienen. Bei den hier vorliegenden Versuchsbedingungen mit einer Brandfläche von ca. 12 m^2 , entsprechend der Grundfläche des Versuchsraumes, errechnet sich nach Gleichung (34) die Löschwassermenge zu

$$W = 2500 \text{ l}$$

Diese Menge liegt beträchtlich höher als die tatsächlich benötigte Löschwassermenge, auch wenn man nach [22] berücksichtigt, daß bei Experimenten im Vergleich zur Praxis nur etwa ein Viertel der Löschwassermenge zum Löschen eines Brandes benötigt wird.

Die in Teil 2 dieses Forschungsprogrammes [15] mit CM-Strahlrohren als Bezugsgröße ermittelte Löschwassermenge stimmt gut mit der Löschwassermenge ein, die von Hird [21] bei ähnlichen Experimenten gemessen wurde.

In der hier vorliegenden Untersuchung wurden zumeist neuartige Löschmittel mit den üblichen Strahl- bzw. Schaumrohren auf den Brandherd aufgegeben.

Versuch 1 Proteinschaum, 3,5 % Zumischung, z ~ 10 Luftschaumrohr L 200

Versuch 2 Fluortensid, 5 % Zumischung, DM-Strahlrohr

Versuch 3 Fluortensid, 5 % Zumischung, CM-Strahlrohr

Versuch 4 Ammoniumsulfatlösung, 10 %, CM-Strahlrohr

Versuch 5 Ammoniumsulfatlösung, 10 %, DM-Strahlrohr

Versuch 6+7 Ammoniumphosphatlösung, 5 % , CM-Strahlrohr

Versuch 8 Ammoniumphosphatlösung, 20 % , CM-Strahlrohr

Der Druck war bei allen Versuchen mit ca. 5 bar gleich, sodaß sich für die verwendeten CM-Strahlrohre ein Durchfluß von 100 l/min, für DM-Strahlrohre ca. 50 l/min und für das Luftschaumrohr L 200 ca. 200 l/min ergaben.

Bei Versuch 1 wurde mit einem Luftschaumrohr L 200 Schwertschaum mittels Zumischung von ca. 3,5 % Proteinschaummittel mit einer Verschäumungszahl $z \sim 10$ erzeugt. Mit diesem Versuch sollte geklärt werden, inwieweit der Trenneffekt des Schaumes, der das Brandgut bei geschlossener Schaumdecke vom Luftsauerstoff trennt, zu einer verbesserten Löschwirkung gegenüber Wasser führt. Es wurden ca. 170 l Wasser incl. Schaummittel benötigt, um den Brand zu löschen, also ca. 25 % weniger Löschmittel als mit Wasser. Dabei wurde eine Schadenswassermenge von ca. 62 l gemessen, die verdampfte Löschwassermenge betrug 108 l. Die Löschzeit war mit 3,0 min geringer als die Löschzeit, die bei den Versuchen in Teil 2 [15] mit dem CM-Strahlrohr benötigt wurden. Gegenüber den im Teil 2 [15] durchgeführten Versuch mit einem Schaumrohr L 400 und Mittelschaum ($z \sim 40$) war die Löschzeit allerdings bedeutend größer. Ein Vergleich der Werte mit Schaum als Löschmittel mit den Bezugswerten ergibt diese Reihenfolge.

Löschmittelverbrauch:

Schaumrohr L 200	170 l
CM-Strahlrohr	215 l
Schaumrohr L 400	250 l

Löschzeiten:

Schaumrohr L 400	0,6 Minuten
Schaumrohr L 200	3,0 Minuten
CM-Strahlrohr	6,5 Minuten

Schadenswasser:

Schaumrohr L 200	82 l
CM-Strahlrohr	116 l
Schaumrohr L 400	166 l

Man sieht, daß mit einem Schaumrohr L 400 eine extrem kurze Löschzeit erzielt wurde, daß aber wegen der großen Löschmittelbeaufschlagung die Schadenswassermenge deutlich höher als bei den anderen Versuchen war.

Bei Versuch 2 wurde eine 5 % ige Fluortensidlösung verwendet, die mit einem DM-Strahlrohr auf den Brandherd aufgegeben wurde. Als Löschtaktik wurde eine großflächig gestreute Aufgabe auf den Brandherd gewählt, was zur Folge hatte, daß der Brand nur allmählich eingedämmt und unter Kontrolle gebracht werden konnte. Eine Aufgaberate von ca. 0,6 l/min je m² brennender Oberfläche genügte, um eine noch ausreichende Löschwirkung zu erzielen, wie schon früher festgestellt wurde [15]. Als brennende Oberfläche ist hier die Oberfläche des Brandgutes also ca. 40 m² zu betrachten. Der Gesamtverbrauch an Löschmittel lag mit ca. 210 l höher als bei vorhergehenden Löschversuchen mit DM-Strahlrohr und Wasser als Löschmittel, wobei ca. 152 l verbraucht wurden [15]. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch die großflächige Verteilung des Löschmittels anfangs keine wesentliche Eindämmung des Brandes erzielt werden konnte. Dadurch ergaben sich noch einige Zeit nach Löschbeginn starke Verbrennungsreaktionen, sodaß wegen der weiterhin entstehenden Reaktionswärme mit 147 l deutlich mehr Löschwasser verdampfte als bei den übrigen Versuchen. Die Schadenswassermenge betrug ca. 63 l, die Löschzeit ca. 8,0 min, wobei auf die löschende Person wegen der geringen Löschwirkung eine hohe, gerade noch erträgliche Wärmestrahlung einwirkte.

Bei Versuch 3 wurde als Löschmittel ebenfalls eine 5 % ige Fluortensidlösung verwendet, die mit einem CM-Strahlrohr auf den Brand aufgegeben wurde. Der gesamte Löschmittelverbrauch lag mit 180 l etwas niedriger als der mit Wasser als Löschmittel gemessene.

Die verdampfte Löschwassermenge von 101 l war etwa so groß wie bei vergleichbaren Versuchen mit Wasser als Löschmittel, die Schadenswassermenge war mit 79 l geringer. Auch die Löschzeit von 4,0 min war geringer als die bei Verwendung von Wasser als Löschmittel.

Bei den Versuchen 4 bis 8 wurden wässrige Salzlösungen verwendet, deren Löschwirksamkeit bereits im Abschnitt 3.1 untersucht wurden.

Bei Versuch 4 wurde mit einem CM-Strahlrohr eine 10 %ige Ammoniumsulfatlösung als Löschmittel verwendet. Mit 170 l wurde soviel Löschmittel verbraucht wie bei Versuch 3.

Dies entspricht gegenüber Wasser als Löschmittel eine Reduzierung um ca. 25 %. Gegenüber dem Ergebnis bei den Modellversuchen wurde hier mehr Löschmittel verbraucht, was hauptsächlich auf verdeckte Brandnester und häufiges Rückzünden zurückzuführen ist. Daraus erklärt sich auch die lange Löschzeit von ca. 7,5 min. Die Schadenswassermenge war mit 93 l ebenso wie die verdampfte Wassermenge mit 77 l etwas niedriger als die bei vergleichbaren Versuchen mit Wasser gemessenen Werte.

Bei Versuch 5 wurde das gleiche Löschmittel wie bei Versuch 4 verwendet und mit einem DM-Strahlrohr auf den Brandherd aufgegeben. Die Versuchsergebnisse sind vergleichbar mit denen in Teil 2 [15] ermittelten Werte bei der Anwendung von Wasser mit einem DM-Strahlrohr. Mit 148 l wurde nur geringfügig weniger Löschmittel verbraucht als bei den oben angegebenen Versuchen. Eine Reduzierung des Löschmittelbedarfs aufgrund einer höheren Löschwirkung konnte hier nicht festgestellt werden.

Bei Versuch 6 und 7 wurde eine 5 %ige Ammoniumphosphatlösung mit einem CM-Strahlrohr auf den Brandherd aufgegeben. Versuch 7 war ein Wiederholungsversuch, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Die benötigten Löschmittelmengen waren mit 122 l bzw. 125 l etwa gleich groß, obwohl die Löschzeiten mit 4,4 min bzw. 3,1 min recht unterschiedlich waren. Der Unterschied bei den Löschzeiten ist auf das Ablöschen wiederaufflammender Brandnester zurückzuführen, die mit kleinen Aufgaberaten gelöscht werden konnten, wobei allerdings die Löschzeiten vergrößert wurden. Die Schadenswassermengen waren mit 50 l bzw. 36 l deutlich niedriger als der Bezugswert mit 116 l, ebenso die verdampften Löschwassermengen mit 72 l bzw. 89 l. Diese Werte bestätigten die Ergebnisse aus den Modellversuchen (siehe Abschnitt 3.1), bei denen eine Reduzierung der Löschmittelmenge bei Verwendung von 5 %igen Ammoniumsulfatlösungen auf ca. 50 % ermittelt wurde. Die Reduzierung ist hauptsächlich auf inhibitorische Effekte des gelösten Salzes zurückzuführen.

Bei Versuch 8 wurde eine 20 %ige Ammoniumphosphatlösung mit einem CM-Strahlrohr auf den Brandherd aufgegeben. Dabei konnten die Ergebnisse aus den Modellversuchen ebenfalls bestätigt werden. Mit 57 l Löschmitteln wurden nur ca. 25 % der mit Wasser notwendigen Löschmittelmenge verbraucht, um den Brand zu löschen. Entsprechend war die Löschzeit mit 1,7 min sehr kurz. An Schadenswasser wurden 10 l gemessen, die verdampfte Löschmittelmenge betrug ca. 47 l. Auch hier deutet die geringe verdampfte Löschwassermenge an, daß der Löscheffekt nicht allein auf die Abkühlung des Brandgutes wie beim Löschen mit Wasser zurückzuführen ist, sondern auf inhibitorische Effekte des gelösten Salzes.

Diese geringe Löschmittelmenge brachte es naturgemäß mit sich, daß der Brandraum sowie das Brandgut nicht soweit abgekühlt wurde, wie bei den übrigen Versuchen. Dadurch war auch nach dem Ende des Löschvorganges eine ausgeprägte Wärmestrahlung von den Wänden des Brandraumes und im Brandgut selbst festzustellen.

Die Versuche zeigten, daß die Löschwassermenge und damit auch die Schadenswassermenge durch die Ausnutzung inhibitorischer Eigenschaften verschiedener in Wasser gelöster Substanzen erheblich reduziert werden kann. Versuche mit ABC-Pulver [15], deren Hauptbestandteile im wesentlichen die hier verwendeten Salze sind, zeigten, daß es mit Pulver allein zwar möglich war, den Brand etwas einzudämmen, daß aber nach kurzer Zeit der Brand in voller Stärke wieder entflammte. Dies liegt daran, daß zum einen Pulverteilchen mit dem Gasstrom mitgerissen werden und nicht auf den Brandherd gelangen können, zum anderen fehlt Trockenpulvern fast völlig eine Kühlwirkung, was in diesem Fall das Wiederaufflammen besonders begünstigt. Durch die Verwendung von in Wasser gelösten Salzen ist es möglich, diese Salze mit dem Wasserstrahl direkt auf den Brandherd zu applizieren, wo sie beim Verdampfen des Wassers auskristallisieren und in fein verteilter Form inhibitorisch wirken können. Das verdampfende Wasser entzieht gleichzeitig dem Brandherd Wärme, sodaß das Brandgut abgekühlt wird, was ein Wiederaufflammen erschwert.

4. VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE MIT DER MODELLVORSTELLUNG.

In diesem Abschnitt wird der in Teil 1 dieses Forschungsprogramms beschriebene Brandablauf bei Bränden von Holzkrippen [14] dem von Möbeln als Brandgut gegenüberge-

stellt und die Ergebnisse mit der Modellvorstellung verglichen.

Der Verlauf eines Brandes bei den hier vorliegenden Bedingungen kann vereinfacht in zwei Phasen unterteilt werden.

Die erste Phase besteht aus der Zündung bzw. der Brandentstehung und der Brandausbreitung. In der zweiten Phase ist die Brandausbreitung abgeschlossen, der Brand ist vollentwickelt und es stellt sich ein konstanter zeitlicher Massenverlust \dot{m} ein. In Bild 25 ist der typische zeitliche Verlauf des Massenverlustes (hier Restmasse) verschiedener Brandgüter wie Möbel und Holzkrippen [15] aufgetragen. Man kann sehr deutlich die Phase 1 und Phase 2 beim Abbrand der einzelnen Brandgüter erkennen. Die Phase 1 ist bei Möbeln wesentlich kürzer als bei Holzkrippen, d.h. die Brandentwicklung und Brandausbreitung geht wesentlich schneller vonstatten als bei Holzkrippen. In der Phase 2, der Phase des vollentwickelten Brandes, ist der zeitliche Massenverlust \dot{m} konstant und bei beiden Brandgütern in etwa gleich groß. Auffallend beim Abbrand von Holzkrippen als Brandgut ist der allmähliche Übergang von der Brandentstehungsphase in die Phase des vollentwickelten Brandes, in der die Kurve einen gradlinigen Verlauf mit max. Steigung zeigt. In diesem Bereich nimmt der zeitliche Massenverlust \dot{m} einen konstanten Wert an. Beim Abbrand von Möbeln als Brandgut sieht man, daß hier der Übergang von der Entstehungsphase in die Phase des vollentwickelten Brandes im Vergleich zum Abbrand von Holzkrippen sehr viel rascher erfolgt. Der mittlere max. zeitliche Massenverlust in der Phase des vollentwickelten Brandes betrug ca. 10,4 kg/min bei Holzkrippen als Brandgut und ca. 11,2 kg/min beim Abbrand von Möbeln.

Dieser Unterschied ist gering, wenn man berücksichtigt, daß die der Verbrennung zur Verfügung stehende Brandstoffoberfläche F_B bei Versuchen mit Holzkrippen ca. 110 m^2 , bei Möbeln dagegen nur ca. 40 m^2 betrug. Nach der Theorie von Harmathy [1] wurde bei diesen Versuchen der zeitliche Massenverlust \dot{m} im konstanten Bereich hauptsächlich von den Ventilationsbedingungen im Versuchsraum bestimmt. Allerdings ist der nach [1,2] berechnete zeitliche Massenverlust mit ca. 6 kg/min nur etwa halb so groß wie der gemessene.

Die Brandentwicklung von der Zündung bis zur Phase des vollentwickelten Brandes mit konstantem zeitlichen Massenverlust erfolgte bei Möbelbränden rascher als bei Holzkrippenbränden. Dies wird darauf zurückgeführt, daß die leichtentzündlichen textilen Anteile der Möbel die Brandentwicklung in der Anfangsphase fördern, sodaß der Feuerübersprung schneller auftritt als bei Holzkrippenbränden. Zudem hat die geometrische Anordnung der Brandlast im Brandraum einen großen Einfluß auf die Brandentwicklung. Die Stoffeigenschaften des Brandgutes spielen in der Anfangsphase und beim Übergang zum vollentwickelten Brand eine größere Rolle als in der Phase des stationären Brandes. In Bild 26 ist der zeitliche Massenverlust \dot{m} über der Versuchszeit t aufgetragen. Auch bei dieser Darstellung ist bei Möbeln als Brandgut ein eindeutig stärkerer Anstieg zu erkennen als bei Holzkrippen. Der max. zeitliche Massenverlust ist wie schon erwähnt, etwa gleich groß. In Bild 27 ist die zweite Ableitung \ddot{m} über der Versuchszeit aufgetragen.

$$\ddot{m} = \frac{d^2 m}{dt^2} = \frac{d \dot{m}}{dt}$$

(32)

Diese Größe ist ein Maß dafür, wie schnell der Übergang von der Zündung zum vollentwickelten stationären Brand vonstatten geht, gibt also die Brandentwicklung an.

Wenn die Brandentwicklung \ddot{m} null wird, beginnt die stationäre Phase des vollentwickelten Brandes mit konstantem zeitlichen Massenverlust \dot{m} .

Man erkennt anhand Bild 27, daß die Brandentwicklung bei Möbeln deutlich höhere Werte erreicht als bei Holzkrippen, sodaß mit dieser Größe der Übergang zum vollentwickelten Brand quantitativ beschrieben werden kann.

In Bild 28 ist der typische zeitliche Temperaturverlauf von Holzkrippen und Möbeln aufgetragen. Hier ist das gleiche unterschiedliche Verhalten wie bei dem Verlauf des zeitlichen Massenverlustes \dot{m} in Bild 26 zu erkennen, nämlich ein rascher steiler Anstieg der Temperatur bei Möbeln und ein allmählicher Temperaturanstieg bei Holzkrippen als Brandgut.

Vergleicht man die Kurven für den zeitlichen Verlauf des zeitlichen Massenverlustes bzw. der Temperaturen auf den Bildern 28 und 26, so erkennt man, daß für Holzkrippen und Möbel jeweils sehr ähnliche Kurven vorliegen, sodaß eine Korrelation von Temperatur und zeitlicher Massenverlust gegeben ist, wie sie in der Modellvorstellung vorausgesetzt wird.

In den Bildern 29 und 30 ist diese Korrelation analog der Modellvorstellung dargestellt. In Bild 29 ist die aus dem zeitlichen Massenverlust \dot{m} für Holzkrippen nach Gleichung (19) berechnete Pyrolysegeschwindigkeit p über der reziproken absoluten Temperatur aufgetragen. In unteren Bereich, d.h. bei niedrigen Temperaturen streuen die Werte, die Ausgleichsgerade gibt jedoch gut die Mittelwerte wieder.

Nach Gleichung (22) errechnet sich die Aktivierungsenergie zu

$$E = 17,8 \text{ kJ/mol}$$

Der Häufigkeitsfaktor H ergibt sich zu

$$H = 0,765 \frac{\text{cm}^3}{\text{gs}}$$

In Bild 30 ist die Pyrolysegeschwindigkeit für Möbel als Brandgut über der reziproken absoluten Temperatur aufgetragen. Die Werte streuen stärker als bei den Holzkrippen, trotzdem gibt die Ausgleichsgerade recht gut die Mittelwerte wieder.

Für diesen Fall berechnet sich die Aktivierungsenergie zu

$$E = 18,0 \text{ kJ/mol}$$

Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem Wert von Holzkrippen. Der Häufigkeitsfaktor liegt bei

$$H = 2,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{g s}}$$

Die ermittelten Werte gelten wegen der Beziehung von Raumtemperatur zu Brandguttemperatur nur für die hier vorliegende geometrische Konfiguration von Brandgut und Brandraum.

Trotz der erwähnten Relativität dieser Werte wurden die Ergebnisse einiger Versuche anderer Autoren [23], die im Rahmen eines internationalen Forschungsprogramms durchgeführt wurden, ausgewertet. Diese Auswertung ist in Bild 31 dargestellt. Bei diesen Versuchen wurde sowohl die Brandbelastung, also Anfangsmasse pro Grundfläche, als auch die geometrische Konfiguration des Brandraumes, der Ventilationsöffnungen und des Brandgutes variiert.

