

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Untersuchung der Löschwirkung verschiedener
Löschmittel und Löschmethoden bei unter-
schiedlichen Brandgütern. Teil III

44

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

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

Forschungsbericht Nr.44

Untersuchung der Löschwirkung verschiedener
Löschmittel und Löschmethoden bei unter-
schiedlichen Brandgütern. Teil III

von
Dr.rer.nat. Peter Widmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Mai 1981

FA.Nr. 84 (3/79)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
3. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	6
4. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG	7
4.1. Darstellung der gemessenen Temperaturen	8
4.2. Darstellung der zeitlichen Massenverluste	10
4.3. Vergleich der Wärmeströme	11
4.4. Aufstellung der Wärmebilanz	13
5. ZUSAMMENFASSUNG	16
6. FORMELZEICHEN UND INDICES	18
7. LITERATURVERZEICHNIS	19
8. TABELLEN UND BILDER	20

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die Aufgabe, einen Brand möglichst schnell zu löschen und die durch überschüssiges Löschwasser entstehenden Schäden möglichst gering zu halten, führt zwangsläufig auf das Problem einer Abschätzung der erforderlichen Löschwassermenge. Die Bemühungen zur Lösung dieses Problems haben ihren Ausdruck in einer Reihe von experimentellen Untersuchungen über die Vorgänge beim Löschen eines Brandes und die wichtigsten Einflußgrößen gefunden. Im Verlauf dieser Untersuchungen hat sich, wohl aufgrund der Vielzahl der Parameter und der oft verwickelten Zusammenhänge, ein Trend zur Verkleinerung des Maßstabs und Vereinfachung der Versuchsbedingungen einerseits und zur Erweiterung und Verfeinerung der den Brand und seine Löschung simulierenden Rechenmodelle andererseits abgezeichnet.

So wurden die ursprünglichen Brandversuche mit Holzkrippen und Möbeln in natürlicher Größe durch Versuche mit kleinen Holzkrippen und mit einfachen Holzquadern ergänzt. Laborversuche und Modellrechnungen bieten die Möglichkeit, die Untersuchungen ohne allzu großen Aufwand auf eine Vielzahl von Parametern wie z.B. unterschiedliche Brandgüter, Löschmittel und Löschmethoden auszudehnen.

Der vorliegende Bericht - Teil III - setzt die Beschreibung einer Reihe von Untersuchungen /1,2/ fort, die an Brandgütern einer bestimmten Quaderform durchgeführt wurden, wofür eine Versuchseinrichtung aufgebaut, eine Datenerfassungsanlage beschafft und Programme zur Auswertung der Messungen und für Modellrechnungen entwickelt wurden.

Nachdem sich die Versuche auf Holz als Brandgut beschränkt hatten, wurden sie nun auf Plexiglas ausgedehnt. Dadurch ergab sich bei der Versuchsführung die Notwendigkeit zur Streckung und genaueren Bestimmung der Löschdauer, da sich bei den Vorversuchen mit Plexiglas gezeigt hatte, daß die effektive Beaufschlagungsdauer des Brandguts mit Löschmittel durch den zeitlichen Druckverlauf

in den Sprühdüsen wesentlich beeinflusst wurde. Die zwar sehr kurze, aber nicht verschwindende Leitungsstrecke zwischen Magnetventil und Düsenaustritt wirkt nämlich ausgleichend, indem sehr schnelle Druckschwankungen darin gemildert werden. Die so entstehenden Verzögerungen fallen natürlich bei kurzen Beaufschlagungsdauern besonders stark ins Gewicht.

Außerdem ergab sich für Plexiglas als Brandgut eine Abänderung der theoretischen Behandlung, da die im Rechenmodell für Holz gemachten Voraussetzungen über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit nur im Fall der pyrolytischen Zersetzung gelten, während Plexiglas unzersetzt schmilzt und verdampft. Infolge dieser Vereinfachung lag es nahe, das Rechenmodell in anderer Hinsicht zu erweitern und die Aufstellung einer Wärmebilanz, etwa nach dem Vorbild von Magee und Reitz /3/, zu versuchen.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Bei Verwendung von Plexiglas als Brandgut ergibt sich gegenüber Holz eine starke Vereinfachung der in das Rechenmodell eingehenden Voraussetzungen über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Denn wegen der beim Brand von Holz auftretenden Zersetzung war im Teil II /2/ dem linearen Ansatz für die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur eine Fallunterscheidung vorangestellt worden, aus der sich erst ergab, mit welchen Konstanten der lineare Ansatz zu verwenden war. Der Fallunterscheidung lag eine Einteilung des Brandguts in dreierlei Schichten zugrunde: außen eine bereits verkohlte Schicht, darunter eine Schicht, in der die Verkohlung schon begonnen hat, aber noch nicht beendet ist, und im Innern das noch unveränderte Material. Als Grenzen zwischen den drei Schichten waren die Temperaturen 200°C und 400°C angenommen worden, wobei noch die Irreversibilität der Zersetzung des Holzes beim Abkühlen berücksichtigt wurde.

Beim Brand von Plexiglas erübrigt sich eine solche Fallunterscheidung, da es beim Erwärmen ohne Zersetzung schmilzt und verdampft. Deshalb wird hier der folgende Ansatz für die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vorgeschlagen:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + A(T - T_0) .$$

Da eine wesentliche Temperaturabhängigkeit unterhalb des Schmelzpunkts nicht bekannt ist, verschwindet der zweite Term ($A=0$), und man erhält nach /4/ den Wert:

$$\lambda = 0,19 \text{ W/mK} .$$

Nach dieser Vereinfachung kann das für Holz entwickelte Rechenprogramm zur Bestimmung der Wärmestromdichte herangezogen werden. Hierbei wird aus den gemessenen Temperaturwerten unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialwerte die Wärmestromdichte als Funktion der Zeit und der Tiefe, d.h. der Entfernung von der Oberfläche des Brandguts berechnet. Durch Extrapolation auf die Tiefe $x = 0$ kann daraus der zeitliche Verlauf der Wärmestromdichte durch die Oberfläche des Brandguts bestimmt werden, was bei Holz näherungsweise durch Verwendung zweier benachbarter Temperaturen in Randnähe geschieht:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} . \quad (1)$$

Der Temperaturgradient in Randnähe wird durch Differenzbildung der gemessenen Temperaturen in $x = 0$ mm und $x = 3$ mm Tiefe angegeben. Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit wird die Mitteltemperatur an dieser Stelle eingesetzt:

$$\dot{q}_{Ob} = \dot{q}_{(x=0)} = \lambda(T_m) \frac{T(x=3) - T(x=0)}{\Delta x} \quad (2)$$

mit

$$T_m = \frac{1}{2} (T(x=0) + T(x=3)) . \quad (3)$$

Nimmt das Holz Wärme auf, so ist \dot{q}_{Ob} positiv, gibt das Holz Wärme ab, so ist \dot{q}_{Ob} negativ.

Diese Berechnung der Wärmestromdichte ins Holz hinein setzt voraus, daß sich die Lage der Oberfläche relativ zum Brandgut nicht ändert, d.h. daß sie ortsfest bleibt. Beim Holz ist diese Voraussetzung insofern erfüllt, als seine Oberfläche beim Abbrand zwar verkohlt wird, aber zunächst in ihrer ursprünglichen Lage erhalten bleibt.

Beim Plexiglas als Brandgut ist diese Voraussetzung nicht mehr erfüllt, da es durch die zugeführte Wärme abschmilzt und dann verdampft und verbrennt. Seine Oberfläche wandert also während des Brandes ins Innere hinein. Deshalb ist die Auswahl der zur Berechnung der Wärmestromdichte verwendeten Temperaturmeßstellen etwas problematisch. Die Meßstelle in $x = 0$ mm Tiefe gerät im Laufe des Brandes immer mehr in den Flammenraum und liefert die Flammentemperatur. Verwendet man aber die Temperaturmeßstellen in $x = 3$ mm und $x = 6$ mm Tiefe, so wird derjenige Teil des Wärmestroms nicht erfaßt, der zum Aufheizen, Schmelzen und Verdampfen der obersten Schicht dient. Entsprechendes gilt natürlich auch für die Löschphase.

Es empfiehlt sich deshalb, mit beiden Schichten zu rechnen und zu Beginn der Brandphase das mit Hilfe der ersten Schicht ($x = 0$ mm bis 3 mm) erhaltene Resultat zu bevorzugen, gegen Ende aber das mit Hilfe der zweiten Schicht ($x = 3$ mm bis 6 mm) erhaltene Resultat.

Stellt man dieser nur aus Stoffwerten und Temperaturmessungen berechneten Wärmestromdichte die Wärmezufuhr während des Brandes und den Wärmeentzug während des Löschens gegenüber, so erhält man nach dem Beispiel von Magee und Reitz /3/ folgende vereinfachte Energiebilanz für den eindimensionalen Wärmetransport durch die Brandgutoberfläche:

$$\dot{q}_{\text{Abbrand}} - \dot{q}_{\text{Löschung}} = \dot{q}_{\text{Erwärmung}} + \dot{q}_{\text{Verluste}} \quad (4)$$

Alle Einzelposten der Bilanz haben die Dimension einer Wärmestromdichte, d.h. W/m^2 .

Hierin ergibt sich die beim Brand insgesamt freigesetzte Wärmestromdichte

$$\dot{q}_{\text{Abbrand}} = \dot{m}_B \cdot H_B + \dot{m}_S \cdot H_S \quad (5)$$

aus den Massenverlusten und Heizwerten von Brandgut und Spiritus. Wenn die verbrannte Spiritusmenge bekannt ist, kann der Massenverlust des Brandgutes aus dem zeitlichen Verlauf der Gesamtmasse ermittelt werden.

Weiter ergibt sich die vom Löschwasser abgeführte Wärmestromdichte

$$\dot{q}_{\text{Löschung}} = \dot{m}_W \cdot (c_W \cdot \Delta T + r_W) \quad (6)$$

aus dem Löschwasserverbrauch ohne Berücksichtigung des überschüssigen Wassers und der zur Erwärmung von 20°C auf 100°C und vollständigen Verdampfung bei einem Druck von 1 bar nötigen Wärme, die insgesamt 2592 kJ/kg beträgt.

Die dem Brandgut zugeführte Wärme $\dot{q}_{\text{Erwärmung}}$ ist gerade die oben erwähnte Wärmestromdichte durch seine Oberfläche, wobei allerdings auch seine Schmelz- und Verdampfungswärme noch zu berücksichtigen sind.

Die durch Strahlung und Konvektion abgeführte Wärme $\dot{q}_{\text{Verluste}}$ ergibt sich aufgrund der Bilanz aus allen übrigen Posten und sollte niemals negativ werden, wenn man davon ausgeht, daß die Temperaturen der Umgebung und des Löschwassers gleich sind. Es ist zu erwarten, daß die Verluste durch Strahlung bei Holz, das mit stark leuchtender Flamme brennt, höher sind als bei Plexiglas, dessen Flamme nicht so stark leuchtet. Eine Aufteilung

der Verluste in die von Strahlung und Konvektion herrührenden Anteile erscheint mit den vorliegenden Mitteln nicht sinnvoll.

3. VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die hier beschriebenen Versuche wurden mit dem gleichen Versuchsaufbau und nach dem gleichen Verfahren wie die im Teil I und II /1,2/ beschriebenen Versuche durchgeführt. Vor allem wurden die Brandgutabmessungen und die Lage der Thermoelemente (Bild 1) genau eingehalten, um die schon vorhandenen Auswerteprogramme unverändert weiterverwenden zu können. Nur in einem Punkt mußte der Versuchsaufbau (Bild 2) durch eine Zusatzeinrichtung ergänzt werden.

Zum Löschen wurden zwei mit schnell auslösenden Magnetventilen geschaltete Düsen verwendet, die in ca. 250 mm Abstand auf beide Brettseiten sprühten. Die Aufgabezeiten, d.h. die Öffnungszeiten der Magnetventile, wurden mit Hilfe einer Zeitschaltuhr gesteuert. Es wurden zwei verschiedene Typen von Düsen mit Öffnungswinkeln von 40° und 45° und Durchflüssen von 0,6 ml/s und 2,7 ml/s verwendet. Die Durchflußmenge wurde bei konstantem Überdruck von 2 bar im Druckbehälter so ermittelt, daß nur der Anteil des Wasserstrahls gemessen wurde, der das Brett benetzte. Damit ist die angegebene Durchflußmenge gleich der Aufgabemenge an Löschwasser pro Zeiteinheit. Der Druck im Druckbehälter konnte mit Hilfe eines Druckreglers genau eingestellt und über einen Druckanzeiger kontrolliert werden. Um Verstopfungen zu vermeiden, wurden vorzugsweise die Düsen mit dem größeren Durchsatz verwendet. Hiermit ergab sich bei den Vorversuchen mit Plexiglas eine Druckbeaufschlagungsdauer von 0,1 s, welche eine Sprühdauer von ca. 2 s zur Folge hatte.

Nachdem es schon bei den Versuchen mit Holz wünschenswert erschienen war, ergab sich also bei den Versuchen mit Plexiglas die Notwendigkeit, die Löschdauer zu verlängern, um sie genauer bestimmen zu können. Hierzu mußte die Intensität der Wasser-

beaufschlagung um eine Größenordnung erniedrigt werden. Dies war aber durch eine entsprechende Verringerung des Wasserdurchsatzes der Sprühdüsen nicht zu bewerkstelligen, weil ihm wegen stark zunehmender Störanfälligkeit der Düsen nach unten hin Grenzen gesetzt sind.

Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurde der Wasserdurchsatz der Sprühdüsen unverändert gelassen, aber die effektive Dauer der Wasserbeaufschlagung des Brandgutes durch Verwendung eines sog. Choppers erniedrigt. Dieser Chopper (Bild 3) besteht aus zwei rotierenden, auf einer gemeinsamen Achse befestigten Kreisscheiben mit je zwei gegenüberliegenden segmentartigen Öffnungen und ist so zwischen Sprühdüse und Brandgut angeordnet, daß eine Wasserbeaufschlagung immer nur solange möglich ist, wie die Flugbahn des Wasserstrahls durch die Öffnungen freigegeben wird. Durch Verdrehen der beiden Kreisscheiben gegeneinander kann der Öffnungswinkel der Sektoren variiert werden.