Die Aktivierungsenergien schwanken zwischen 10 kJ/mol und 20 kJ/mol, stimmen also gut mit den Werten der hier durchgeführten Versuche überein.

Die der Modellvorstellung zugrundeliegende Beziehung von Raumtemperatur und zeitlichem Massenverlust werden durch die in den Bildern 29 bis 31 dargestellte Versuchsergebnisse bestätigt.

Zur weiteren Ermittlung des Brandablaufs nach der Modellvorstellung ist die Bestimmung der im Brandraum reagierenden Gasmenge erforderlich.

Zu diesem Zweck ist in Bild 32 der zeitliche Massenverlust \dot{m} in Abhängigkeit von λ nach Gleichung (25) über der Temperatur für eine Ventilationsöffnung von $F \cdot h = 1 \text{ m}^{5/2}$ und Holz als Brandgut dargestellt. Mit fallendem λ steigt \dot{m} an. Dazu ist der nach Gleichung (24) mit den experimentell ermittelten Faktoren E und H berechnete zeitliche Massenverlust $\dot{m} (T)$ als unterbrochene Linie eingezeichnet. Man sieht, daß bis zum Schnittpunkt der Kurve $\dot{m} (T)$ mit $\lambda = 1$ eine vollständige Verbrennung im Raum stattfinden kann. Darüber herrscht Luftmangel und es treten unverbrannte Gase aus dem Raum aus.

Bei einer Raumtemperatur von ca. $700 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde für Holzkrippen bei den hier vorliegenden Versuchen ein zeitlicher Massenverlust von ca. $10,3 \text{ kg/min} = 0,17 \text{ kg/s}$ gemessen. Nach Bild 32 beträgt die zugehörige Luftzahl ca. 0,5, was bedeutet, daß etwa die Hälfte der entstehenden Pyrolysegasmenge unverbrannt aus dem Brandraum austraten.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im dritten Teil eines langfristigen Forschungsprogrammes wurden neuartige oder in der Praxis nicht sehr verbreitete Löschmittel zur Bekämpfung von Zimmerbränden untersucht. Daneben wurde eine Modellvorstellung erarbeitet, die die theoretische Beschreibung des Brandablaufes, die Berechnung der Brandraumtemperatur, den zeitlichen Massenverlust und die Branddauer ermöglicht.

Das Modell berücksichtigt Strömungsvorgänge der Frischluft und der Rauchgase bei gegebenen Ventilationsöffnungen sowie Verbrennungsvorgänge in- und außerhalb des Brandraumes.

Die Löschwirksamkeit verschiedener Löschmittel wurde zunächst an Modellbränden untersucht und die Ergebnisse bei der Bekämpfung vollentwickelter Zimmerbrände in natürlichem Maßstab angewendet.

Die Ergebnisse zeigten, daß durch Zugabe bestimmter Salze, wie sie auch in Trockenlöschpulvern verwendet werden, die Löschwirkung gegenüber Wasser erheblich verbessert werden kann.

Im Fall einer wässrigen Lösung von 20 Gew.-% Diammoniumphosphat konnte der Löschmittelverbrauch im Vergleich zu Wasser als Löschmittel auf $\frac{1}{3}$ reduziert werden. Dies entspricht einer Steigerung der Löschwirkung auf das 3-fache. Diese Steigerung der Löschwirkung ist vor allem auf inhibitorische Effekte der gelösten Salze zurückzuführen.

Durch die Verwendung von in Wasser gelösten Salzen ist es möglich, diese Salze mit dem Wasserstrahl direkt auf den Brandherd aufzugeben, wo sie beim Verdampfen des Wassers auskristallisieren und in fein verteilter Form inhibitorisch wirken können. Das verdampfende Wasser entzieht gleichzeitig dem Brandherd Wärme, sodaß das Brandgut abkühlt, was ein Wiederauf-flammen erschwert.

6. FORMELZEICHEN

b	Breite in m
B	Brandbelastung in kg/m^2
c	Konzentration in Gew.-%
E	Aktivierungsenergie in J/mol
F	Fläche in m^2
g	Erdbeschleunigung in m/s^2
h	Höhe in m
H	Häufigkeitsfaktor in cm^3/gs
I	Intensität des Lichtes
K, k_1, k_2	Proportionalitätsfaktoren
l	Länge in m
m	Masse in kg
\dot{m}	zeitlicher Massenverlust in kg/min oder kg/s
\ddot{m}	Brandentwicklung in kg/min^2
p	Pyrolysegeschwindigkeit in $\text{cm}^3/\text{kg s}$
\dot{Q}	Wärmestrom in J/s
R	Gaskonstante
s	Konfidenzintervallbreite
t	Zeit
T	Temperatur
v	Geschwindigkeit in m/s
V	Volumen in m^3
\dot{V}	Volumenstrom in m^3/s
W	Wassermenge, Löschmittelmenge
\dot{W}	Durchfluß, Wasserbeaufschlagung in l/s
\bar{x}	Mittelwert
α	Strömungsbeiwert
γ	Winkel
λ	Luftzahl
ρ	Dichte in kg/m^3
ϕ	Ventilationsparameter
τ	Zeit

INDIZES

b	Brandphase
B	Brandgut
e	Endzustand
f	Feststoff
l	Löschphase, Leitung
L	Luft
n	normiert
o	Anfangszustand, Umgebungszustand
r	Reaktion
R	Rauchgas
s	Strahlung
st	stöchiometrisch
t	Transport
v	volumenbezogen
w	Wasser
x	an der Stelle x
40	Zeitpunkt des Massenverlustes von 40 %

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] T.Z.Harmathy: A new look at compartment fires, Part I
Fire Technology 8
(1972) Nr. 3
- [2] P.H.Thomas,
A.M.Heselden,
Margaret Law: Fully-developed compartment fires-two kinds of behaviour.
Fire Research Technical paper
(1967) Nr. 18
- [3] Leif Nilsson: Time curve of heat release for compartment fires with fuel of wooden cribs.
Lund Institute of Technology,
Lund, Sweden
(1974) Bulletin 36
- [4] D.Coulbert: Energy release criteria for enclosures fire hazard analysis-part I. Fire Technology 13
(1977) Nr. 3
- [5] J.B.Fang: Measurements of the behaviour of incidental fires in a compartment.
Fire & Flammability 7
(1976) S. 368
- [6] G. Haskestad: Modeling of enclosures fires.
14. Symposium on Combustion
Pittsburgh
The Combustion Institute
(1973)

- [7] P.H.Thomas: Behaviour of fires in enclosures-some recent progress.
14. Symposium on Combustion
Pittsburgh
The Combustion Institute
(1973)
- [8] P.Arnault,
H.Ehrm,
J.Kruppa: Incendies naturels avec des meubles et du papier.
Revue Technique du Feu
(1975) 146
- [9] K.Kawagoe: Fire behaviour in rooms.
Building Research Institute
Report Nr. 27
Japanese Ministry of Construction,
Tokyo 1958
- [10] R.John: Rauchgas- und Luftströme durch Öffnungen in Brandräumen.
In: Internationales Brandschutz - Seminar
1976 in Karlsruhe,
Karlsruhe: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. 1976
Bd. 1, S. 39 - 61
- [11] Arbeitsmappe Heizung, Lüftung, Klimatechnik.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1968
- [12] W.Patzak: Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz.
VDI-Forschungsheft 552 (1972)
Verein Deutscher Ingenieure

- [13] D.W.Evans,
H.W.Emmons: Combustion of wood charcoal
Fire Research 1 (1977) 57 - 66
- [14] P.Fuchs: Brand- und Löschversuche in
natürlichem Maßstab, um geeig-
nete Löschmittel oder Kombi-
nationen von Löschmitteln zu
finden, die den bei der der-
zeitigen Brandbekämpfung üb-
lichen Wasserschaden verrin-
gern könnten.
Forschungsbericht Nr. 29 der
Arbeitsgemeinschaft Feuer-
schutz 1975 Teil I
- [15] P.Fuchs: Brand- und Löschversuche in
natürlichem Maßstab, um geeig-
nete Löschmittel oder Kombi-
nationen von Löschmitteln zu
finden, die den bei der der-
zeitigen Brandbekämpfung üb-
lichen Wasserschaden verringern
könnten.
Forschungsbericht Nr. 29 der
Arbeitsgemeinschaft Feuer-
schutz 1975 Teil II
- [16] Erwin Kreyszig: Statistische Methoden und
ihre Anwendungen.
Vandenhoeck & Ruprecht,
Göttingen, 5. Auflage 1975
- [17] F.Franke,
M.Meraikib: Die katalytische Wirkung von
Alkalien auf die Verbrennungs-
reaktion des Kohlenstoffes.
Carbon 8 (1970)

- [18] Hajime Kida: Extinction of fires of small wooden crib with sprays of water and some solutions. Report of fire research Institute of Japan No. 36 (1973)
- [19] Dr.-Ing.L.Metz: Die Wirksamkeit wässriger Salzlösungen als Mittel zur Feuerbekämpfung. Berlin: Die Feuerspritze 1885 Nr. 4
- [20] F.Salzberg,
F.J.Vodvarka: Minimum water requirements for suppression of room fires. Fire Technology 6 Nr. 1 (1970)
- [21] D.Hird,R.W.Pickard,
D.W.Fittes,P.Nash: The use of high an low pressure water sprays against fully developed room fires. Fire Research Note No. 388 März 1959
- [22] R.Baldwin: Use of water in the extinction of fires by brigades. Institution of fire engineers quarterly.
- [23] W.Hoffmann,
R.John: Modellbrandversuche Forschungsbericht Nr. 12 der Arbeitsgemeinschaft für Feuerschutz 1969.

8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Löschmittelmengen in Litern für verschiedene
Löschmittel

Diammoniumphosphat							
Gew.%	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0	27,0	40,0
	2,2	1,45	1,55	1,54	0,93	2,0	1,82
	$\pm 0,64$	$\pm 0,33$	$\pm 0,62$	$\pm 0,67$	$\pm 0,21$	$\pm 0,32$	$\pm 0,19$
Ammoniumsulfat							
Gew.%		5,0	10,0	15,0	20,0	43,0	
		2,34	1,61	1,57	1,24	1,59	
		$\pm 0,52$	$\pm 0,38$	$\pm 0,60$	$\pm 0,17$	$\pm 0,26$	
Kaliumhydrogenkarbonat							
Gew.%		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	
		2,84	2,19	1,88	1,99	1,92	
		$\pm 0,62$	$\pm 0,73$	$\pm 0,58$	$\pm 0,99$	$\pm 0,23$	
Natriumbikarbonat							
Gew.%		5,0	8,0				
		2,7	3,33				
		$\pm 0,30$	$\pm 0,77$				
Fluortensid							
Gew.%		5,0					
		2,18					
		$\pm 0,69$					
Wasser							
Mittelwert aus 25 Versuchen							
		2,79					
		$\pm 0,35$					

Tabelle 2. Versuchsdaten

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	Bezugs- wert
Brandgut	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	
Masse des Brandgutes in kg	382	381	383	380	382	380	383	383	
Branddauer t_b in min	15,5	18,6	25,3	23,6	27,7	21,5	25,7	19,3	
Branddauer bis Feuerübersprung in min	4,0	6,5	14,0	10,5	19,0	9,5	8,0	6,0	
Abbrand in % z.Z. $t = t_b$ in min	40,1	40,6	40,6	40,4	40,3	41,1	40,0	40,0	
Branddauer bis $t = t_{40}$ in min	15,4	18,5	25,0	23,5	27,6	20,8	25,7	19,3	
zeitlicher Massenverlust k_g/min	15	11,5	12,4	10,12	12,2	10,0	8,0	10,3	
Löschmethode	Schwer- schaum L 200	Fluor- tensid DM-Rohr	Fluor- tensid CM-Rohr	A.-sulfat 10% CM-Rohr	A.-sulfat 10% DM-Rohr	A.-phosph 5% CM-Rohr	A.-phosph. 5% CM-Rohr	A.phosph. 20% CM-Rohr	CM- Strahl- rohr
Löschzeit t_l in min	3,0	8,0	4,0	7,5	8,0	4,4	3,1	1,7	6,5
Löschmittelmenge in l.	170	210	180	170	148	122	125	57	215
Schadenswasser- menge in l	62	63	79	93	63	50	36	10	116
Verdampfte Lösch- wassermenge in l	108	147	101	77	85	72	89	47	98

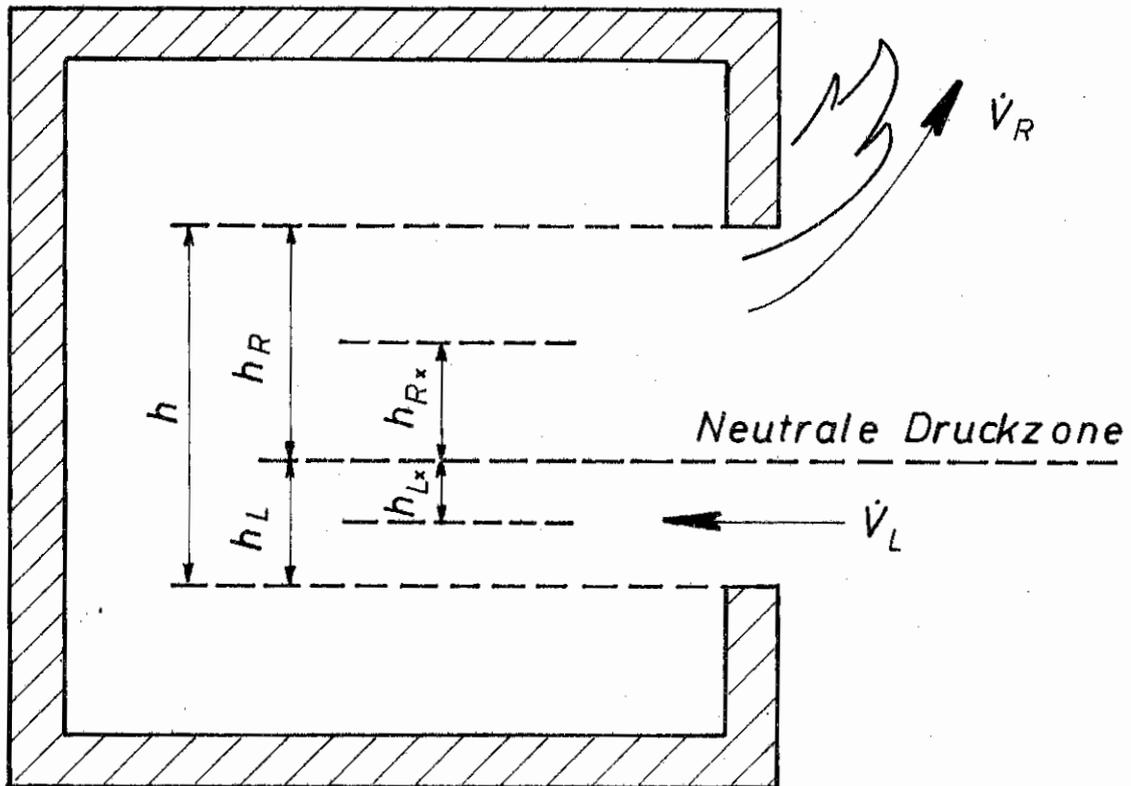


Bild 1. Schematisches Strömungsprofil der Gasströme durch eine Fensteröffnung eines Brandraumes

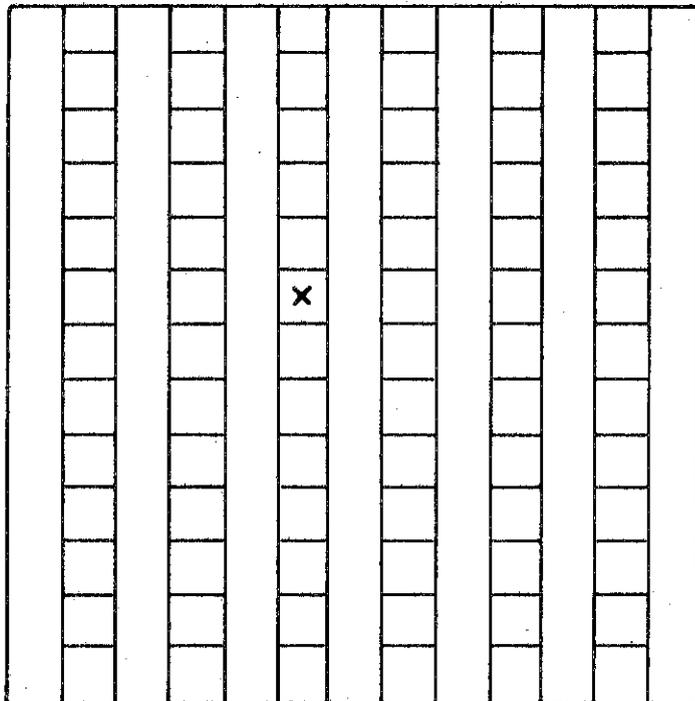
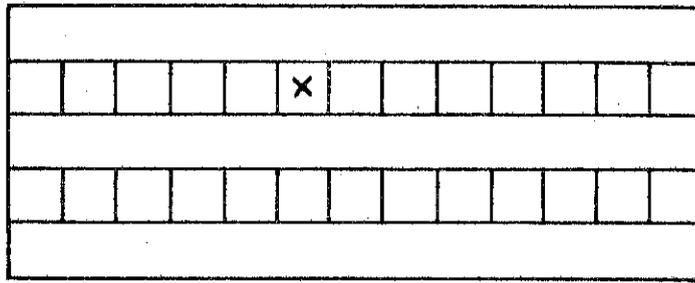
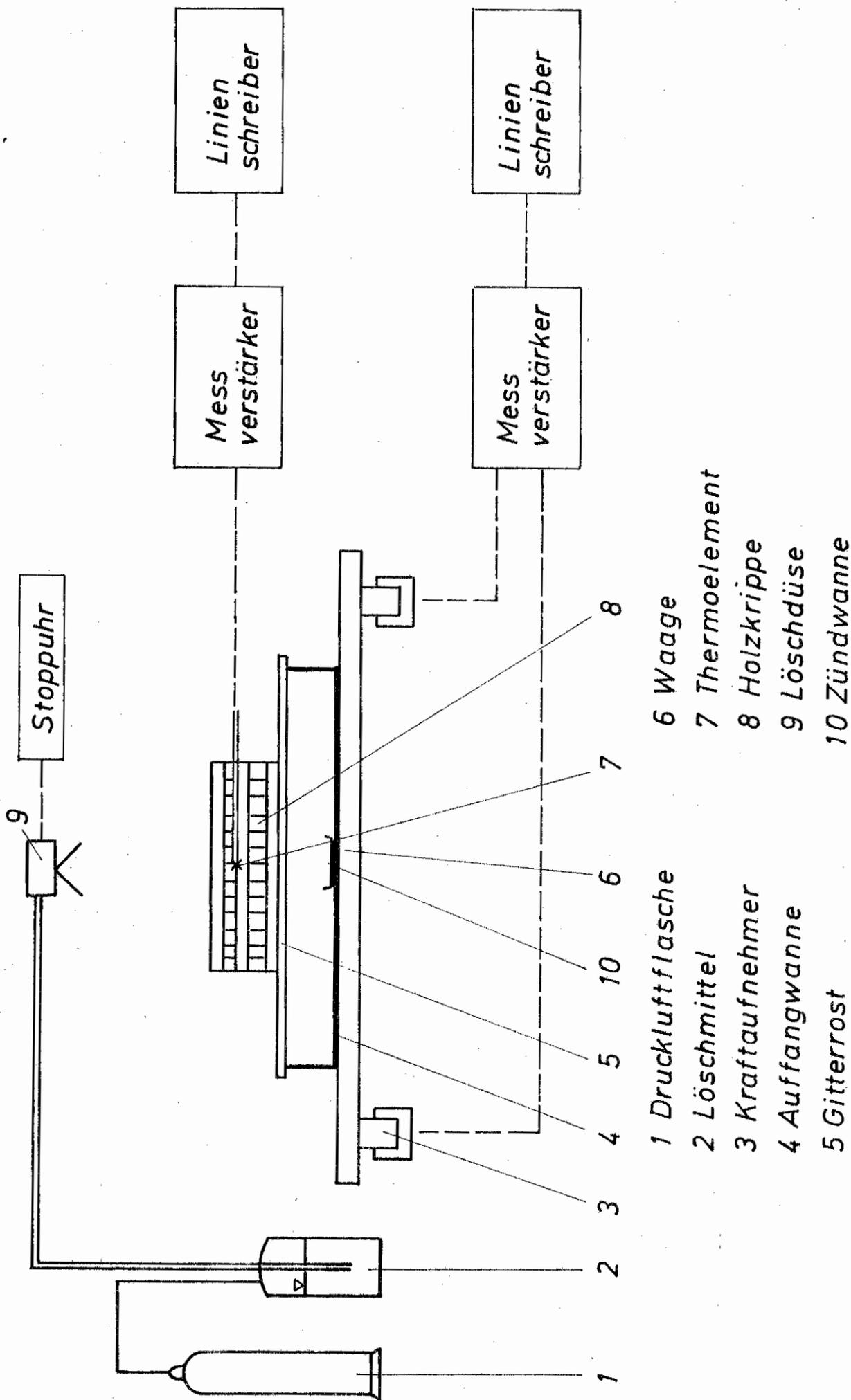