Die Intensität der so erzielten Beaufschlagung richtet sich nach dem Öffnungswinkel der Sektoren. Im vorliegenden Fall betrug er stets 15° , sodaß die Beaufschlagungsintensität durch Verwendung des Choppers um den Faktor $180^\circ : 15^\circ = 12$ erniedrigt wurde. Dementsprechend sollte sich die Löschdauer dadurch in erster Näherung um denselben Faktor verlängern. Tatsächlich lagen bei Verwendung des Choppers alle Löschdauern im Bereich von 30 s, sodaß ihre hinreichend genaue Bestimmung und die rechtzeitige Beendigung der Wasserbeaufschlagung ohne weiteres möglich waren.

4. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG

Im Rahmen dieses Berichtes, Teil III, wurden 20 Versuche mit Plexiglas als Brandgut durchgeführt, bei 16 von ihnen wurde entsalztes Wasser als Löschmittel verwendet, bei den restlichen 4 Versuchen Wasser mit 20 Gew.-% Diammoniumphosphat $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Hinzu kamen 6 Vorversuche mit Plexiglas als Brandgut und entsalztem Wasser als Löschmittel, bei denen sich erst die Notwendigkeit herausstellte, einen Chopper zu bauen, um die Löschdauer

verlängern und genauer bestimmen zu können. Außerdem wurden noch 6 Versuche mit Holz als Brandgut und Wasser mit 5 Gew.-% Fluortensid als Löschmittel aus dem Berichtszeitraum von Teil II zu Vergleichszwecken herangezogen.

4.1. Darstellung der gemessenen Temperaturen

In den Bildern 4 bis 8 sind die an jeweils den gleichen Stellen gemessenen Temperaturen für je einen repräsentativen Vertreter der oben erwähnten Gruppen von Versuchen dargestellt. Bei Bild 4 und Bild 5 war das Brandgut Holz mit 110 ml Spiritus; der Abbrand bei Löschbeginn betrug ca. 20 %. Bei Bild 4 betrug die Löschdauer 4s und es wurden kleine Sprühdüsen mit 0,6 ml/s Durchsatz verwendet; bei Bild 5 waren es 12s und große Düsen mit 2,7 ml/s Durchsatz. Auf die Löschwassermengen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Bei den in den Bildern 6 bis 8 dargestellten Versuchen war das Brandgut jeweils Plexiglas mit 20 ml Spiritus; der Abbrand bei Löschbeginn betrug 20%. Bei Bild 6 betrug die Löschdauer ca. 2s, bei Bild 7 und Bild 8 aufgrund der Verwendung des Choppers je 30s; in allen drei Fällen wurden Düsen mit 2,7 ml/s Durchsatz verwendet. Lediglich bei Bild 8 wurde dem Löschwasser 20 Gew.-% Diammoniumphosphat zugesetzt.

Schon bei kurzer Betrachtung der Temperaturkurven fällt ein wesentlicher Unterschied zwischen Holz (Bild 4 und Bild 5) und Plexiglas (Bild 6 bis Bild 8) auf. Obwohl die Temperatur in der Oberfläche eine steigende Tendenz zeigt, bleibt sie doch während der gesamten Branddauer bis zum Löschbeginn bei Holz sehr deutlich unter der bei 500 bis 600 °C liegenden Temperatur in der Grenzschicht. Dagegen kreuzen sich bei Plexiglas die beiden Temperaturkurven noch vor Löschbeginn, der hier allerdings auch erst nach ca. 12 min Branddauer erfolgte, bei Holz aber schon nach ca. 6 min.

Zur Erklärung dieses Unterschiedes zwischen Holz und Plexiglas muß man vor allem die unterschiedliche Befestigungsart der Thermo-elemente berücksichtigen. Die vier Thermo-elemente einer Meßebene, deren Temperaturkurven mit Quadraten und Dreiecken bezeichnet sind, steckten fest in Löchern, so daß ihr Abstand von der ursprünglichen Oberfläche des Brandgutes jeweils 0 mm, 3 mm, 6 mm bzw. 9 mm betrug. Dagegen wurde das fünfte Thermo-element, dessen Temperaturkurve keine Bezeichnung trägt, federnd an die Oberfläche des Brandgutes angedrückt. Das hatte natürlich zur Folge, daß die vier ortsfesten Thermo-elemente ihre relative Lage zur Oberfläche änderten, wenn diese im Brandverlauf ins Brandgut hineinwanderte. Dagegen blieb das fünfte Thermo-element zwar nicht ortsfest, behielt aber seine relative Lage zur Brandgutoberfläche bei.

Der wesentliche Unterschied zwischen Holz und Plexiglas besteht nun darin, daß beim Plexiglas aufgrund seines Abschmelzens die Oberfläche in die Richtung des Inneren wandert, beim Holz, dessen Verkohlung zunächst nur eine Umwandlung bedeutet, aber nicht. Beim Plexiglas ist also die Geschwindigkeit, mit der sich seine beiden Oberflächen nähern, proportional zum Massenverlust. Eine Dichteänderung tritt höchstens in der dünnen Schmelzzone auf. Beim Holz dagegen kann man den durch die gegenseitige Annäherung seiner beiden Oberflächen entstehenden Volumenschwund gegenüber seinem zur Brandentwicklung proportionalen Massenschwund zunächst vernachlässigen. Durch die Zersetzung und Verkohlung wird die Dichte der betroffenen Schicht stark herabgesetzt, während ihre Oberfläche relativ lange ihre ursprüngliche Lage beibehält.

Aus diesem Sachverhalt ergibt sich beim Holz, daß das federnd angedrückte Thermo-element stets in der Flammenzone bleibt und eine entsprechend hohe Temperatur anzeigt, während die vier ortsfesten Thermo-elemente auch relativ zur Oberfläche unverändert bleiben und den erwarteten Temperaturverlauf zeigen, der durch eine mit der Tiefe zunehmende Verzögerung gekennzeichnet ist.

Beim Plexiglas dagegen wird das federnd angedrückte Thermo-
element in die Schmelzzone hineingedrückt, sodaß seine Tempe-
ratur nach Erreichen eines anfänglichen Maximums zwischen 400 °C
und 500 °C wieder etwas absinkt. Seine vier ortsfesten Thermo-
elemente ändern ihre relative Lage zur Oberfläche derart, daß
das ursprünglich in der Oberfläche sitzende, äußerste Thermo-
element allmählich in die Flammenzone hineinragt und deshalb
auch fast die gleiche Temperatur erreicht, die das federnd
angedrückte Thermoelement unmittelbar vor Schmelzbeginn hatte.
Im übrigen ist der Temperaturverlauf der ortsfesten Thermo-
elemente natürlich ebenfalls durch eine mit der Tiefe zu-
nehmende Verzögerung gekennzeichnet, sodaß bei den drei inneren
Thermoelementen kein charakteristischer Unterschied zwischen
Holz und Plexiglas auffällt.

4.2. Darstellung der zeitlichen Massenverluste

Um die verschiedenen Versuche miteinander vergleichen zu können,
sind die zeitlichen Massenverluste in Bild 9 dargestellt, wobei die
Versuchsnummer jeweils an der entsprechenden Kurve eingetragen ist.
Allen Kurven gemeinsam ist ein auf die allmähliche Brandent-
wicklung folgender Abschnitt konstanter Steigung, die in etwa
stets denselben Wert hat. Diese Phase mit fast konstantem Ab-
brand wird nach Erreichen des vorgegebenen Massenverlustes durch
den Löschbeginn beendet. Während sich nun aber beim Plexiglas
(obere Kurven; die Brandgutmasse betrug ca. 820 g) ziemlich schnell
der Endwert einstellt, ergibt sich beim Holz (untere Kurven; die
Brandgutmasse betrug ca. 310 g) eine etwas langsamere Annäherung
an den Endwert.

Dieses unterschiedliche Verhalten erklärt sich zum einen dadurch,
daß die Zersetzung des Holzes bei Temperaturen oberhalb 100 °C
vor sich geht und deshalb durch das Löschen nicht sofort beendet
wird. Zum anderen kann die zerklüftete Holzkohle überschüssiges
Löschwasser aufnehmen, das anschließend verdampft. Besonders deut-
lich zeigt dies der Versuch Nr.5, bei dem sehr viel überschüssiges
Löschwasser verwendet wurde.

4.3. Vergleich der Wärmeströme

Wie schon im 2. Abschnitt erwähnt, gehen in die Berechnung der Wärmeströme nur die gemessenen Temperaturwerte und die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit ein. Wenn man also die Berechtigung des im Teil I und II /1,2/ für Holz abgeleiteten und des im 2. Abschnittes für Plexiglas vorgeschlagenen Ansatzes für die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit einmal unterstellt, dann sollten die in den Bildern 10 bis 14 dargestellten Wärmestromdichten vor allem einen noch eingehenderen Vergleich der verschiedenen Versuche ermöglichen. Dieser Vergleich soll im folgenden durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, daß in den Bildern 12 bis 14 die Wärmestromdichte zu Beginn der Brandphase eher durch die Kurve 1 dargestellt, aber gegen Ende besser durch die Kurve 2 angenähert wird.

Abgesehen von der wesentlich langsameren Brandentwicklung und der demzufolge verdoppelten Branddauer zeigt Plexiglas vor dem Löschbeginn einen völlig anderen Verlauf der Wärmestromdichte als Holz. Denn während der Phase konstanten Abbrandes bleibt auch seine Wärmestromdichte nahezu konstant, während bei Holz eine sehr starke Abnahme festzustellen ist. Dieser Befund ist sicher nicht davon abhängig, mit welcher Genauigkeit die beiden erwähnten Ansätze der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur erfüllt sind, aber er zeigt, daß die beiden Ansätze im Prinzip richtig sind, weil sie den Sachverhalt, daß Holz im Gegensatz zu Plexiglas eine Zersetzung erleidet, wodurch seine Wärmeleitfähigkeit fortwährend erniedrigt wird, richtig wiedergeben.

Ab Löschbeginn ist ein Vergleich der Wärmeströme aufgrund des vorhandenen Materials kaum möglich, weil für Plexiglas keine der beiden Kurven die Wärmestromdichte richtig wiedergibt. Die Kurve 1 dürfte bis zum Löschbeginn den zeitlichen Verlauf der Wärmestromdichte in groben Zügen richtig wiedergeben, ist aber sicher etwas übertrieben, da eines der verwendeten Thermoelemente in die Flammenzone hineinragt und deshalb auch vom Löschmittel

umspült wird. Andererseits bewirkt die zunehmende Tiefe der übrigen Thermolemente eine entsprechende Trägheit der Temperaturanzeige, sodaß die zweite Kurve den Verlauf der Wärmestromdichte zu sehr glättet.

Will man trotzdem unter allen Vorbehalten einen Vergleich versuchen, so empfiehlt sich eine mehr integrale Betrachtungsweise, d.h. es sollten nicht die Momentanwerte der Wärmestromdichte, sondern ihre zeitlichen Mittelwerte über konstante Zeitintervalle betrachtet werden. Dann läßt sich feststellen, daß nach dem Löschen aus dem Holz ein stärkerer Wärmestrom austritt als auch dem Plexiglas. Dies dürfte zum Teil an der Wasserdurchlässigkeit der zerklüfteten Holzkohleschicht liegen. Der Entzug dieses Wassers durch Verdampfen würde den Befund erklären, daß der Wärmestrom aus dem Holz allmählich abklingt, während der Wärmestrom aus dem Plexiglas relativ schnell einen konstanten Wert erreicht. Damit wird auch der Unterschied zwischen Bild 10 und Bild 11 verständlich, denn die betreffenden Versuche Nr.3 und Nr.5 unterscheiden sich vor allem durch die verwendeten Löschwassermengen. Offensichtlich bewirkt die gegenüber Versuch 3 sehr viel größere Löschwassermenge ein wesentlich langsames Abklingen der Wärmestromdichte bei Versuch 5.

Vergleicht man die Wärmestromdichten für Plexiglas ab Löscheinbruch anhand der Kurven 1 in den Bildern 12 bis 14 miteinander, so findet man zunächst, daß sich die Löschdauer in der Breite des Minimums ausdrückt. Das gilt vor allem für den Vergleich von Bild 12 und Bild 13, wo durch den Einsatz des Choppers sowohl die Löschdauer als auch die Breite des Minimums der Wärmestromdichte ungefähr um den Faktor 12 erhöht wird.

Der Vergleich der Wärmestromdichten nach Löscheinbruch zwischen Bild 13 und 14 liefert auffällige Unterschiede, die bei der Gleichheit aller übrigen Versuchsparameter auf der Zugabe von 20 Gew.-% Diammoniumphosphat zum Löschwasser beruhen dürften. Aufgrund der bekannten Wirkungsweise des verwendeten Löschmittels

bietet sich hier folgende Erklärung an, für die das Auftreten des breiten, ausgefransten Minimums kein störender Nebeneffekt, sondern absolut zwangsläufig ist. Zum besseren Verständnis der Erklärung empfiehlt sich ein genauer Vergleich der Minima in Bild 13 und Bild 14.

Durch die Salzzugabe wird der Brand an der Oberfläche des Plexiglasses um einige Zeit früher erstickt, als er allein durch die vom Löschwasser hervorgerufene Abkühlung erlöschen würde. Diese Erstickung des Brandes ist jedoch nicht von langer Dauer, da aus der oberflächennahen Schicht soviel Wärme an die Oberfläche gelangt, daß die Zündtemperatur wieder überschritten wird. Dieses abwechselnde Erlöschen und Wiederaufflackern des Brandes ist auch von Großversuchen mit Glutnestern her bekannt. Im vorliegenden Fall verläuft es natürlich schneller, aber in beiden Fällen ist zu beachten, daß es sich um einzelne, kleinere Bereiche handelt, sodaß die durch die Brandgase vermittelte Durchschnittstemperatur der Oberfläche keine Vorzeichenumkehr der Wärmestromdichte bewirkt.

Das Auftreten solcher Glutnester wurde von Magee und Reitz /3/ auch bei Verwendung von reinem Wasser als Löschmittel beobachtet und zwar besonders bei Annäherung an die kritische Wasserbeaufschlagungsrate, d.h. bei Vermeidung überflüssigen Löschwassers. Zum Vergleich mit dem vorliegenden Fall ist aber die abgeänderte Versuchsführung zu berücksichtigen. Magee und Reitz hielten nämlich einen von Temperaturstrahlern ausgehenden Wärmestrom auf die Brandgutoberfläche auch während der Löschphase aufrecht.