Bild 2. Holzkrippe mit Lage der Thermolemente für Untersuchungen an Modellbränden



- 1 Druckluftflasche
- 2 Löschmittel
- 3 Kraftaufnehmer
- 4 Auffangwanne
- 5 Gitterrost
- 6 Waage
- 7 Thermoelement
- 8 Holzkrippe
- 9 Löschdüse
- 10 Zündwanne

Bild 3. Schematischer Aufbau der Versuchsanlage für Untersuchungen an Modellbränden

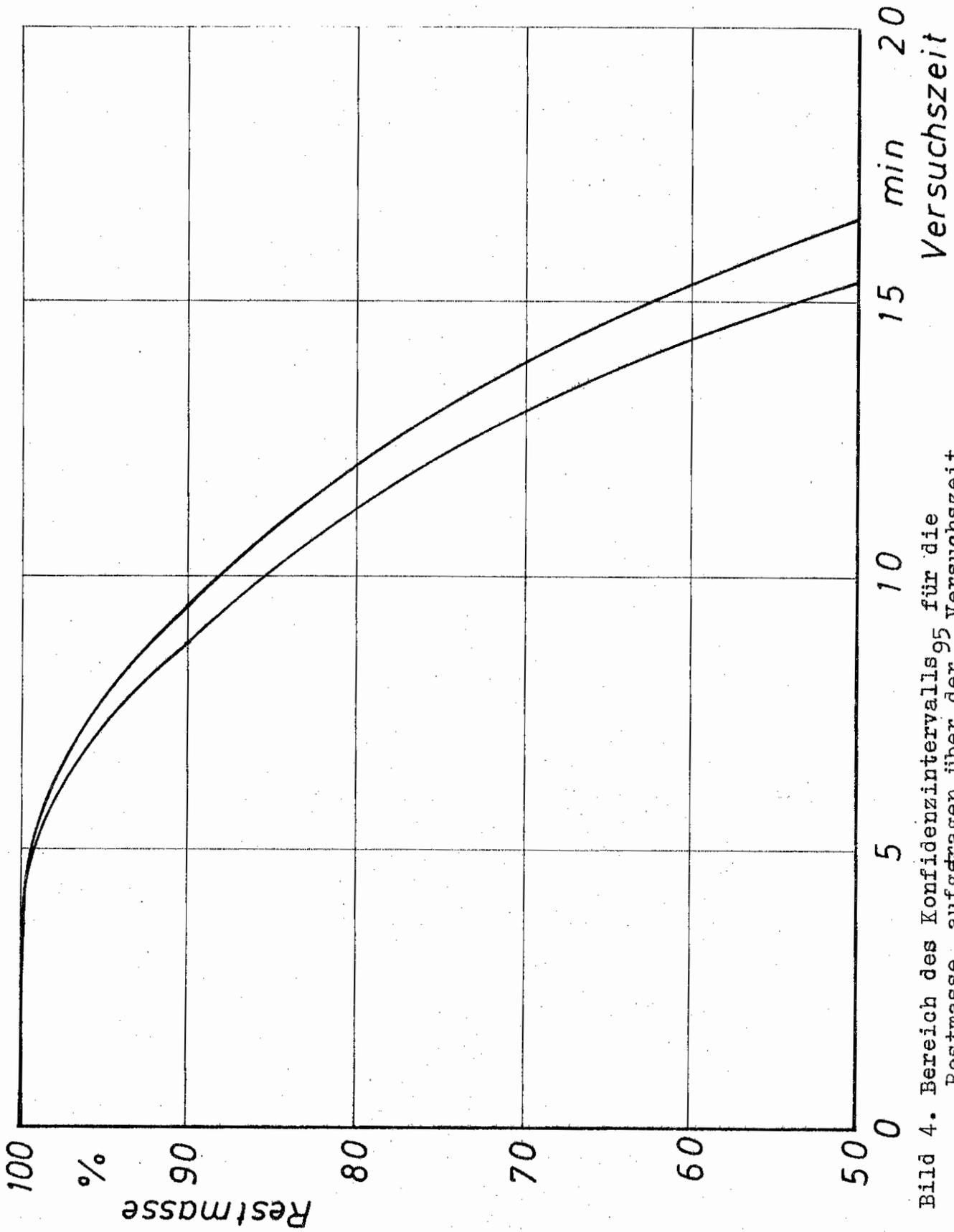


Bild 4. Bereich des Konfidenzintervalls⁹⁵ für die Restmasse, aufgetragen über der Versuchszeit

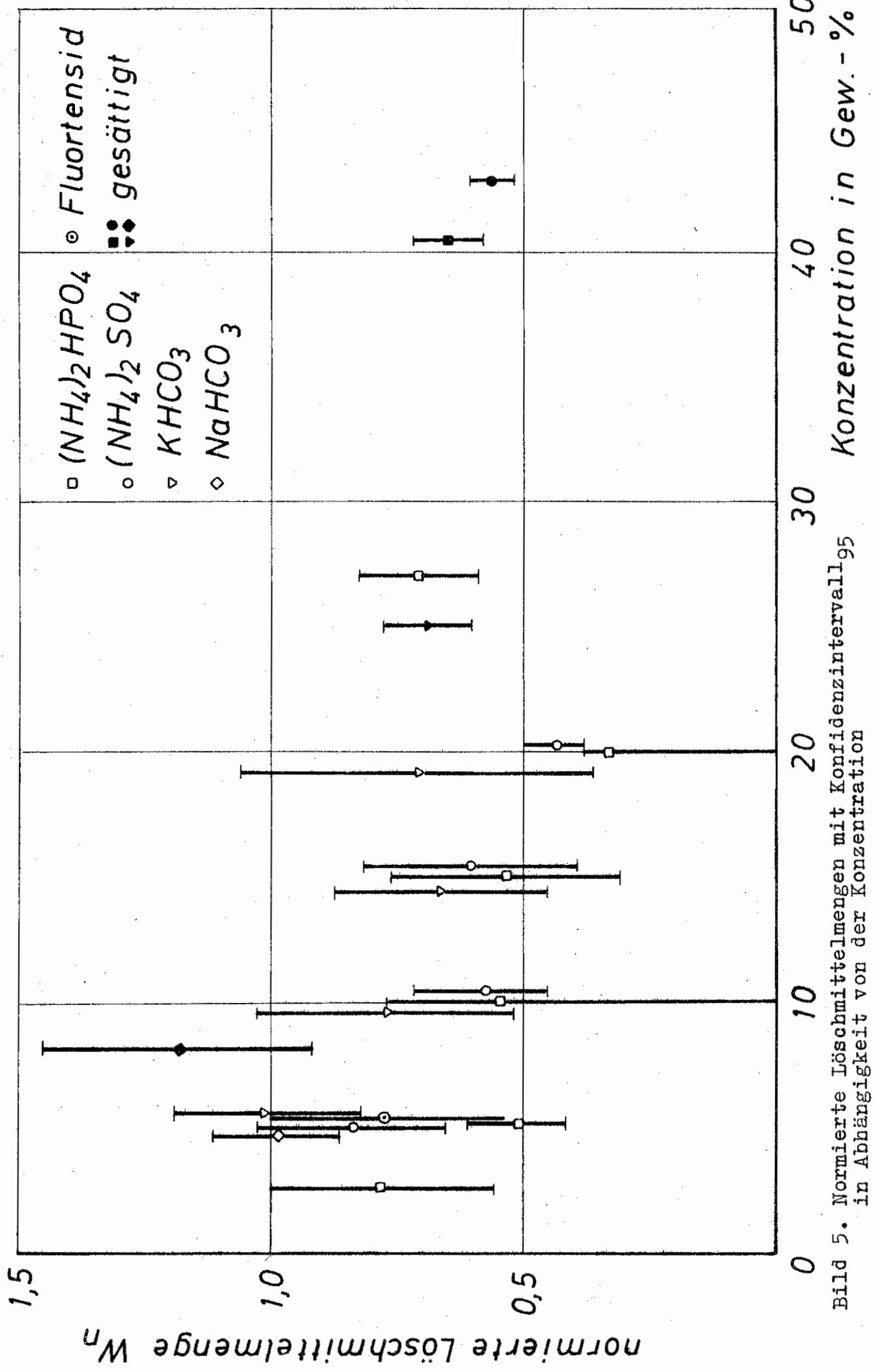


Bild 5. Normierte Löslichkeitsmengen mit Konfidenzintervall⁹⁵ in Abhängigkeit von der Konzentration

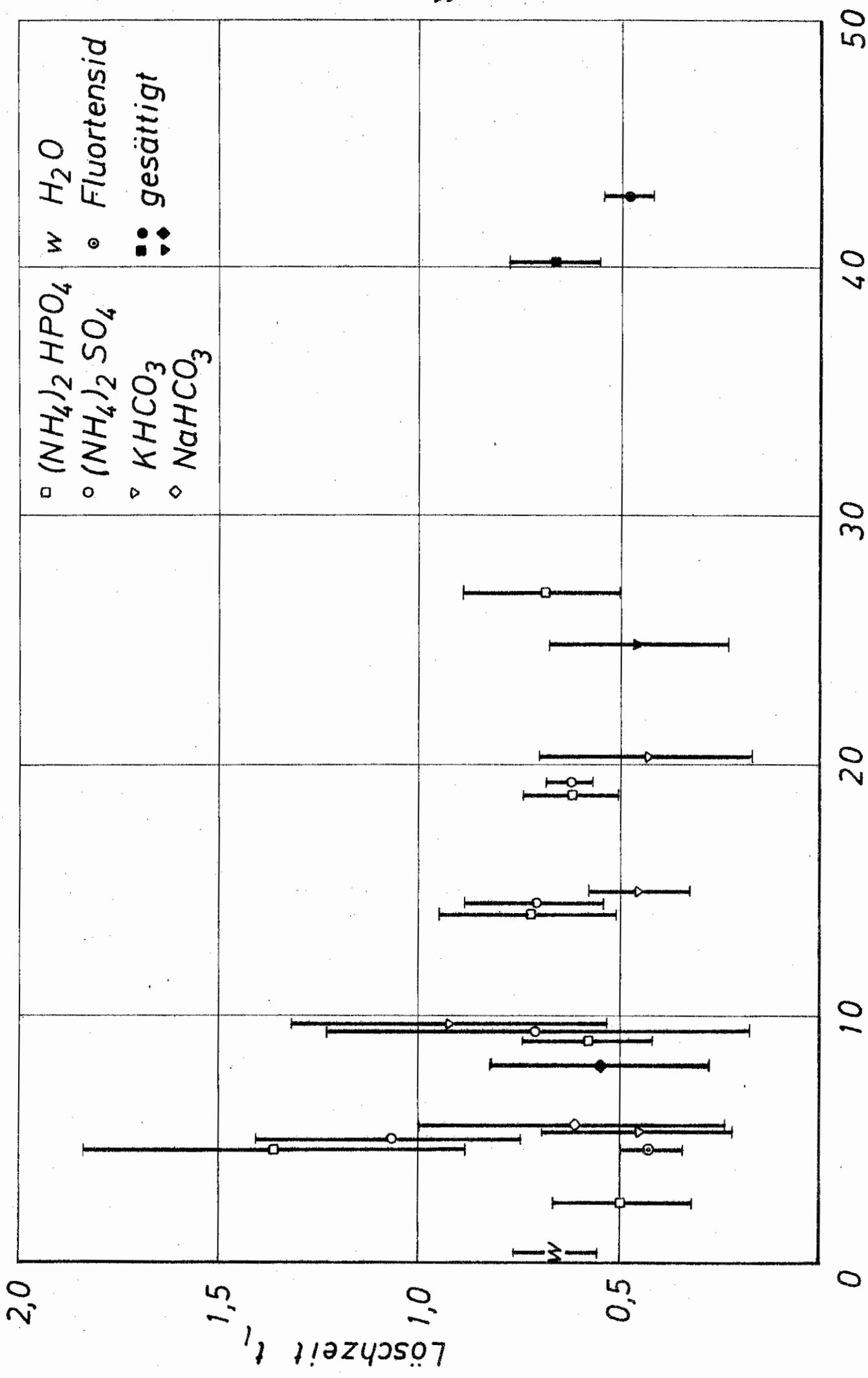


Bild 6. Löszeiten mit Konfidenzintervall 95 bei Anwendung verschiedener Löschmittel in Abhängigkeit von der Konzentration

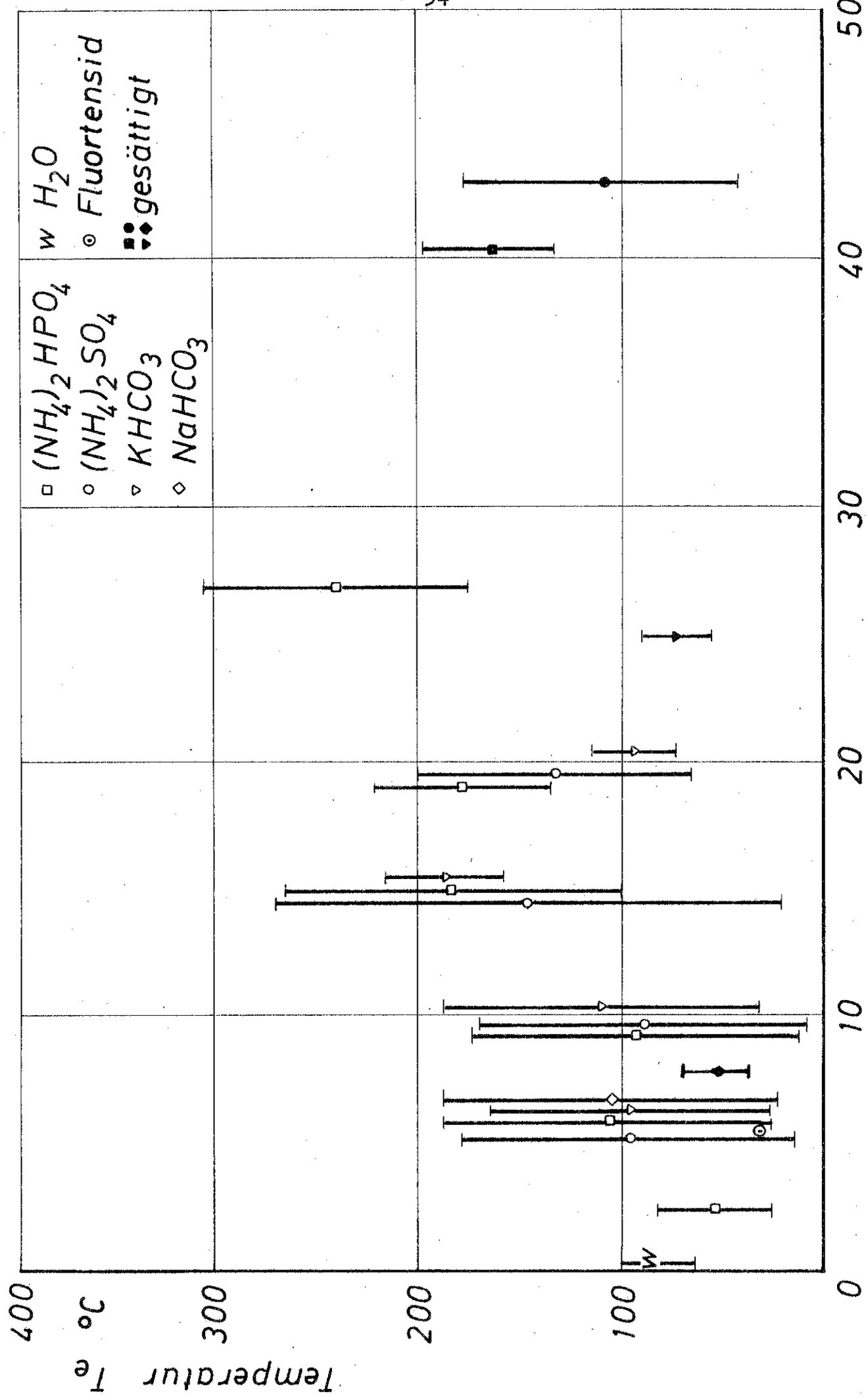


Bild 7. Temperatur T_e mit Konfidenzintervall 95 bei Anwendung verschiedener Löschmittel in Abhängigkeit von der Konzentration