4.4. Aufstellung der Wärmebilanz

Die im 2. Abschnitt eingeführte und erläuterte Wärmebilanz

$$\dot{q}_{\text{Abbrand}} - \dot{q}_{\text{Löschung}} = \dot{q}_{\text{Erwärmung}} + \dot{q}_{\text{Verluste}} \quad (4)$$

muß nach dem 1.Hauptsatz der Wärmelehre in jedem Augenblick

erfüllt sein. Deshalb kann man sie zur Kontrolle dafür verwenden, ob alle Energieanteile richtig erfaßt wurden. Im vorliegenden Fall ist dies jedoch nicht möglich, da der vierte Anteil, $\dot{q}_{\text{Verluste}}$, nicht mitgemessen wurde, so daß lediglich die Möglichkeit besteht, ihn mit Hilfe der Wärmebilanz abzuschätzen, was nachfolgend versucht wird. Für spätere Untersuchungen dieser Art an anderen Brandgütern und mit anderen Löschmitteln dürfte sich die Erfassung des vierten Anteils, $\dot{q}_{\text{Verluste}}$, jedoch empfehlen und zwar getrennt in die von Strahlung und von Konvektion herrührenden Wärmeverluste. Zur Abschätzung des zeitlichen Verlaufes der Wärmeverluste ist also von der berechneten Wärmestromdichte auszugehen und vor Löschbeginn die aus dem Abbrand zu ermittelnde Wärmezufuhr und während des Löschens die vom Löschwasser entzogene Wärme zu berücksichtigen.

Mit dem vorhandenen Datenmaterial läßt sich die Abschätzung der Wärmeverluste allerdings nur für die Brandphase mit konstantem Massenverlust des Brandgutes durchführen. Für diesen Zeitraum, der vom Löschbeginn beendet wird, kann man mit Hilfe des Bildes 9 und der Tabellen 1 und 2 die zur Berechnung von \dot{q}_{Abbrand} nach Gleichung (5) nötigen Werte bestimmen. Wie man aus Bild 9 entnimmt, beträgt die Phase konstanten Abbrandes für Holz ca. 4 min und für Plexiglas ca. 8 min, während die für den Spiritusabbrand maßgebliche Branddauer für Holz nach /2/ ca. 5 min beträgt. Die wesentlich kleinere Menge von 20 ml Spiritus beim Plexiglas dürfte bereits ca. 1 min nach Brandbeginn verbrannt sein. Da die Spiritusmenge von 110 ml bei Holz experimentell so bestimmt wurde, daß sie kurz vor Löschbeginn gerade verbrannt war, soll für die hier anstehende Abschätzung die etwas grobe Annahme gemacht werden, daß der Spiritus gleichmäßig verbrennt. Dagegen wird beim Plexiglas vorausgesetzt, daß der Spiritus schon vor Beginn der Phase konstanten Abbrandes verbrannt war.

Mit den Werten:

H_{Holz}	=	17 MJ/kg
$H_{\text{Plexiglas}}$	=	29 MJ/kg
H_{Spiritus}	=	25 MJ/kg

ergibt sich dann:

\dot{q}_{Abbrand}	=	230 kW/m ² für Holz
\dot{q}_{Abbrand}	=	177 kW/m ² für Plexiglas.

Demgegenüber entnimmt man aus den Bildern 10 bis 14 unmittelbar vor Löschbeginn eine fast einheitliche Wärmestromdichte:

$$\dot{q}_{\text{Erwärmung}} = 4 \text{ kW/m}^2 \text{ für Holz und für Plexiglas.}$$

Hierbei wurde für Plexiglas der konstante Bereich der oberen Kurve extrapoliert. Nach Gleichung (4) ergeben sich dann die Verluste:

$$\dot{q}_{\text{Verluste}} = 226 \text{ kW/m}^2 \text{ für Holz}$$

$$\dot{q}_{\text{Verluste}} = 173 \text{ kW/m}^2 \text{ für Plexiglas.}$$

Tatsächlich ist $\dot{q}_{\text{Verluste}}$ für Holz zu Beginn der Phase konstanten Abbrandes um ca. 4 kW/m^2 niedriger als unmittelbar vor Löschbeginn, während für Plexiglas eine zeitliche Konstanz von $\dot{q}_{\text{Verluste}}$ angenommen werden darf. Das Verhältnis der vom Brandgut aufgenommenen Wärme zur insgesamt erzeugten Wärme stimmt in etwa mit Angaben nach Purl /5/ überein.

Von allergrößtem Interesse wäre natürlich die Abschätzung der Wärmeverluste während der Löschphase. Leider ist sie mit dem vorhandenen Datenmaterial auch nicht annähernd möglich. Der einzige Posten, der in einer solchen Bilanz als konstant vorausgesetzt werden könnte, ist die Löschmittelbeaufschlagung, aber selbst diese Konstanz ergibt wegen der instationären Temperaturen keinen konstanten Beitrag $\dot{q}_{\text{Löschung}}$. Auch über den zeitlichen Verlauf der zugeführten Wärme \dot{q}_{Abbrand} während der Löschphase lassen sich beim derzeitigen Kenntnisstand nur Mutmaßungen anstellen. Z.B. ist der Ansatz einer linearen Abnahme vom Löschbeginn bis zu dem Zeitpunkt der Richtungsumkehr des Wärmestromes durch die Brandgutoberfläche denkbar, d.h. grob gesagt, während der ersten Hälfte der Löschphase.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der bis jetzt noch unbefriedigenden Bestimmung der Wärmestromdichte ins Plexiglas, die dadurch hervorgerufen wird, daß einerseits die Oberfläche sich laufend verschiebt, während andererseits die Thermoelemente mit einer Ausnahme ortsfest bleiben. Hier könnte man zu einem genaueren Ergebnis kommen, indem man zu den in diskreten Punkten

(0, 3, 6, 9 mm Tiefe) gemessenen Temperaturen Ausgleichspolynome berechnet. Diese Ortskurven der Temperatur könnte man dann in jedem Augenblick mit der jeweils tatsächlichen Lage der Oberfläche schneiden und so den Wärmestrom durch sie ermitteln.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand des vorliegenden Berichts war die Ausdehnung der früher an Holz durchgeführten Untersuchungen der Löschwirkung verschiedener Löschmittel und Löschmethoden bei unterschiedlichen Brandgütern auf Plexiglas als Brandgut. Die Untersuchungen wurden mit dem gleichen Versuchsaufbau und nach dem gleichen Verfahren wie die vorangegangenen durchgeführt, um Vergleiche zu ermöglichen. Allerdings mußte der Versuchsaufbau durch sogenannte Chopper ergänzt werden, um die Löschdauer auszudehnen und das Löschende genauer festlegen zu können. Bei der Auswertung war die völlig andere Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen. Außerdem war das unterschiedliche Brandverhalten der beiden Brandgüter für die Berechnung der Wärmestromdichte durch die Brandgutoberfläche insofern von Bedeutung, als diese bei Holz nahezu ortsfest bleibt, bei Plexiglas aber ständig vorrückt.

Der Vergleich der Wärmestromdichten durch die Brandgutoberfläche liefert für die dem Löschbeginn vorangehende Phase konstanten Abbrandes einen wesentlichen Unterschied zwischen Plexiglas und Holz. Einer weitgehenden zeitlichen Konstanz des Wärmestromes ins Plexiglas steht ein sehr starker Abfall bei Holz gegenüber. Im Plexiglas herrscht also während dieser Phase ein völlig stationärer Zustand, wenn man sich auf ein Koordinatensystem bezieht, das mit der Oberfläche zusammen gleichförmig nach innen vorrückt. Dagegen bleibt die Oberfläche des Holzes praktisch ortsfest und mit dem Abbrand ist lediglich ein Massenverlust bei praktisch konstantem Volumen verbunden. Mit dem so entstehenden Rückgang der Dichte ist eine fortwährende Erniedrigung der Wärmeleitfähigkeit verbunden, wodurch auch die Wärmestromdichte abnimmt.

Der Vergleich der Wärmestromdichten durch die Brandgutoberfläche zeigt für die Löschphase beim Plexiglas einen Einfluß des Löschmittels. Durch Zugabe von 20 Gew.-% Diammoniumphosphat zum Löschwasser wird der Brand zwar etwas schneller als bei Löschung mit reinem Wasser unterdrückt, flammt aber vereinzelt wieder auf, da in den sogenannten Glutnestern die Wärmeabfuhr zunächst noch nicht ausreicht, um ein Erreichen der Entzündungstemperatur durch Wärmezufuhr aus dem Innern zu verhindern.

Abschließend werden Verbesserungen für weitergehende Untersuchungen empfohlen, um die hier versuchte Aufstellung einer Wärmebilanz zu erreichen. Zum einen sollten die Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung bei zukünftigen Versuchen mitgemessen werden. Zum andern empfiehlt sich eine genauere Analyse des Temperaturfeldes mit Hilfe von angepaßten Ortskurven, um so zu einer korrekten Berechnung der Wärmestromdichte durch die zeitlich veränderliche Oberfläche des Brandgutes zu gelangen.

6. FORMELZEICHEN UND INDICES

A	Konstante
c	spezifische Wärme
H	Heizwert
\dot{m}	Massenverlust
\dot{q}	Wärmestromdichte
r	Verdampfungswärme
T	Temperatur
t	Zeit
x	Ortskoordinate
Δ	Differenz
∂	Differential
λ	Wärmeleitfähigkeit

INDICES

i	Zählindex, Ortsindex
m	gemittelt
B	Brandgut
Ob	Oberfläche
S	Spiritus
W	Wasser

7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Fuchs, P.:
Untersuchung der Löschwirkung
verschiedener Löschmittel und
Löschmethoden bei unterschied-
lichen Brandgütern.
Forschungsbericht Nr. 36 der
Arbeitsgemeinschaft der Innen-
ministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß
"Feuerwehrangelegenheiten", 1979
- /2/ Fuchs, P.:
Untersuchung der Löschwirkung
verschiedener Löschmittel und
Löschmethoden bei unterschied-
lichen Brandgütern. Teil II.
Forschungsbericht Nr. 41 der
Arbeitsgemeinschaft der Innen-
ministerien der Bundesländer,
Arbeitskreis V - Unterausschuß
"Feuerwehrangelegenheiten", 1980
- /3/ Magee, R.S. and
Reitz, R.D.:
Extinguishment of Radiation
Augmented Plastic Fires by
Water Sprays.
In: Fifteenth Symposium (Inter-
national) on Combustion.
Pittsburgh: The Combustion Institute,
1975, S. 337-347
- /4/
VDI-Wärmeatlas: 2. Auflage.
Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1974
- /5/ Purt, G.A.:
Einführung in die Brandlehre.
Erlenbach-Zürich, Stuttgart:
Eugen Rentsch Verlag, 1969, S. 100

8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1: Parameter der ohne Chopper durchgeführten Versuche

Nr.	Brandgut	Spiritus ml	Branddauer min	Abbrand Gew.-%	Löschmittel	Löschdauer s	Löschmittelmenge ml
1	Holz	110	6	23	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	ca. 3	ca. 4
2	Holz	110	6	21	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	ca. 4	ca. 5
3	Holz	110	6	19	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	4	5
4	Holz	110	6	21	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	12	72
5	Holz	110	6	21	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	12	72
6	Holz	110	6	23	Wasser, 5 Gew.-% Fluortensid	13	78
7	Plexiglas	20	8	20	entsalztes Wasser	nicht auswertbar	
8	Plexiglas	20	11	20	entsalztes Wasser	ca. 1	ca. 5
9	Plexiglas	20	11	20	entsalztes Wasser	ca. 1	ca. 5
10	Plexiglas	20	10	20	entsalztes Wasser	ca. 2	ca. 10
11	Plexiglas	20	11	20	entsalztes Wasser	ca. 2	ca. 10
12	Plexiglas	20	11	20	entsalztes Wasser	ca. 2	ca. 10

Tabelle 2: Parameter der mit Chopper durchgeführten Versuche

Versuch Nr.	Brandgut	Spiritus ml	Branddauer min	Abbrand Gew.-%	Löschmittel	Löschdauer s	Löschmittelmenge ml
13	Plexiglas	20	10	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
14	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
15	Plexiglas	20	17	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
16	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
17	Plexiglas	20	11	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
18	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
19	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
20	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
21	Plexiglas	20	--	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
22	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
23	Plexiglas	20	12	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
24	Plexiglas	20	13	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
25	Plexiglas	20	10	20	ents. Wasser	nicht	ausgewertet
26	Plexiglas	20	11	20	ents. Wasser	ca. 40	ca. 16
27	Plexiglas	20	10	20	ents. Wasser	ca. 30	ca. 12
28	Plexiglas	20	11	20	ents. Wasser	30	12
29	Plexiglas	20	11	20	Wasser, 20 Gew.-% Diammonium- phosphat	ca. 40	ca. 16
30	Plexiglas	20	12	20		34	14
31	Plexiglas	20	11	20		30	12
32	Plexiglas	20	11	20		29	12