Konzentration in Gew.-%

bei An-

wendung verschiedener Löschmittel

in Abhängigkeit von der Konzentration

ca. 5 cm unter der Decke

unmittelbar an der Wand ca. 50 cm über dem Zwischenboden

unmittelbar an der Wand ca. 170 cm über dem Zwischenboden

unmittelbar auf dem Zwischenboden

T 13 ca. 10 cm unter der Fensteroberkante

T 7 und T 8 sind Meßstellen an verschiedenen Bauteilen des Versuchsaumes

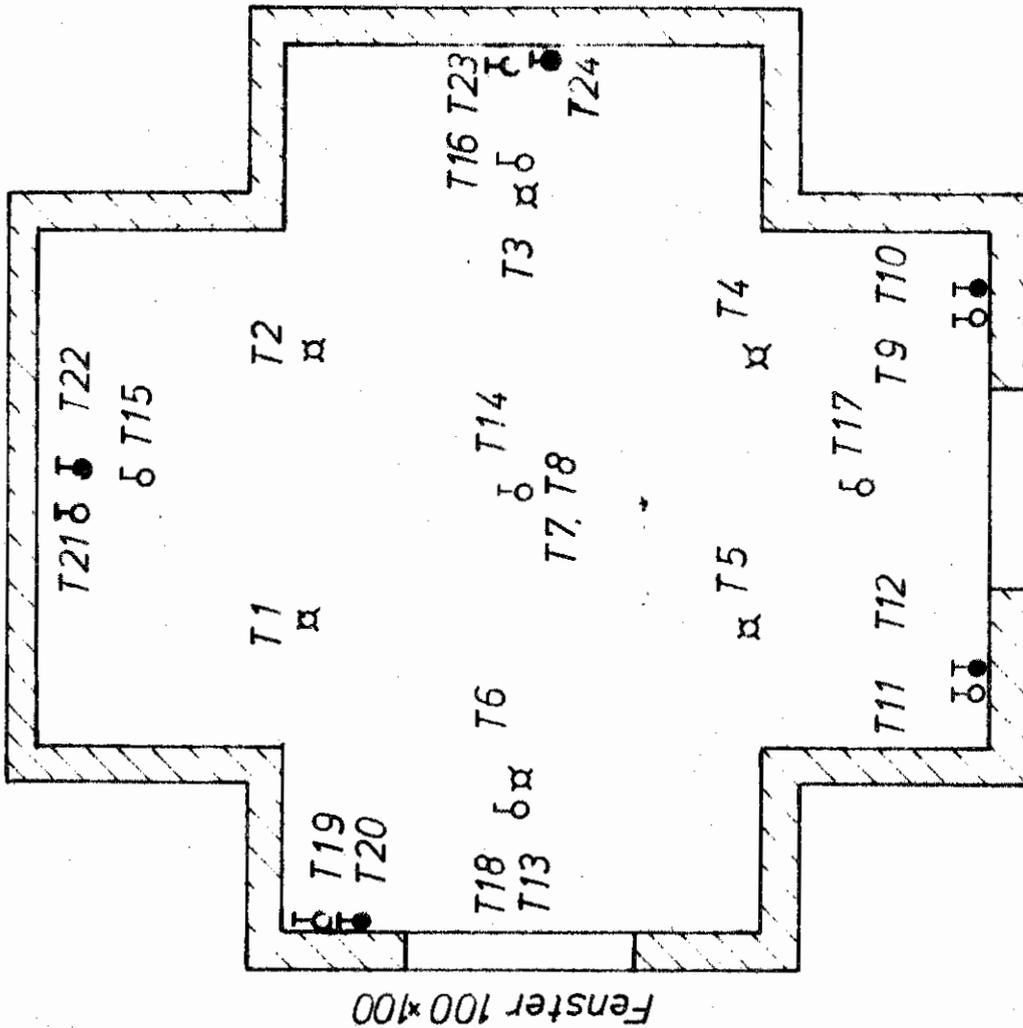


Bild 9. Lage der Thermoelemente im Versuchsraum

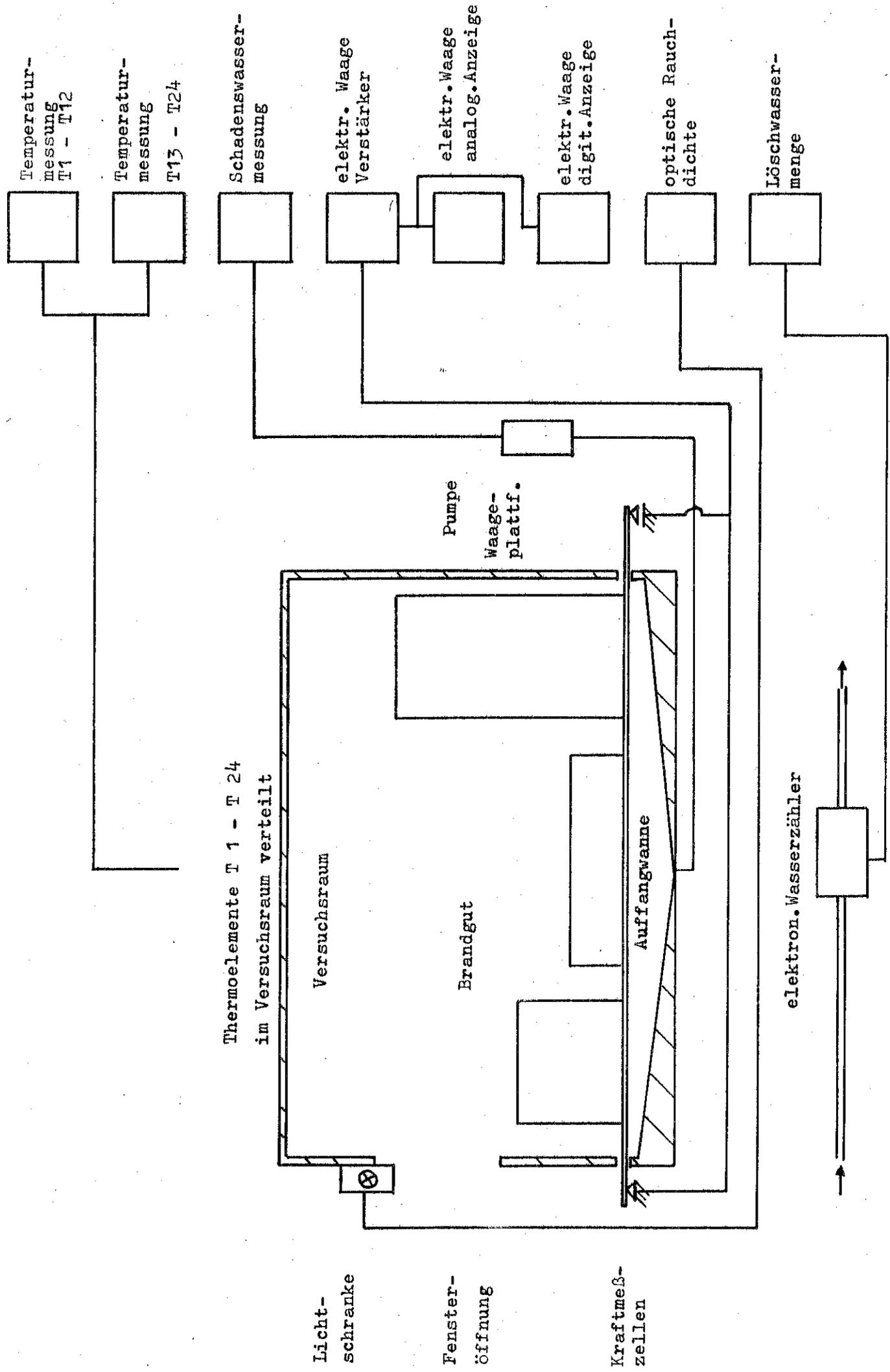
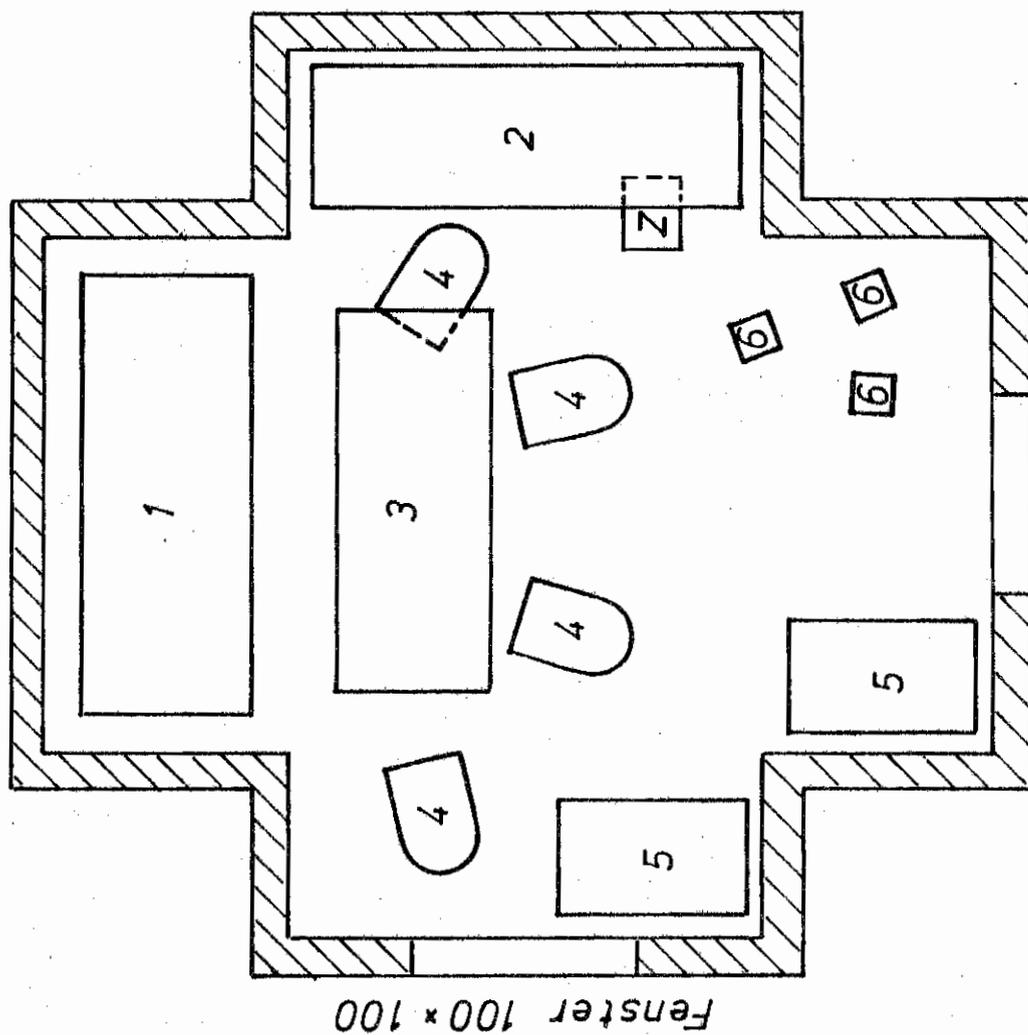


Bild 10. Schematischer Aufbau der Versuchsanlage für Untersuchungen in natürlichem Maßstab



1 Couch

2 großer Schrank

3 Tisch

4 Sessel

5 kleiner Schrank

6 Stuhl

Z Zündquelle

Fenster 100 x 100

Tür 90 x 200

Bild 11. Verteilung der Brandlast im Versuchsraum und Lage der Zündquelle.

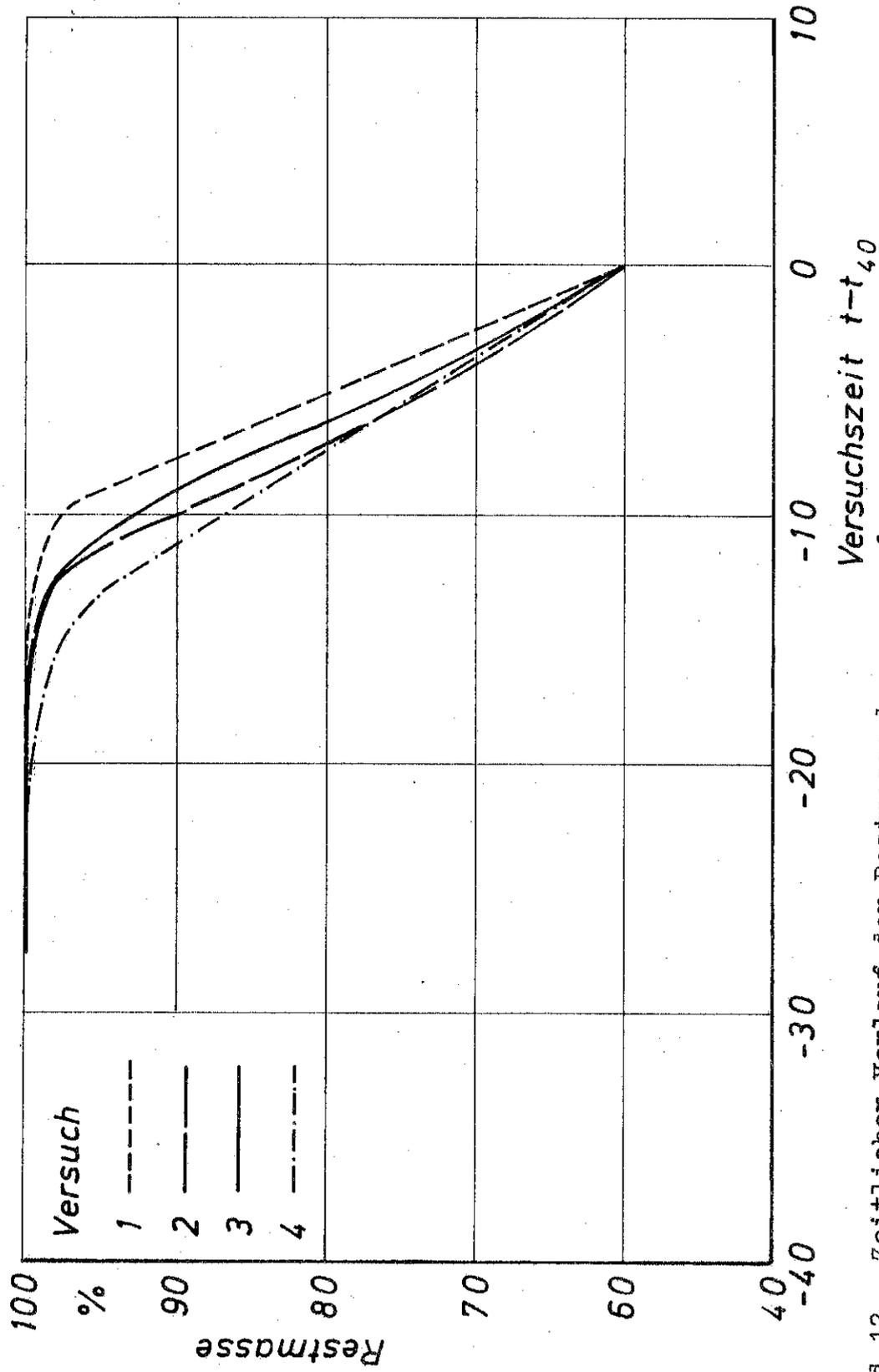


Bild 12. Zeitlicher Verlauf der Restmasse bezogen auf die Anfangsmasse der Versuche 1, 2, 3 und 4, aufgetragen über der Versuchszeit $t - t_{40}$

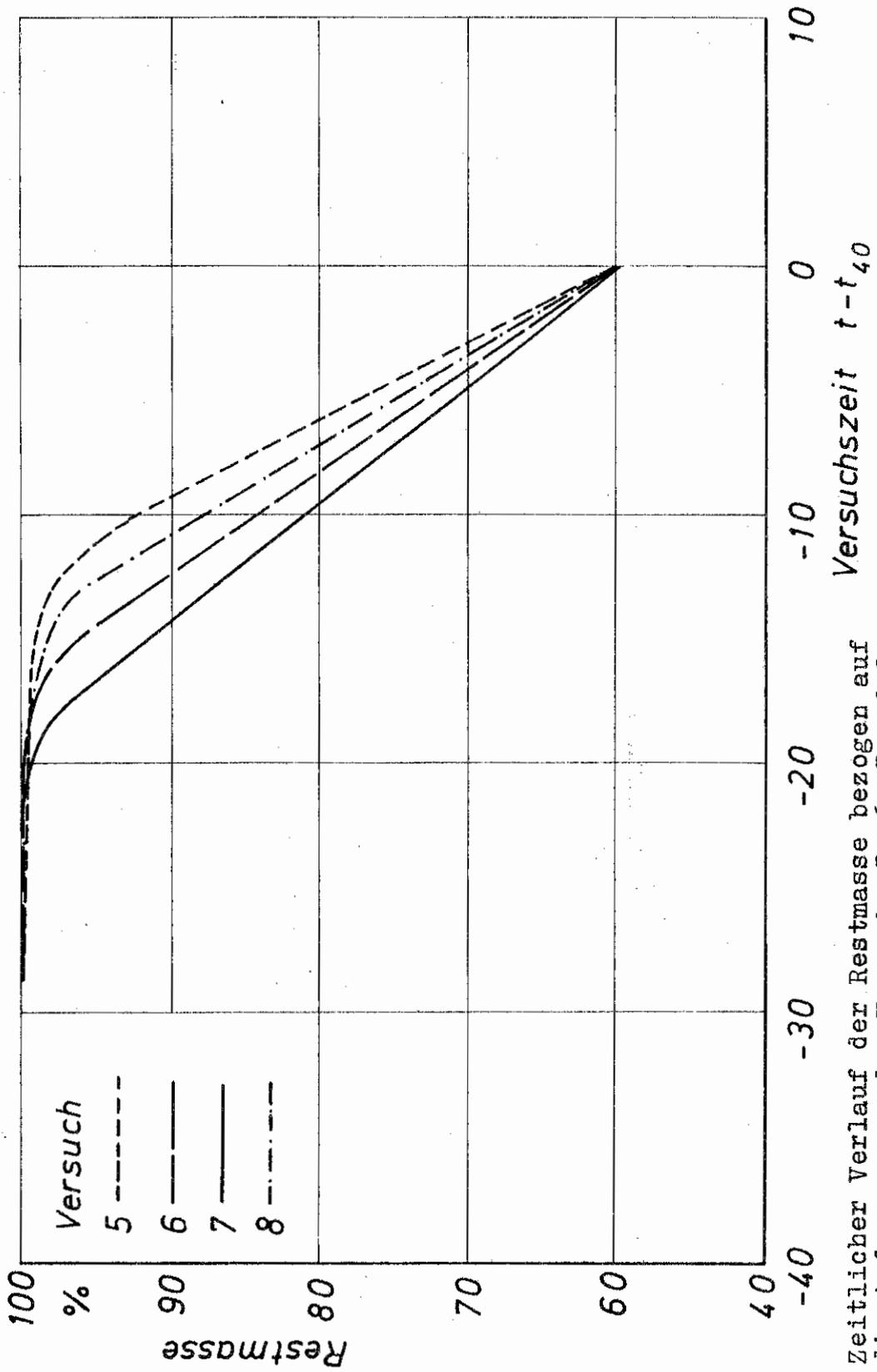


Bild 13. Zeitlicher Verlauf der Restmasse bezogen auf die Anfangsmasse der Versuche 5, 6, 7 und 8, aufgetragen über der Versuchszeit $t - t_{40}$

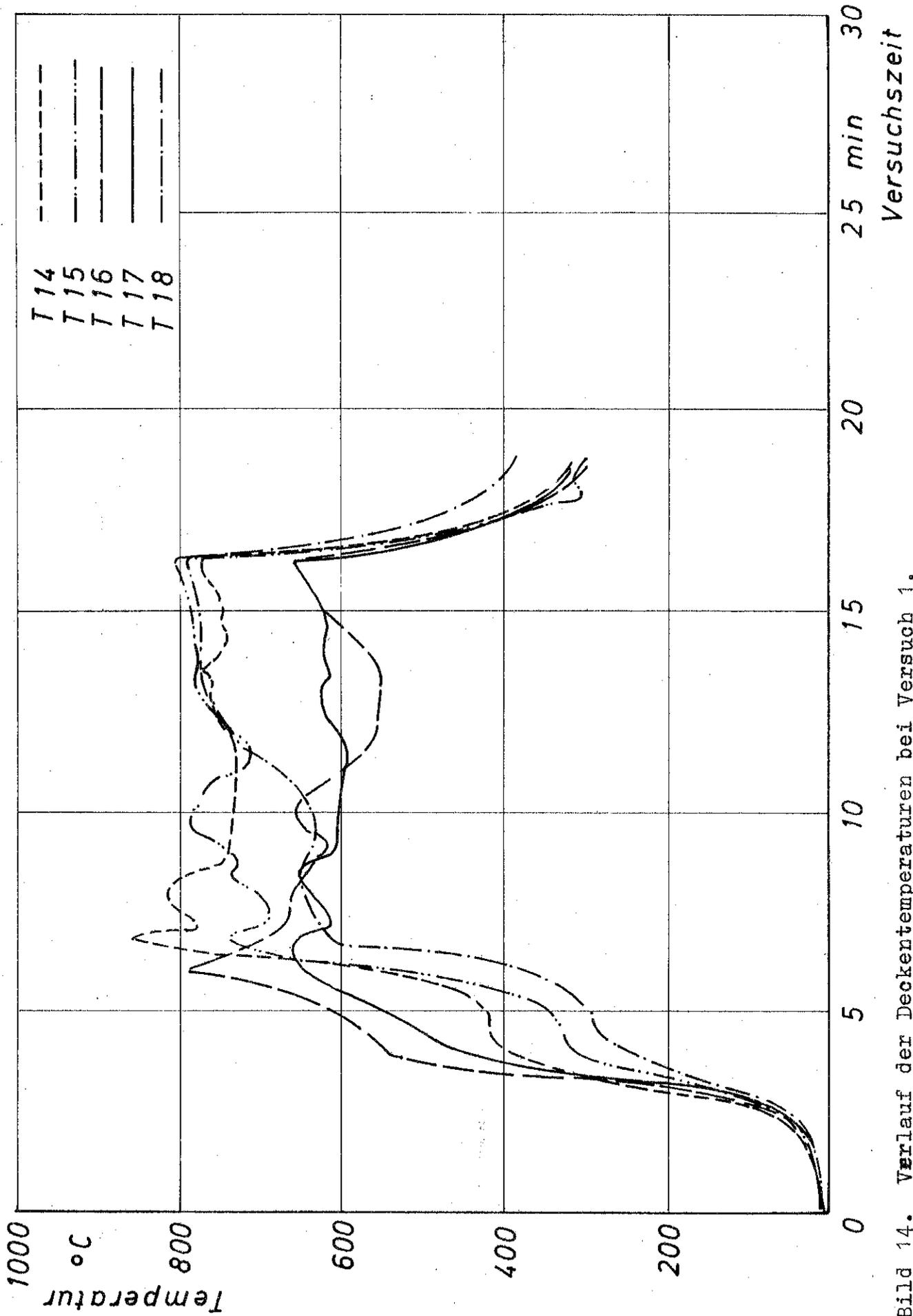


Bild 14. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 1, aufgetragen über der Versuchszeit

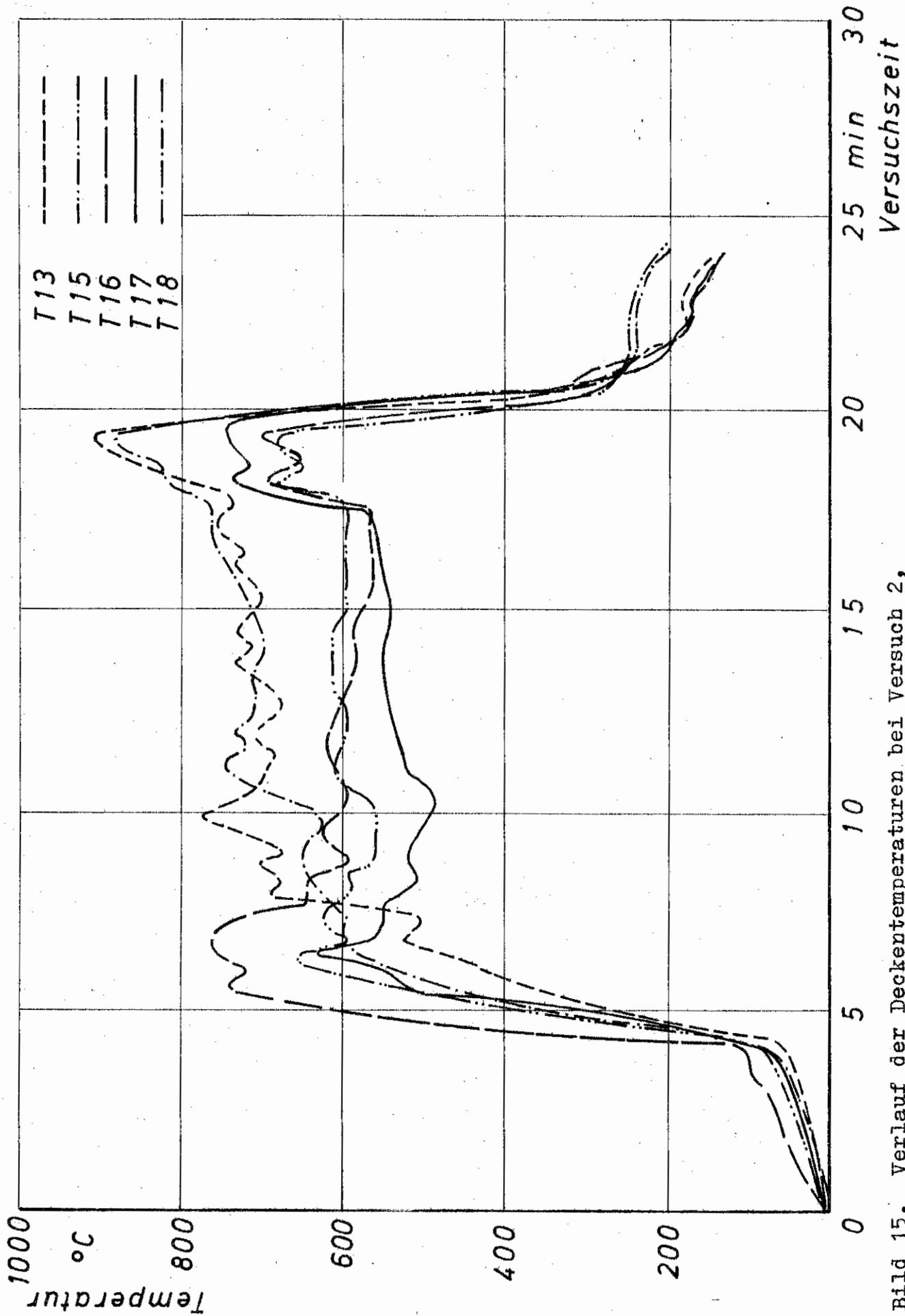


Bild 15. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 2, aufgetragen über der Versuchszeit.

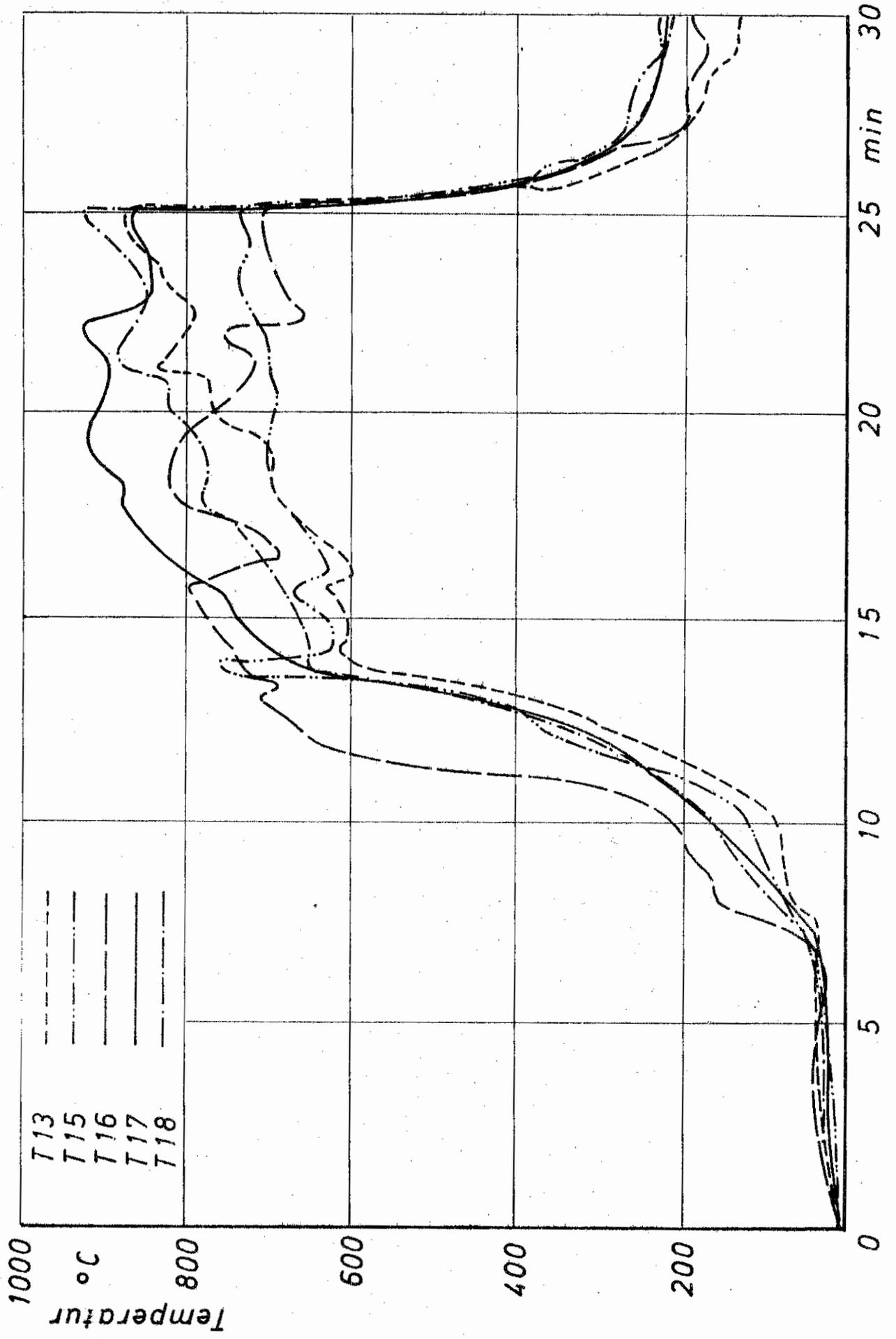


Bild 16. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 3, aufgetragen über der Versuchszeit

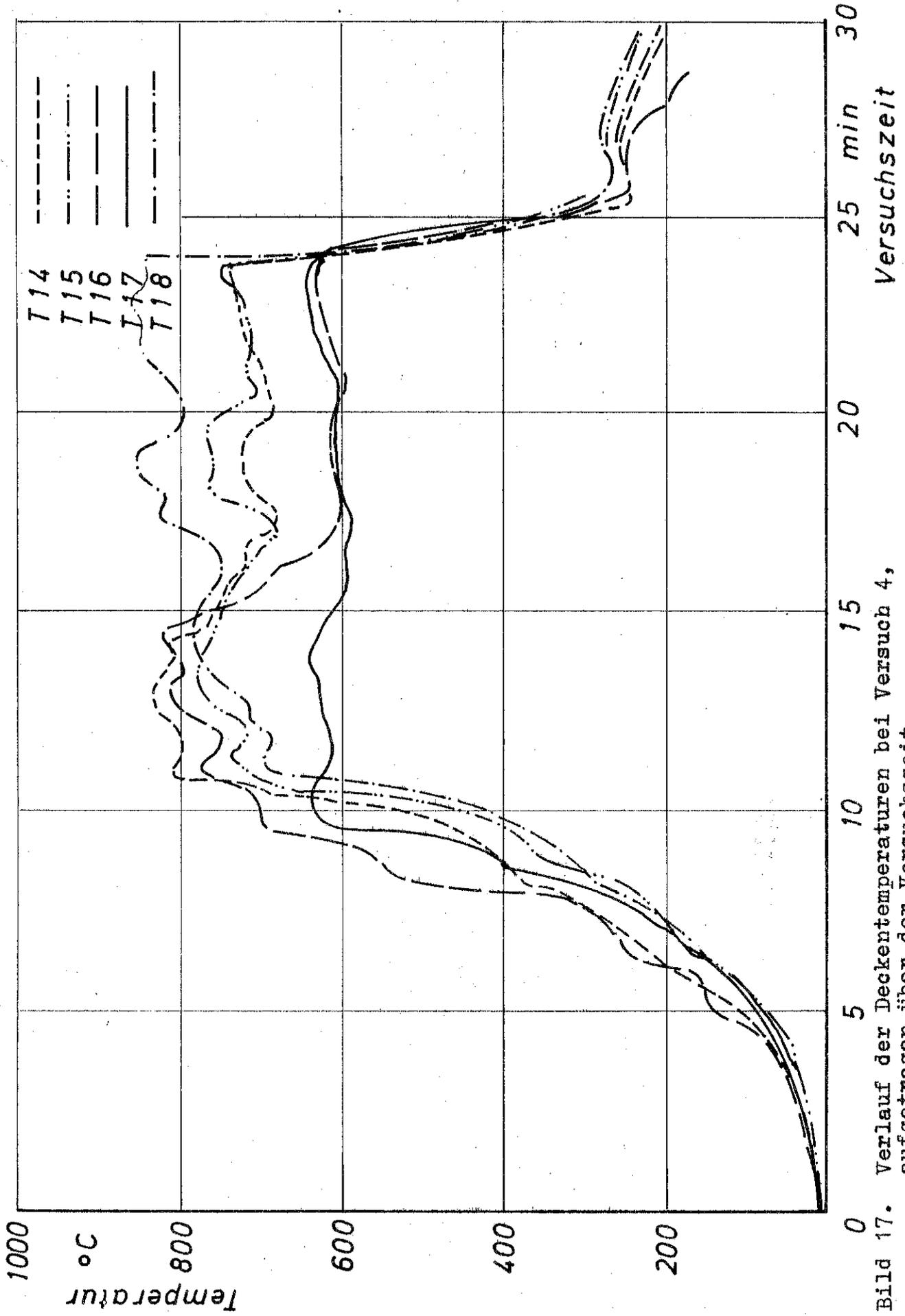


Bild 17. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 4, aufgetragen über der Versuchszeit

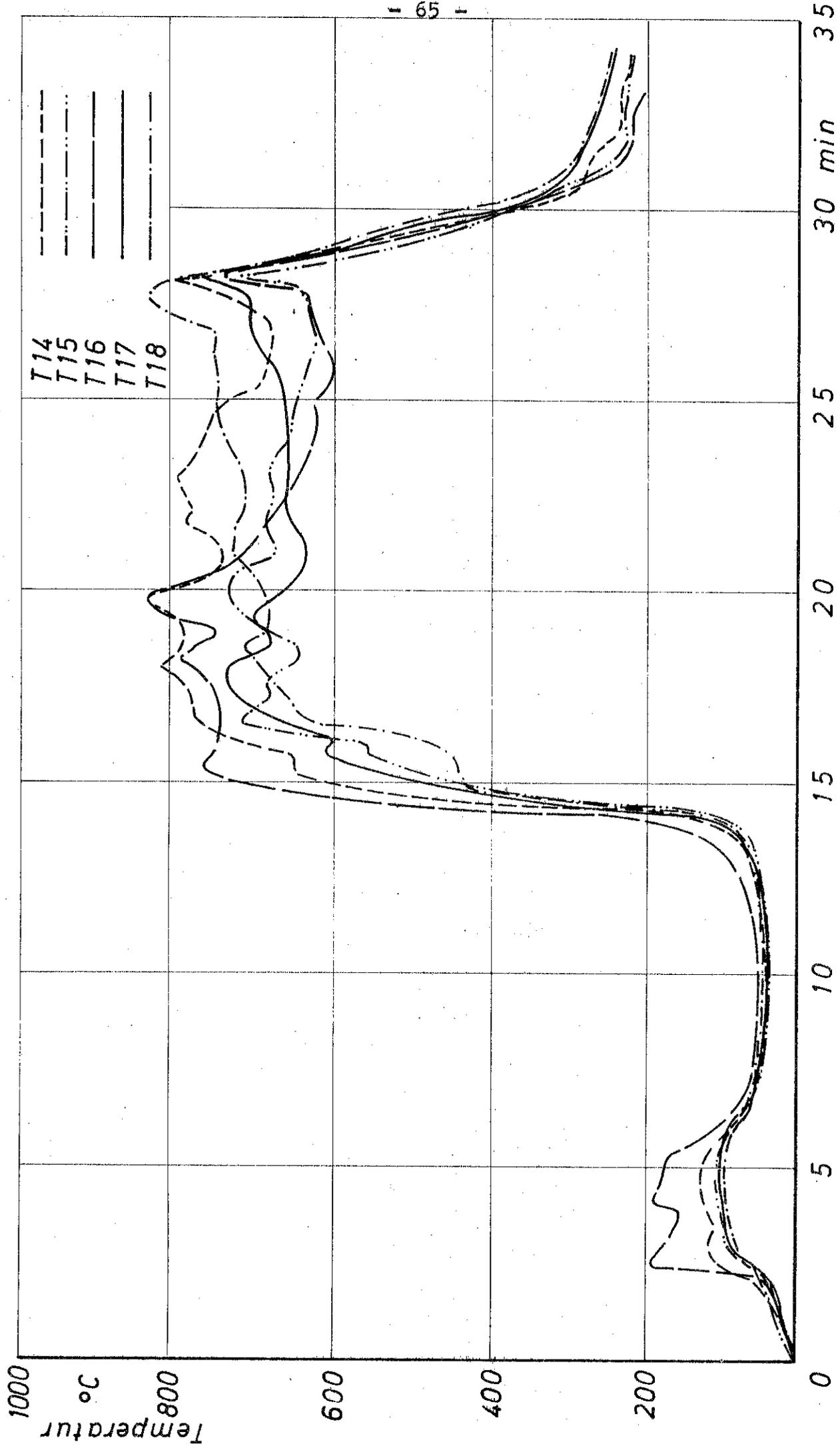


Bild 18. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 5, aufgetragen über der Versuchszeit