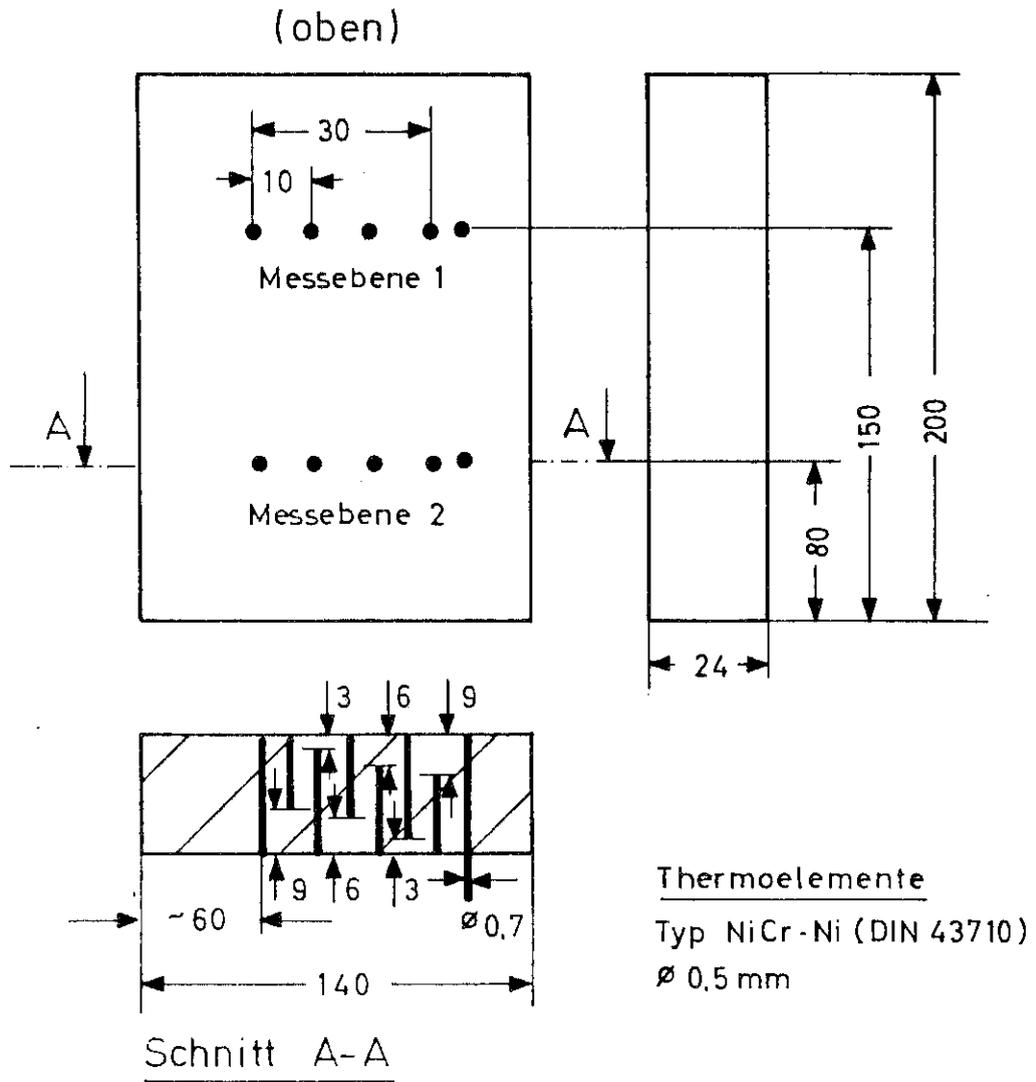
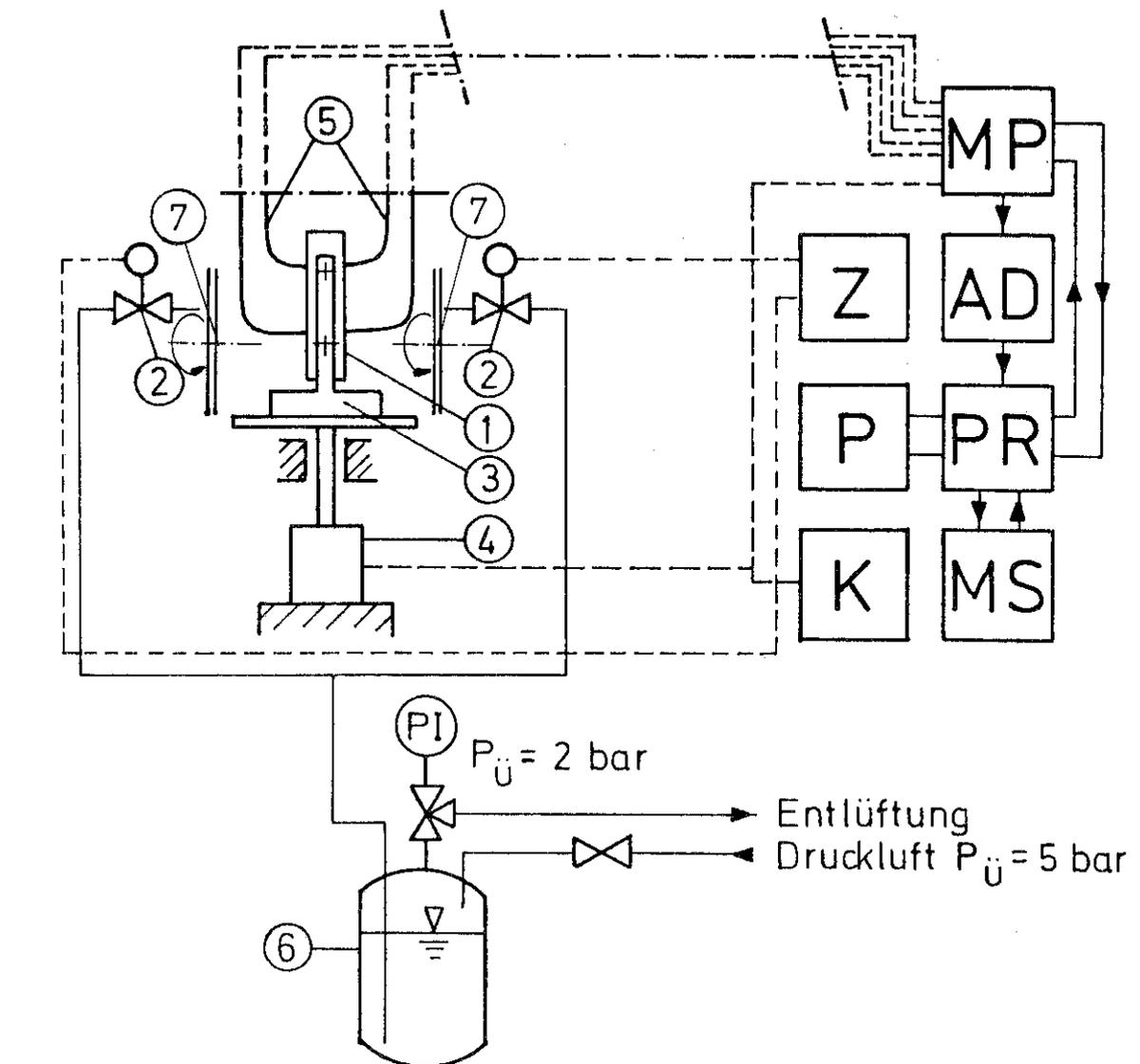


Bild 1: Brandgutabmessungen und Lage der Thermoelemente.



- | | | | |
|---------|---------------------------|----|------------------------|
| 1 | Brandgut | AD | Analog/Digital-Wandler |
| 2 | Magnetventil mit Düse | K | Kompensationsschreiber |
| 3 | Halterung, Spiritusschale | MP | Multiplexer |
| 4 | Waage, Meßwertumformer | MS | Magnetspeicher |
| 5 | Thermoelemente (NiCr-Ni) | P | Plotter |
| 6 | Druckbehälter | PI | Druckanzeiger |
| 7 | Chopper | PR | Prozeßrechner |
| — — — | Datenleitung | Z | Zeitschaltuhr |
| - - - - | Steuerleitung | | |

Bild 2: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.