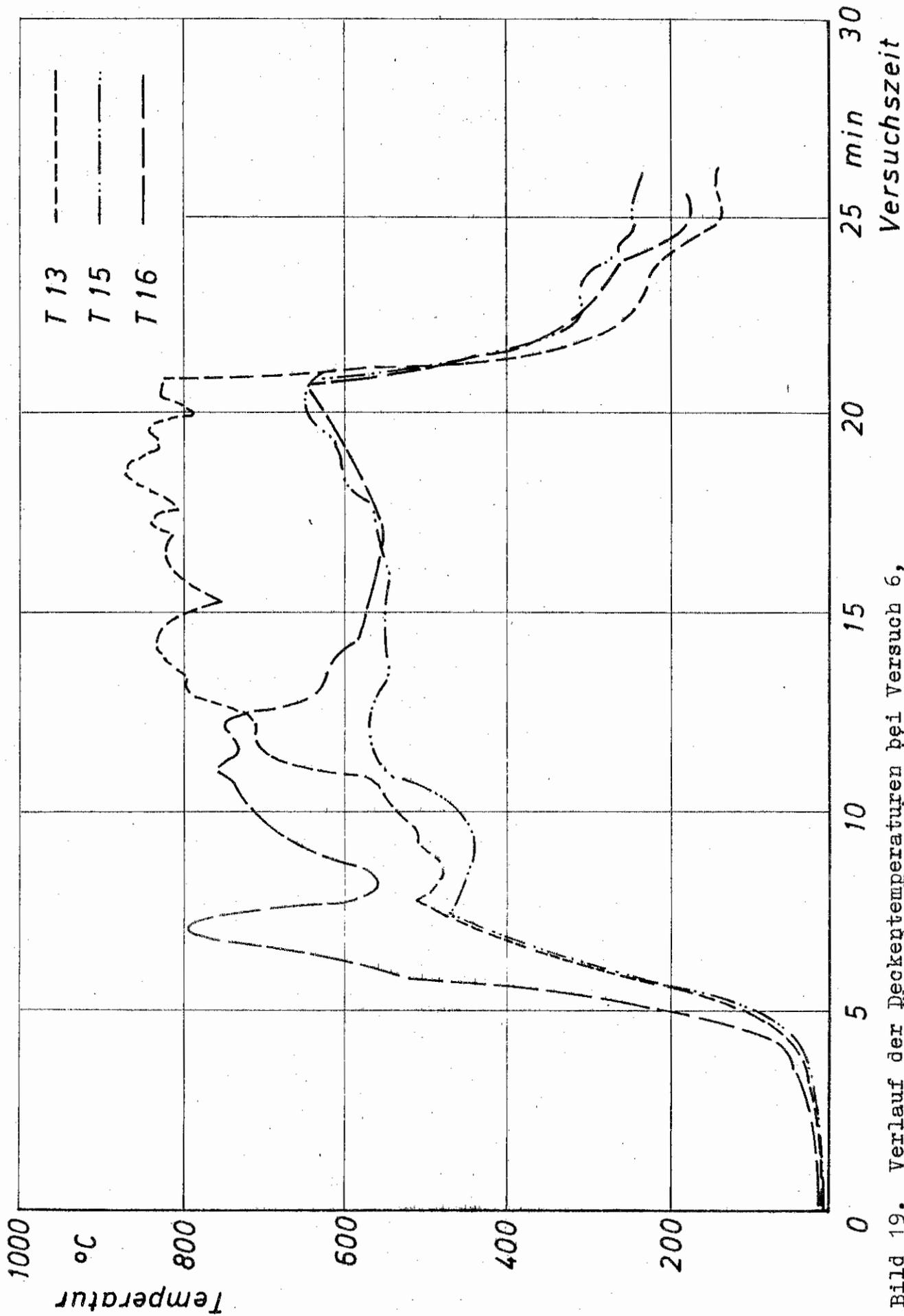


Bild 19. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 6, aufgetragen über der Versuchszeit

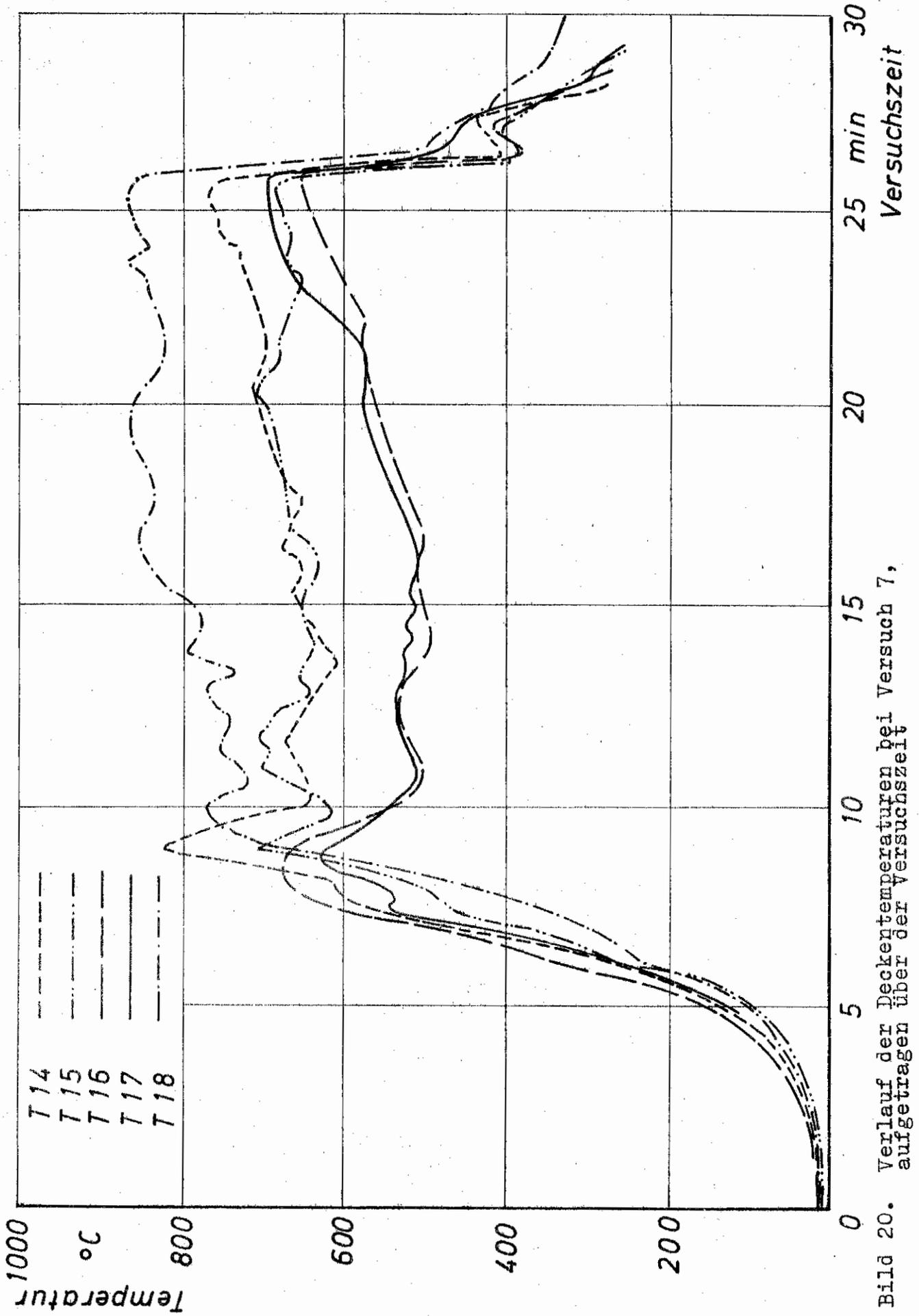


Bild 20. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 7, aufgetragen über der Versuchszeit

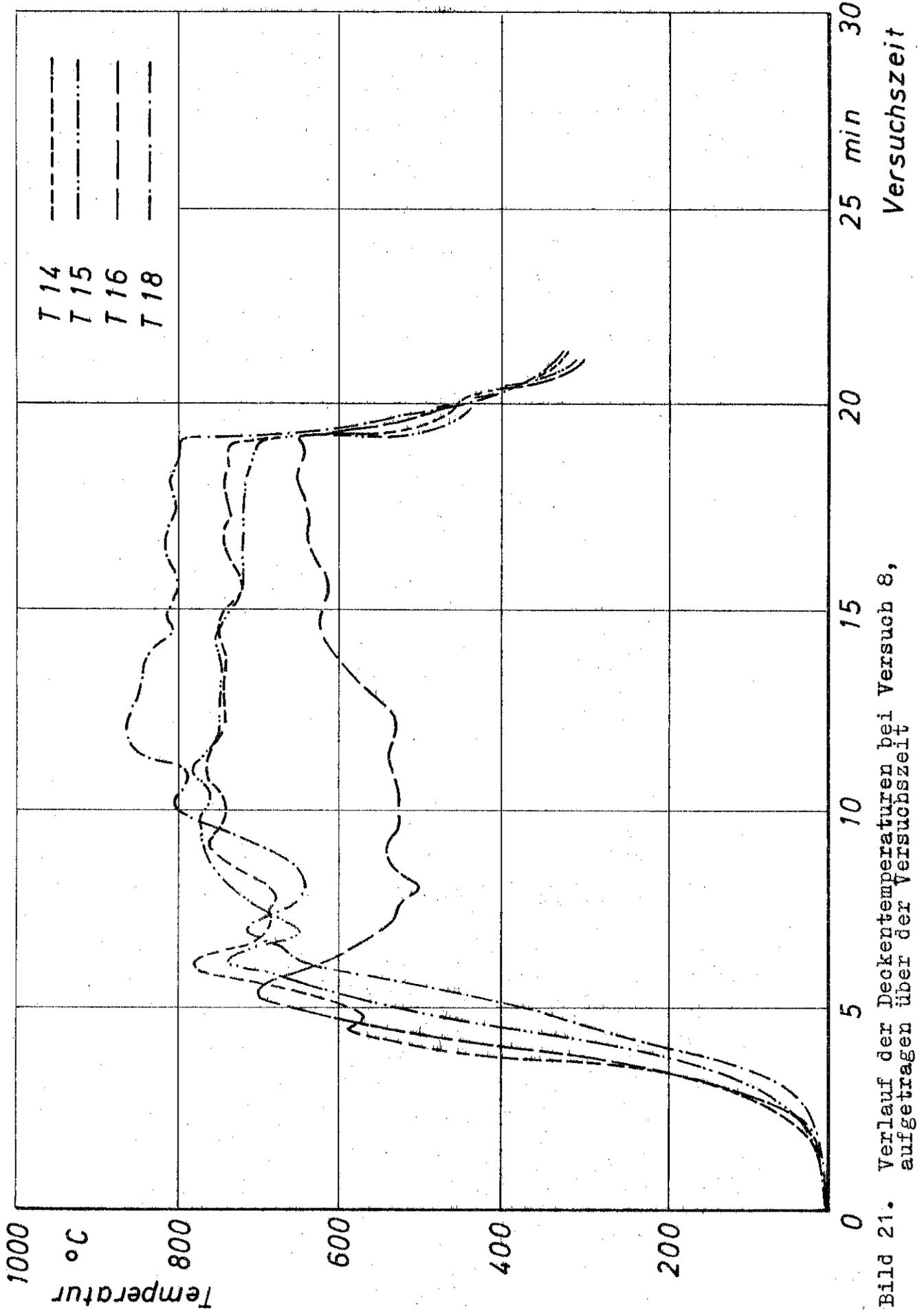


Bild 21. Verlauf der Deckentemperaturen bei Versuch 8, aufgetragen über der Versuchszeit

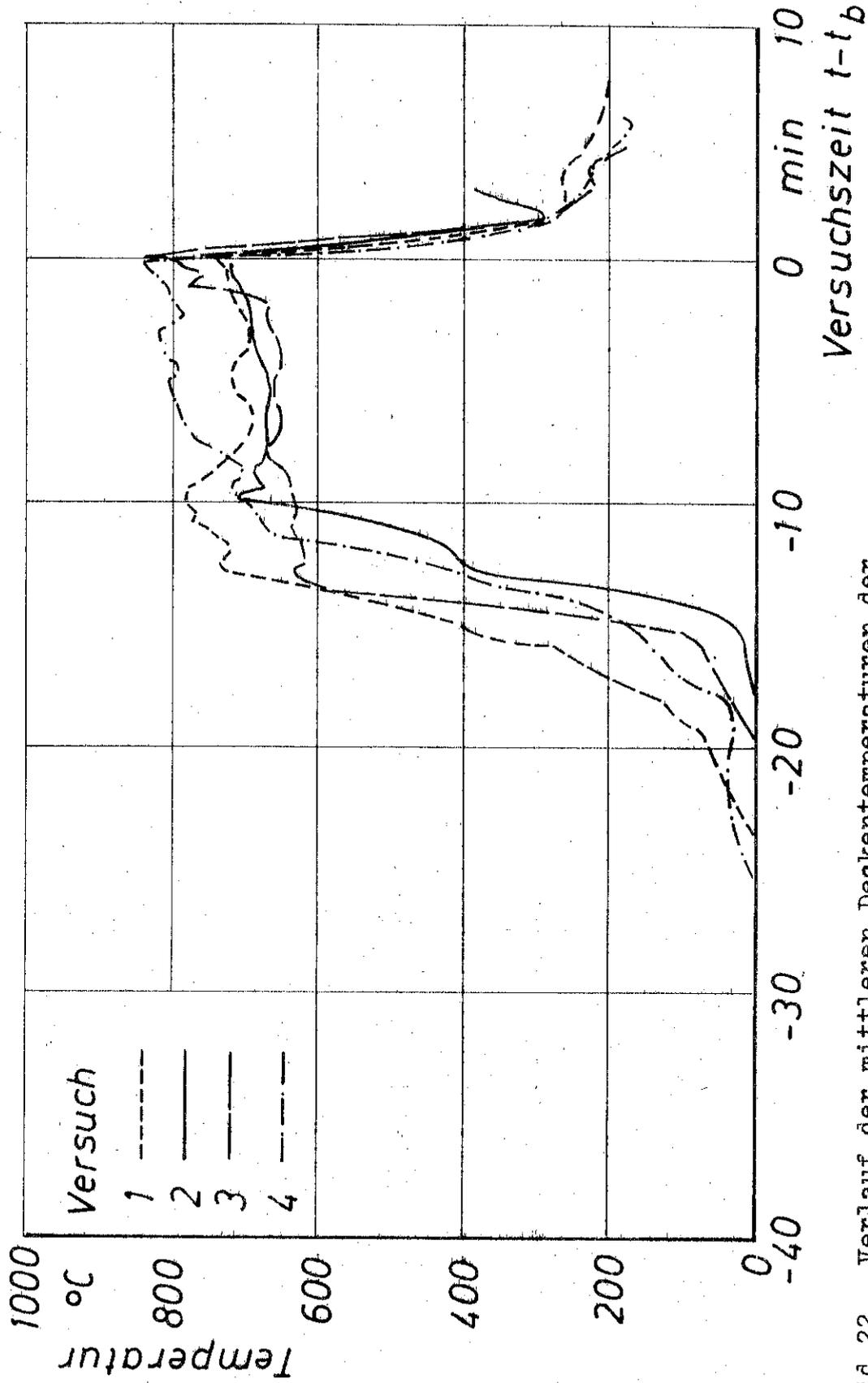


Bild 22. Verlauf der mittleren Deckentemperaturen der Versuche 1, 2, 3 und 4, aufgetragen über der Versuchszeit $t - t_b$

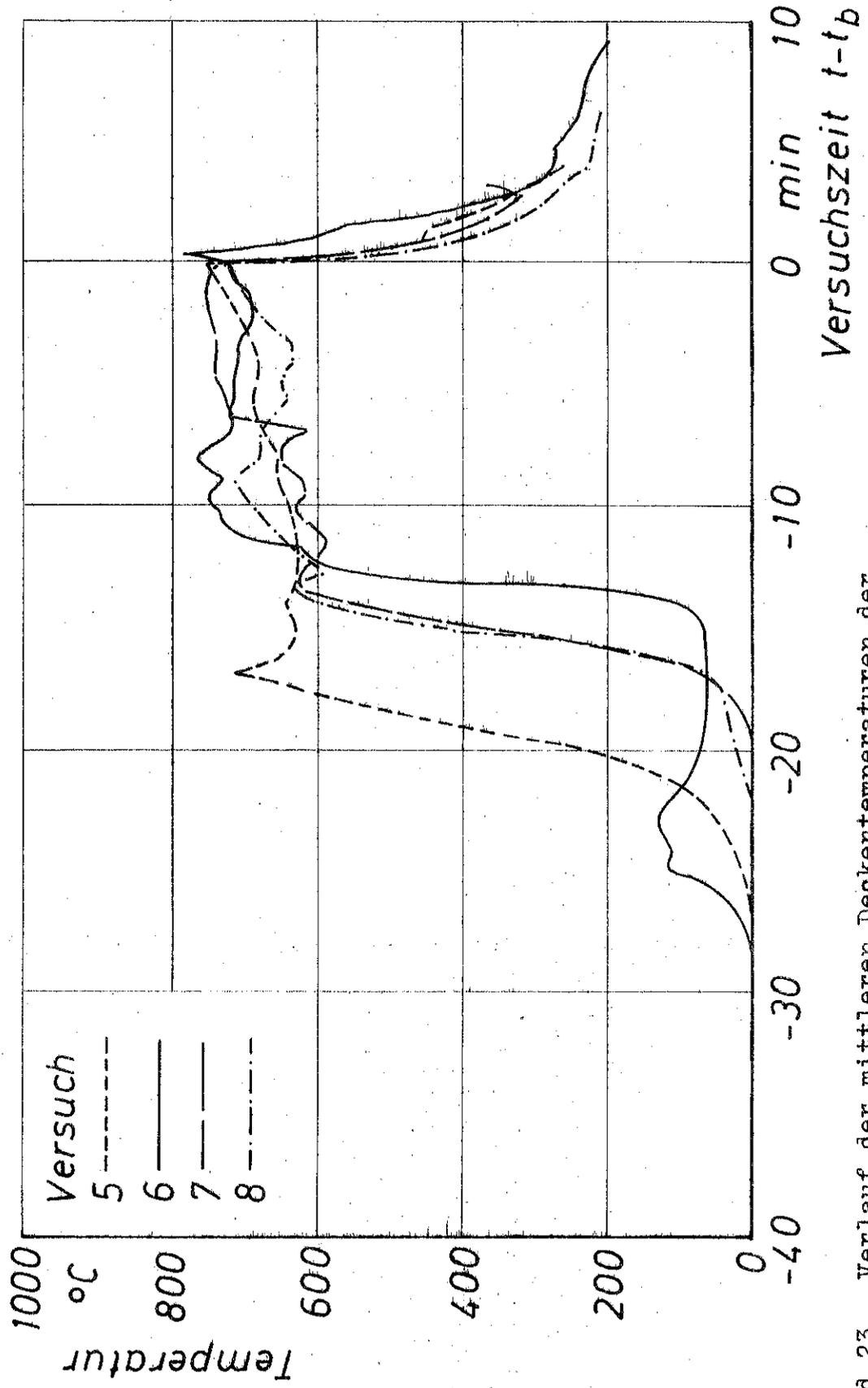


Bild 23. Verlauf der mittleren Deckentemperaturen der Versuche 5, 6, 7 und 8, aufgetragen über der Versuchszeit $t - t_b$

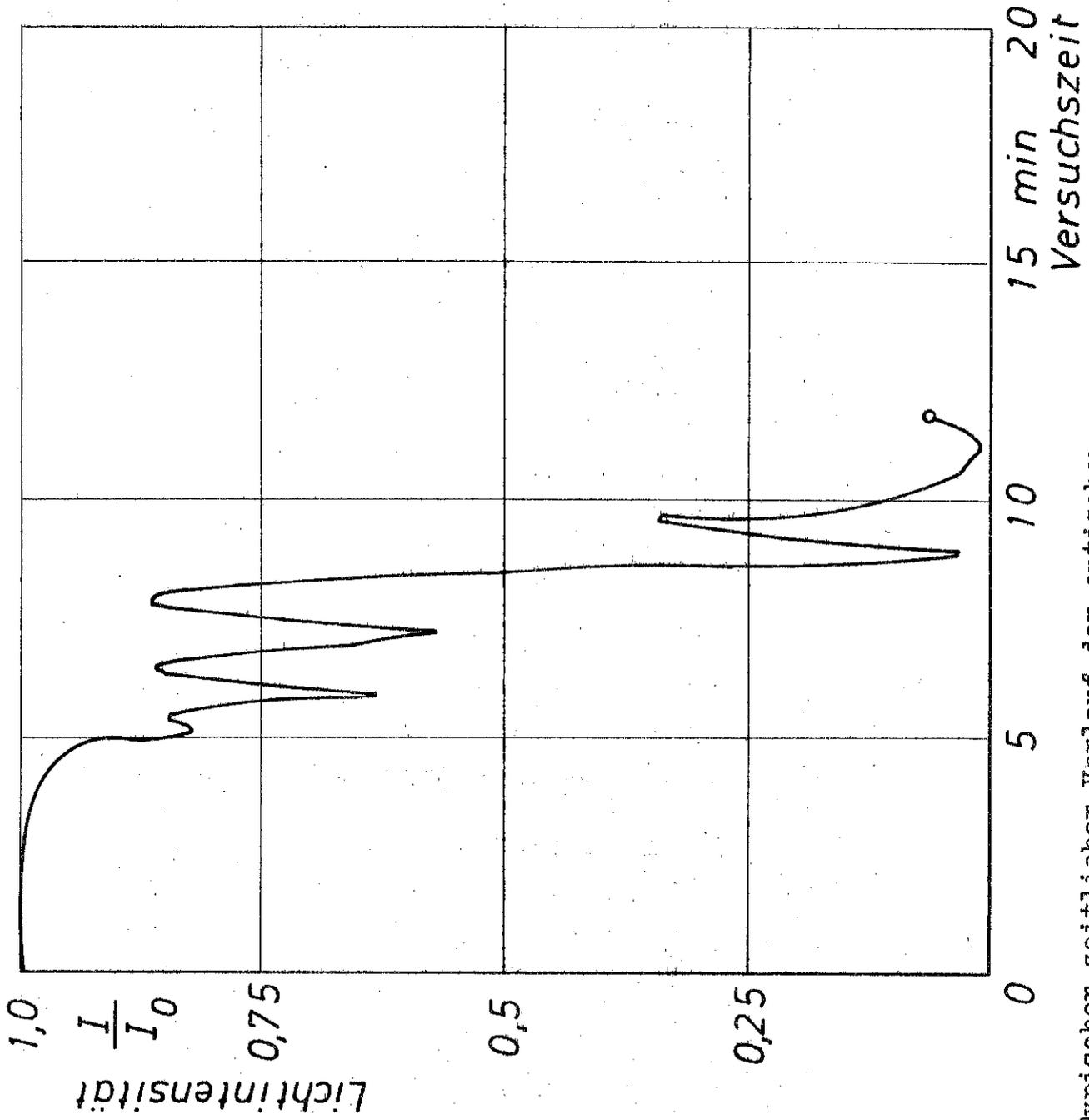


Bild 24. Typischer zeitlicher Verlauf der optischen Rauchdichte

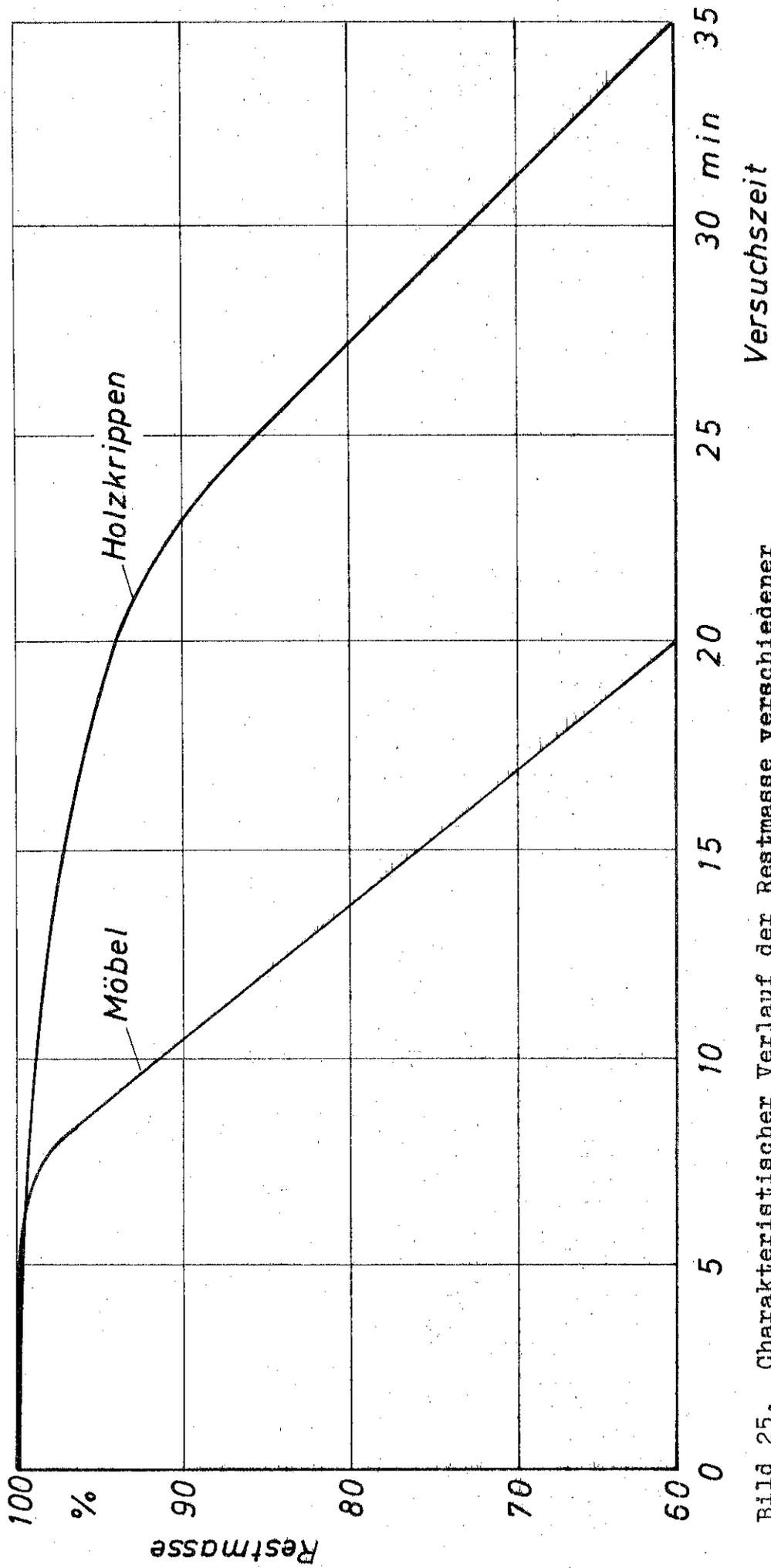


Bild 25. Charakteristischer Verlauf der Restmasse verschiedener Brandgüter bezogen auf die Anfangsmasse, aufgetragen über der Zeit

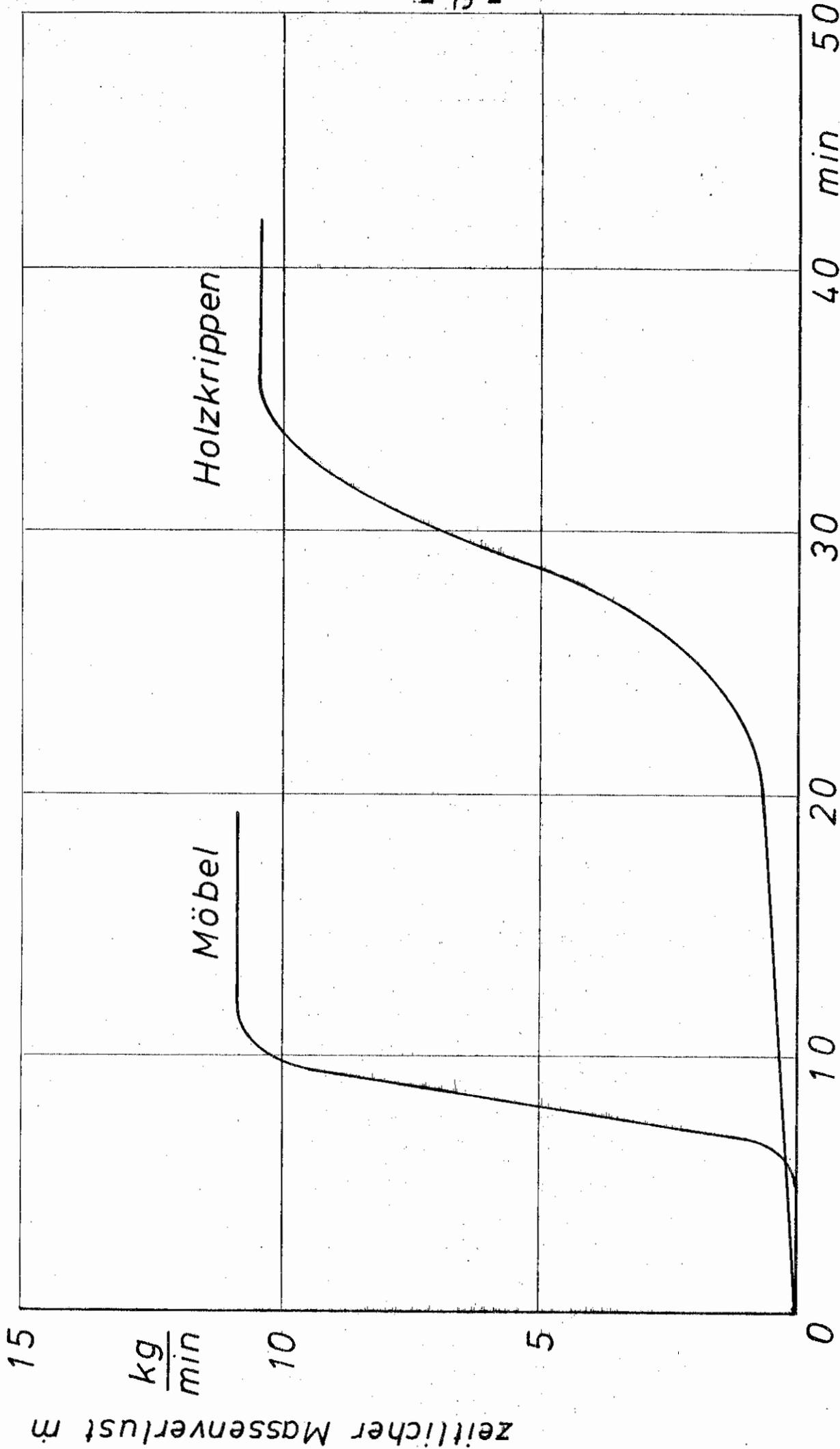


Bild 26. Verlauf des zeitlichen Massenverlustes für Holzrippen und Möbel als Brandstoffe

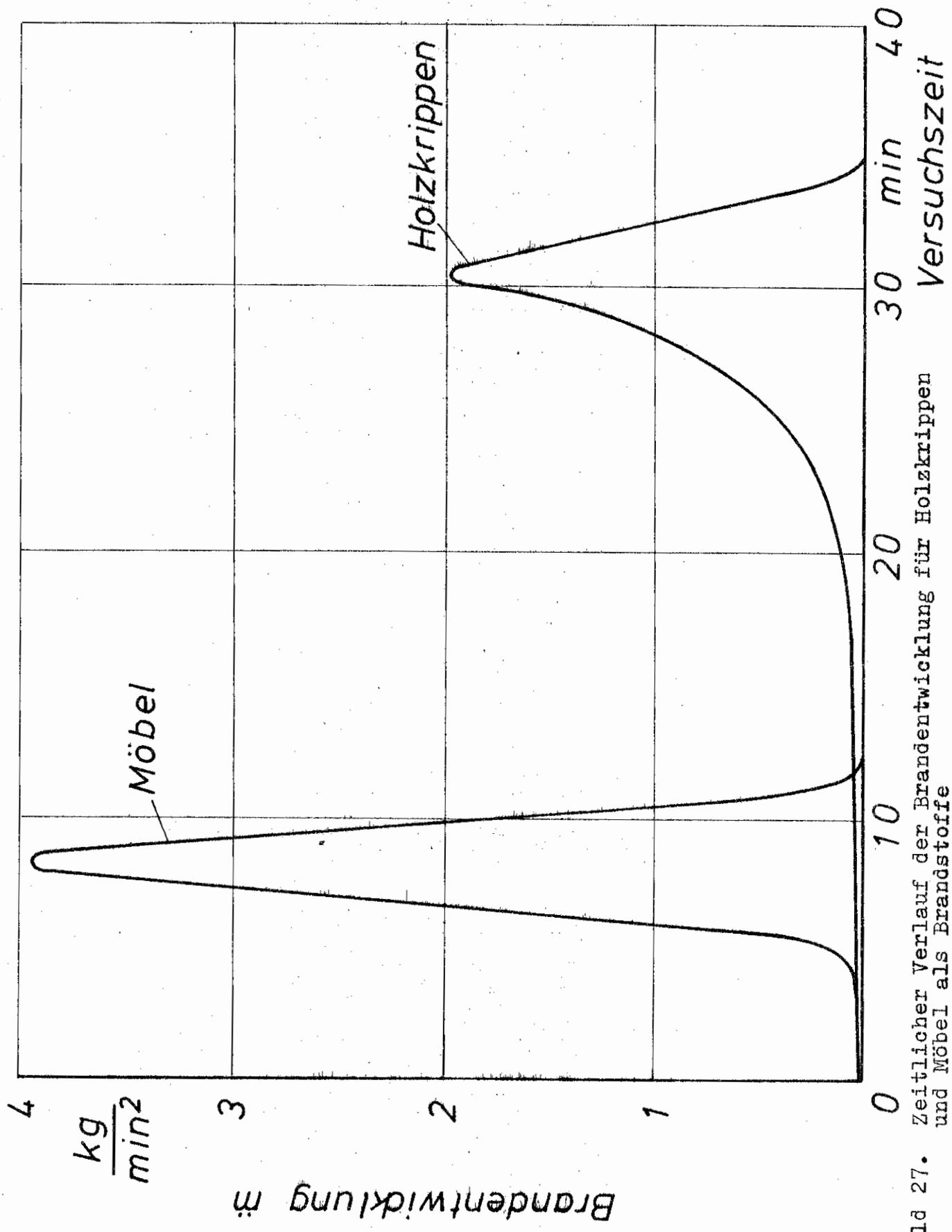


Bild 27. Zeitlicher Verlauf der Brandentwicklung für Holzrippen und Möbel als Brandstoffe

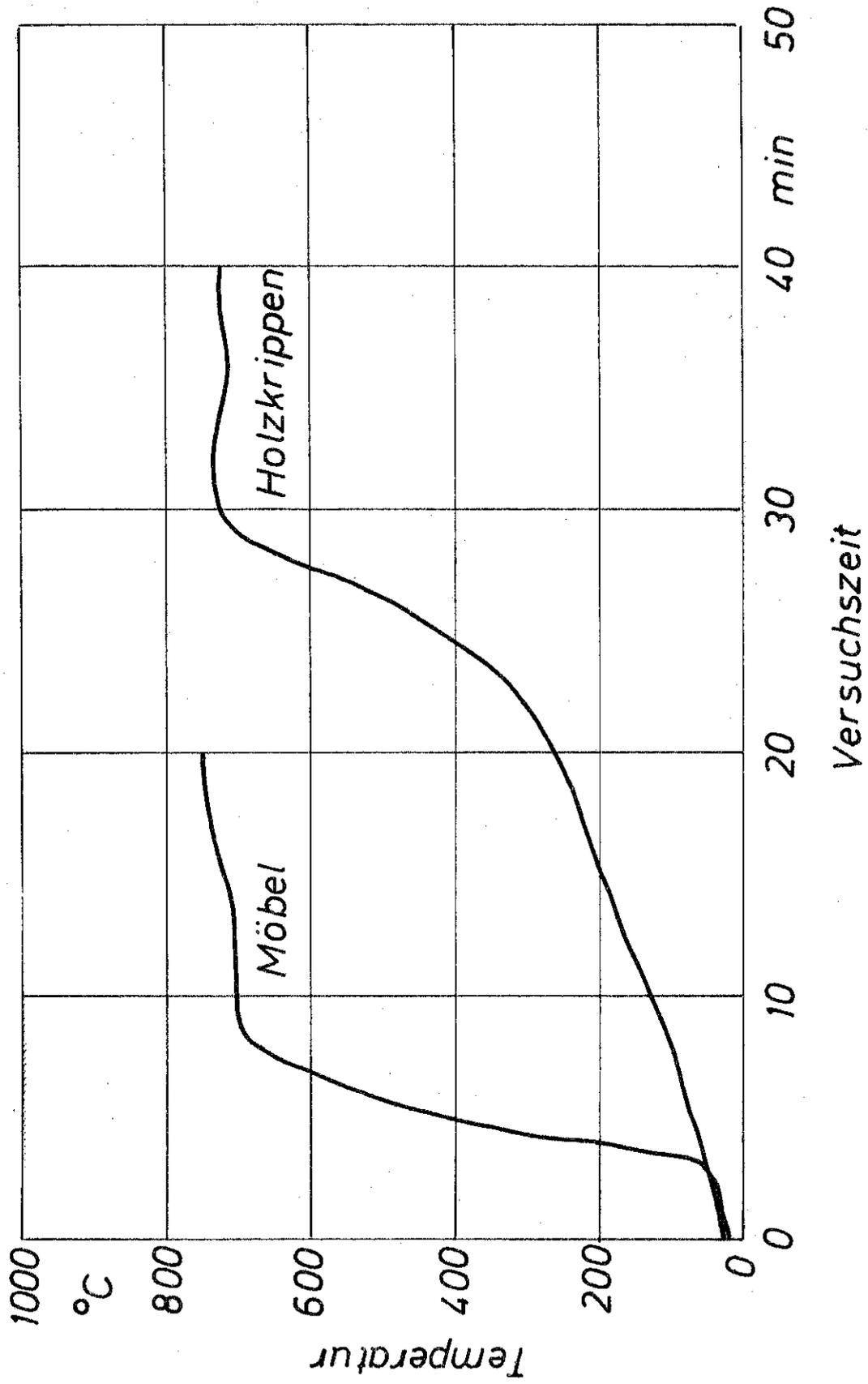


Bild 28. Typischer zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur für Holzkrippen und Möbel als Brandstoffe

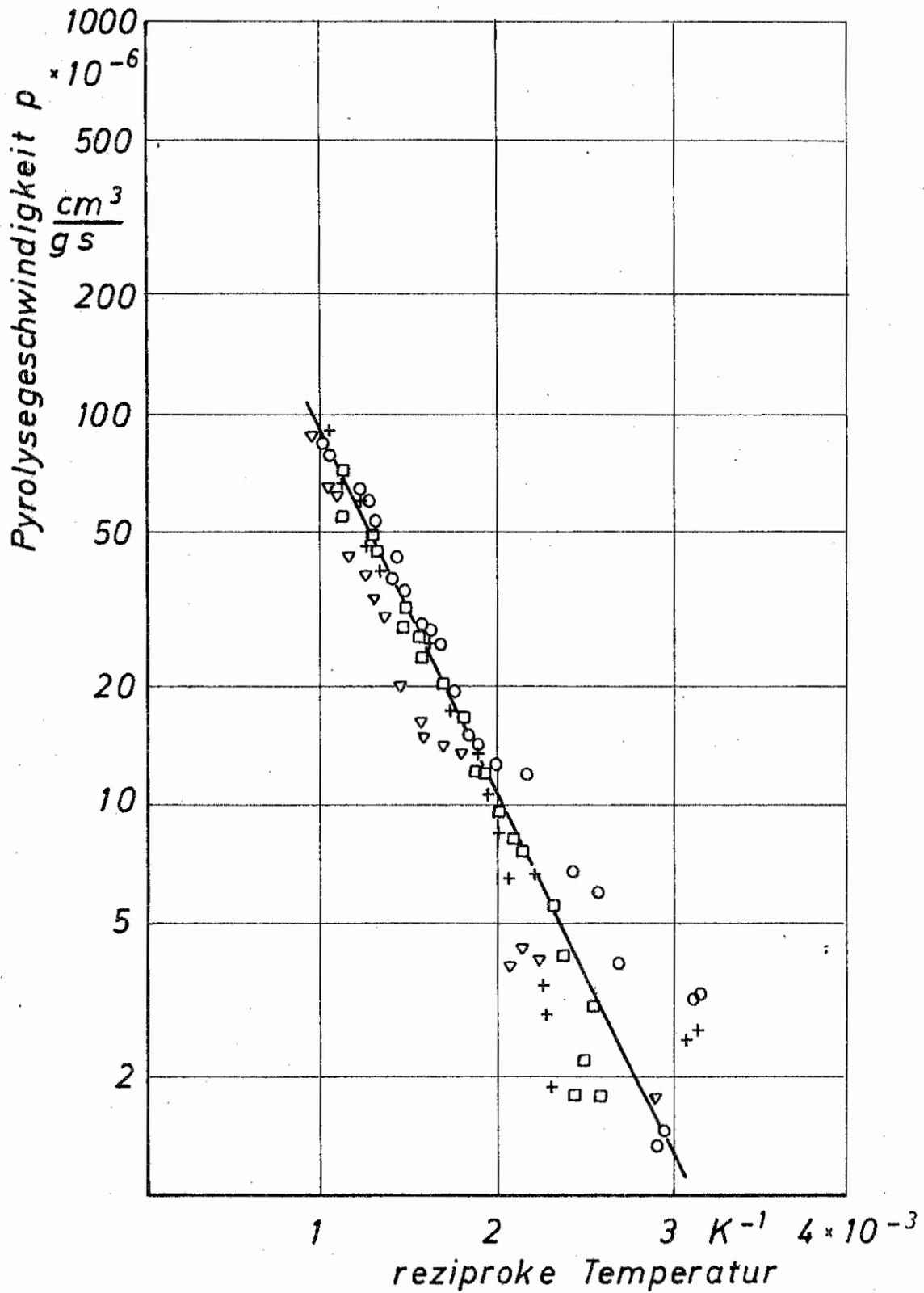


Bild 29. Pyrolysegeschwindigkeit für Holzkrippen als Brandstoff, aufgetragen über der reziproken Temperatur

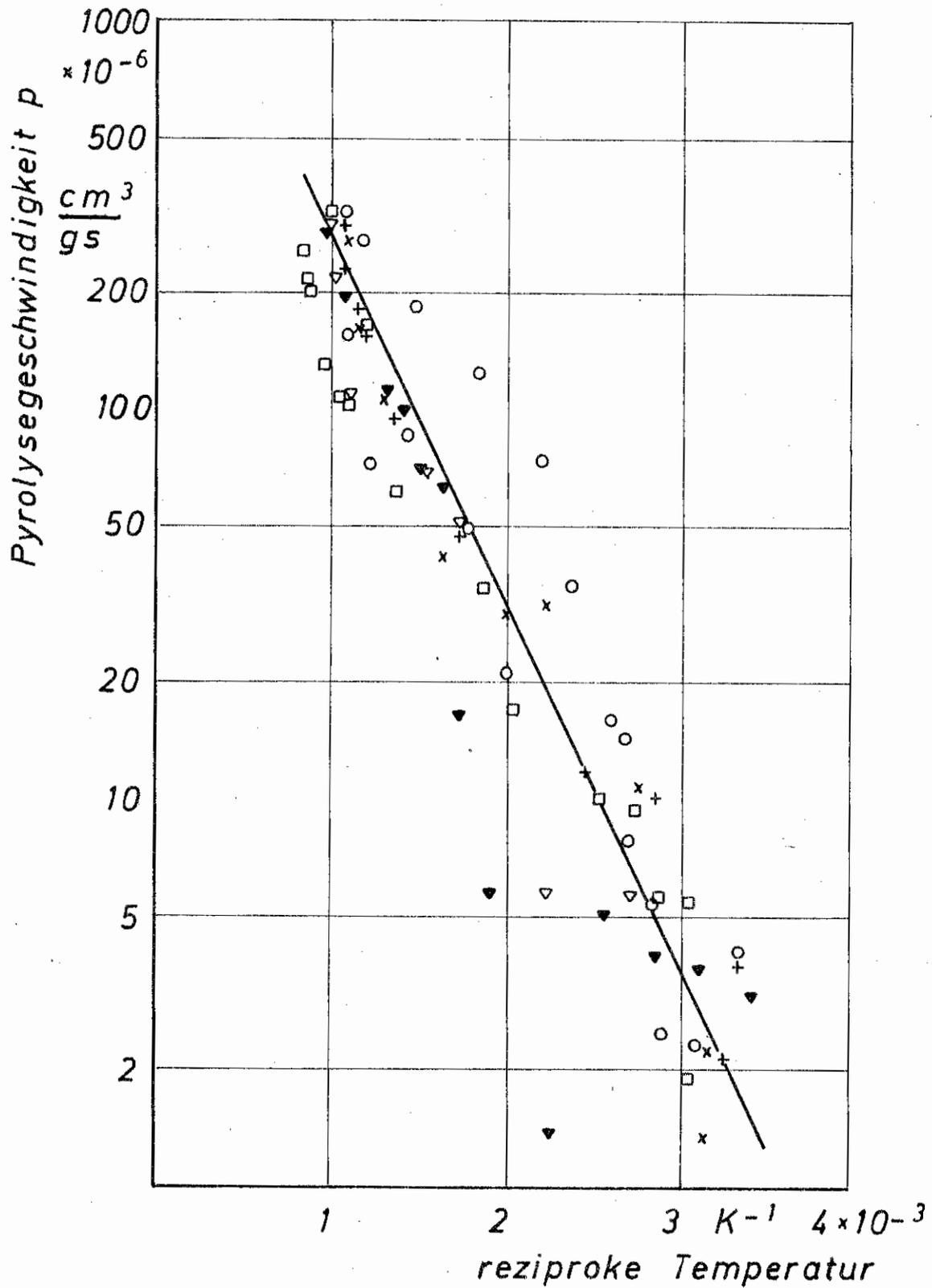


Bild 30. Pyrolysegeschwindigkeit für Möbel als Brandstoff, aufgetragen über der reziproken Temperatur

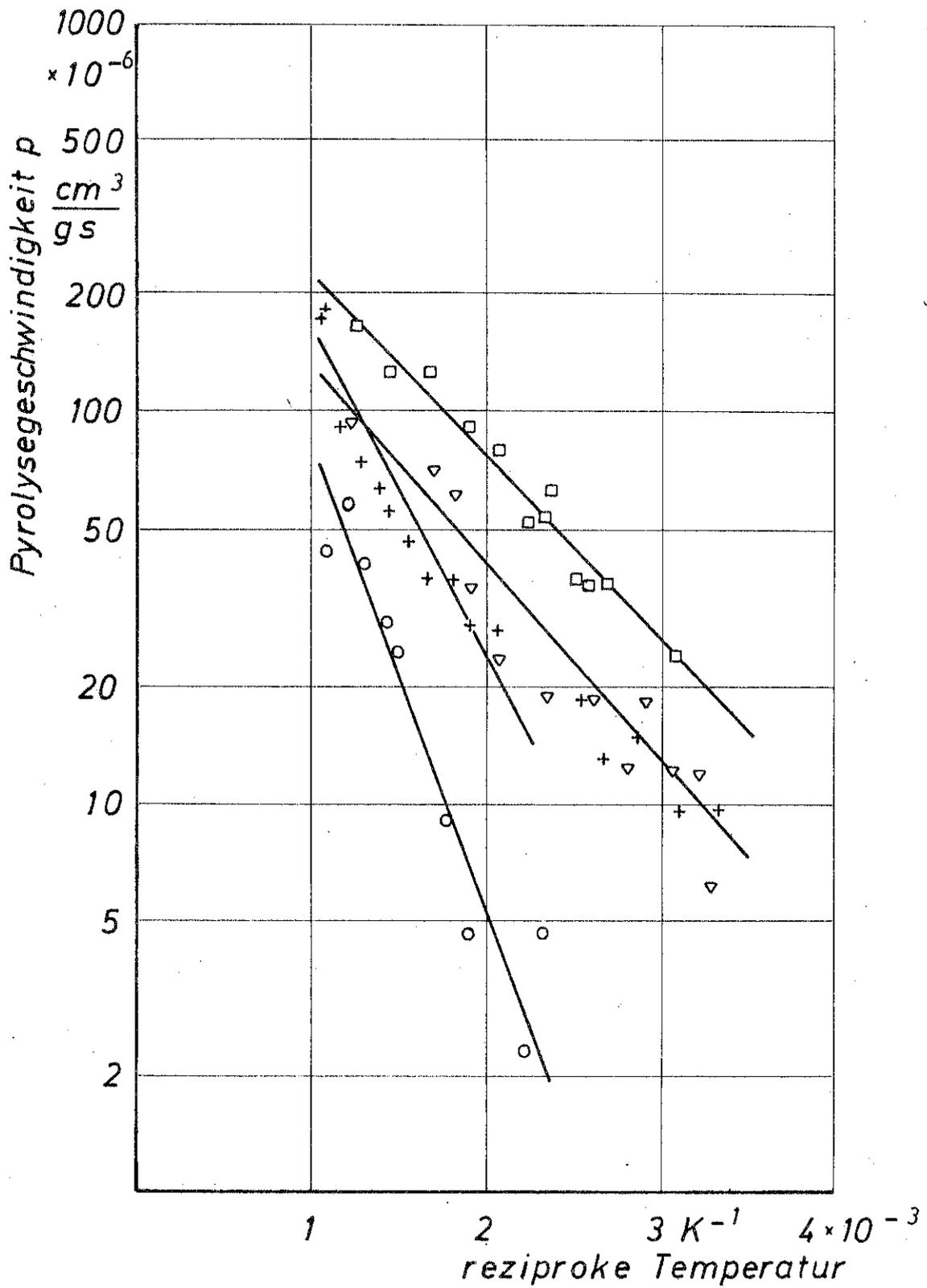


Bild 31. Pyrolysegeschwindigkeit für Holzkrippen als Brandstoff, ausgewertet aus Versuchen von [23], aufgetragen über der reziproken Temperatur

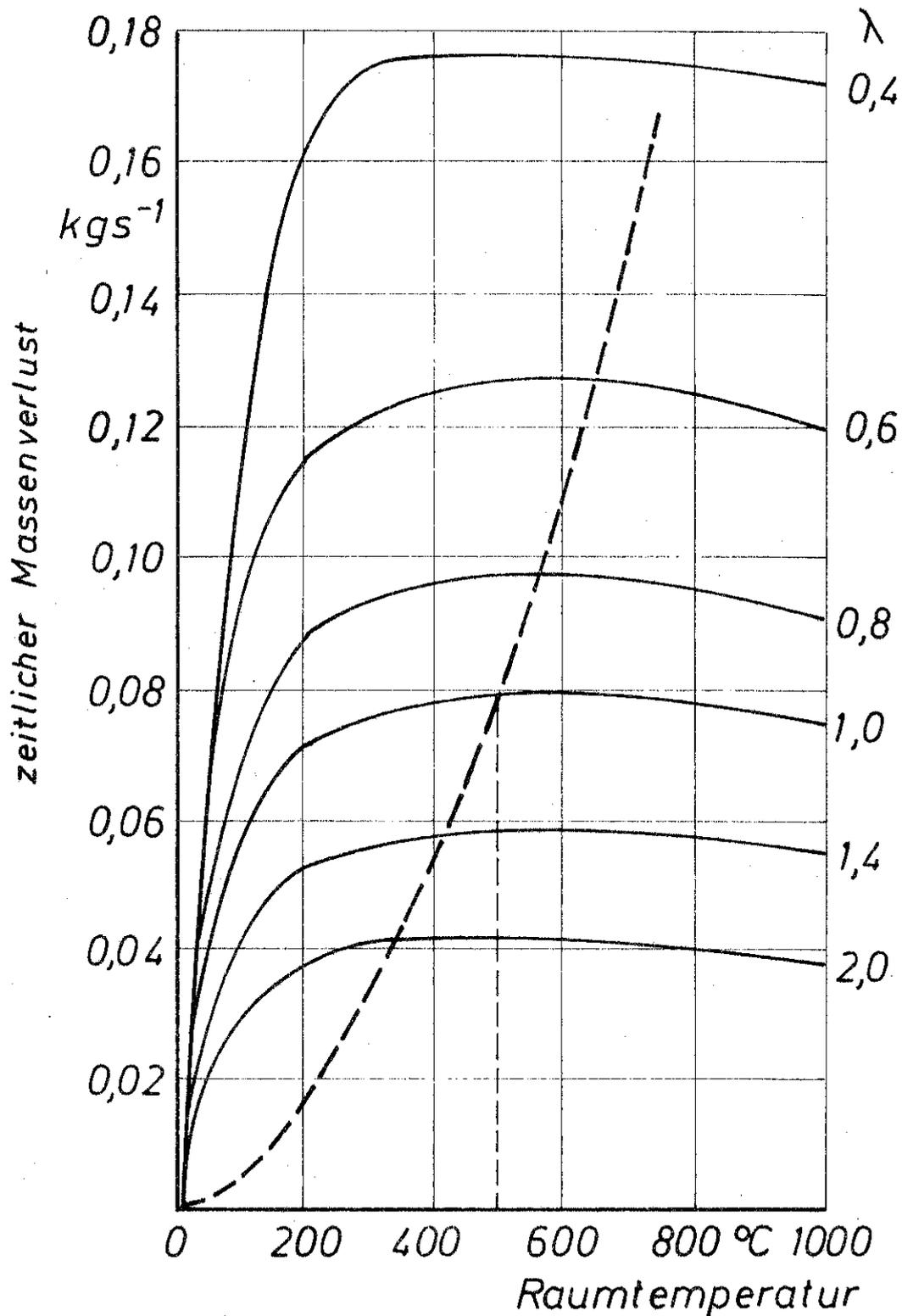


Bild 32. Verlauf des zeitlichen Massenverlustes in Abhängigkeit von der Luftzahl, aufgetragen über der Raumtemperatur