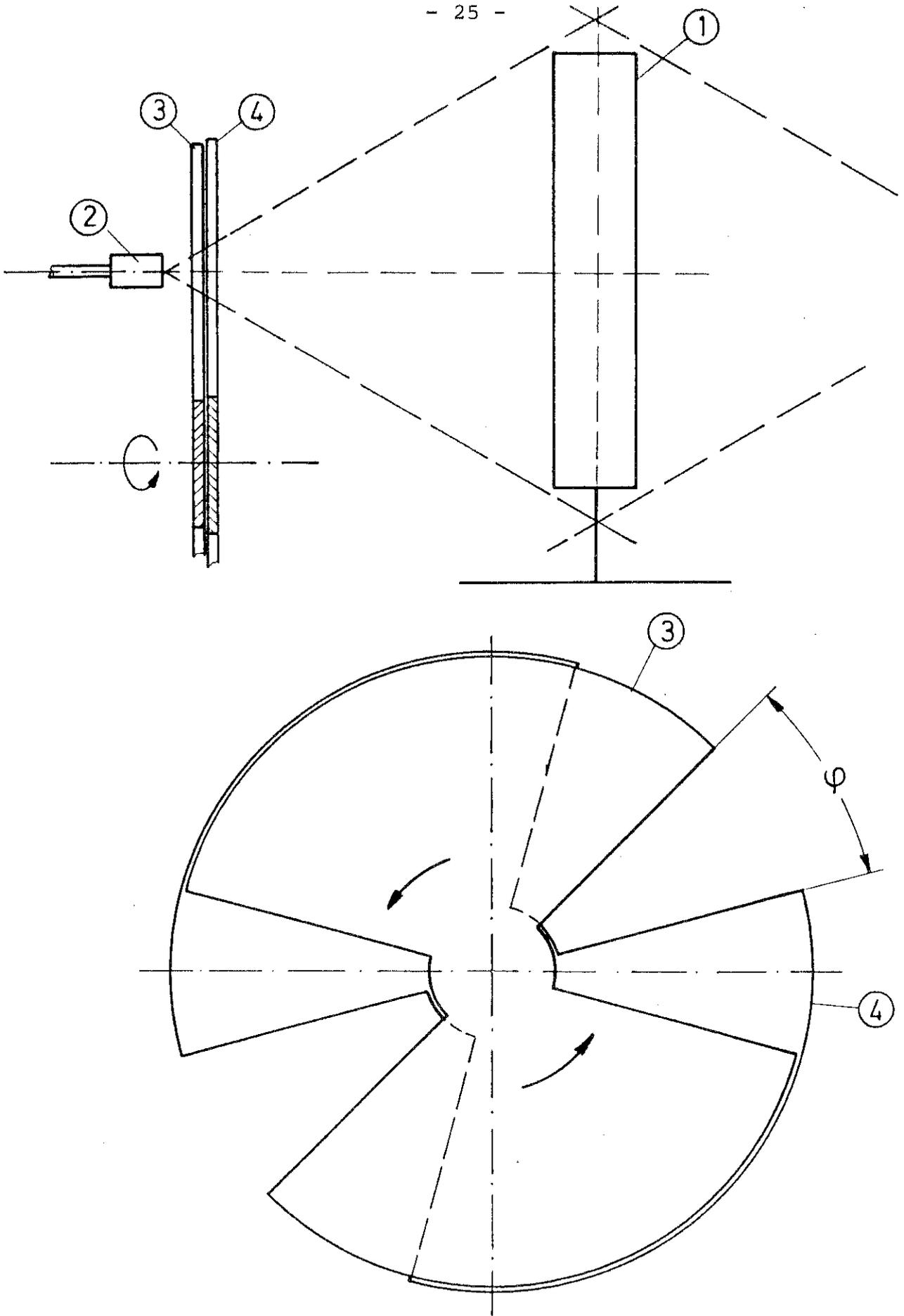


Bild 3: Schematische Darstellung des Choppers.
1 Brandgut, 2 Düse, 3,4 Kreisscheiben,
 φ Öffnungswinkel der Sektoren.

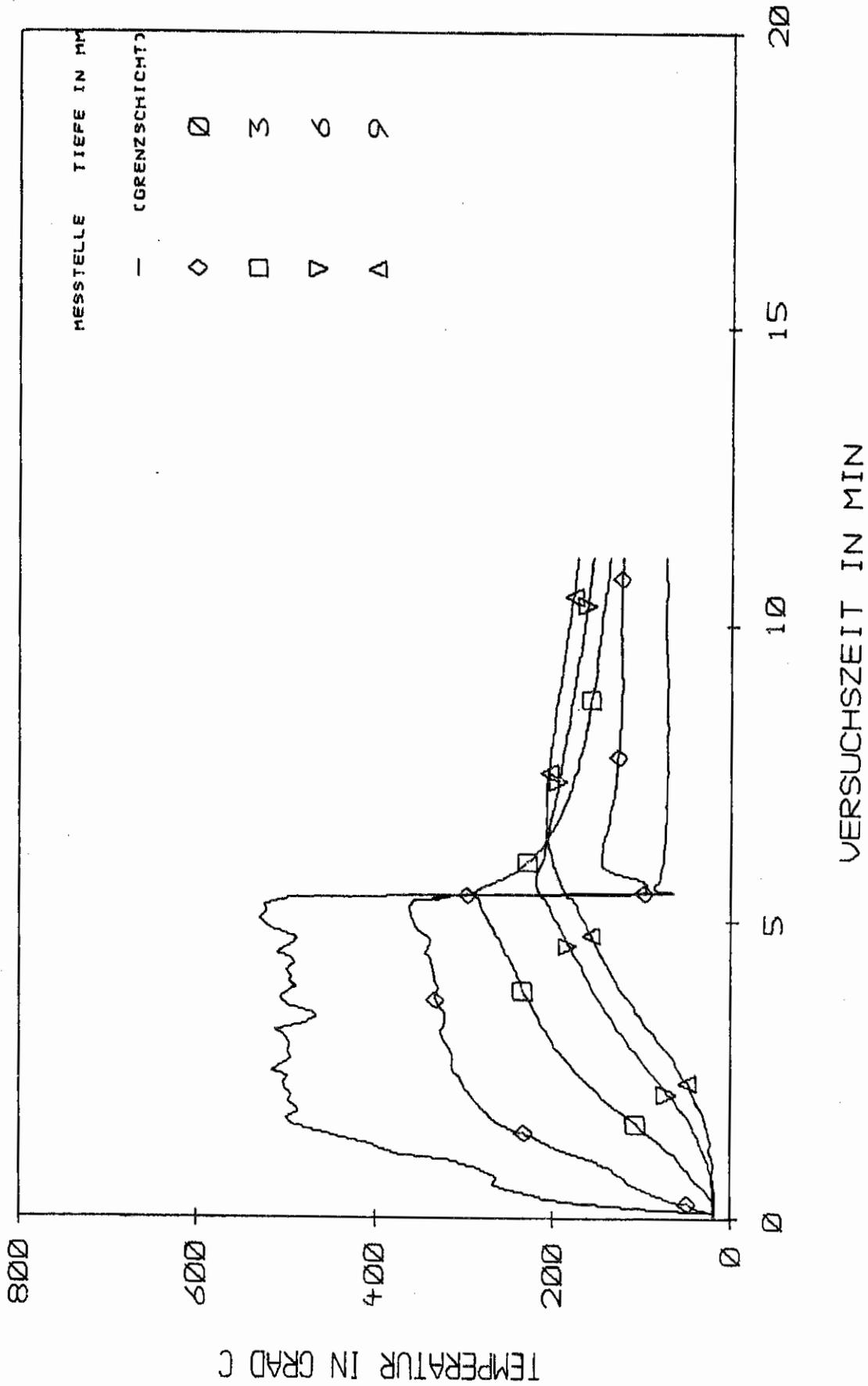


Bild 4: Zeitlicher Temperaturverlauf in den fünf Messpunkten einer Ebene; Versuch Nr.3. Brandgut Holz.

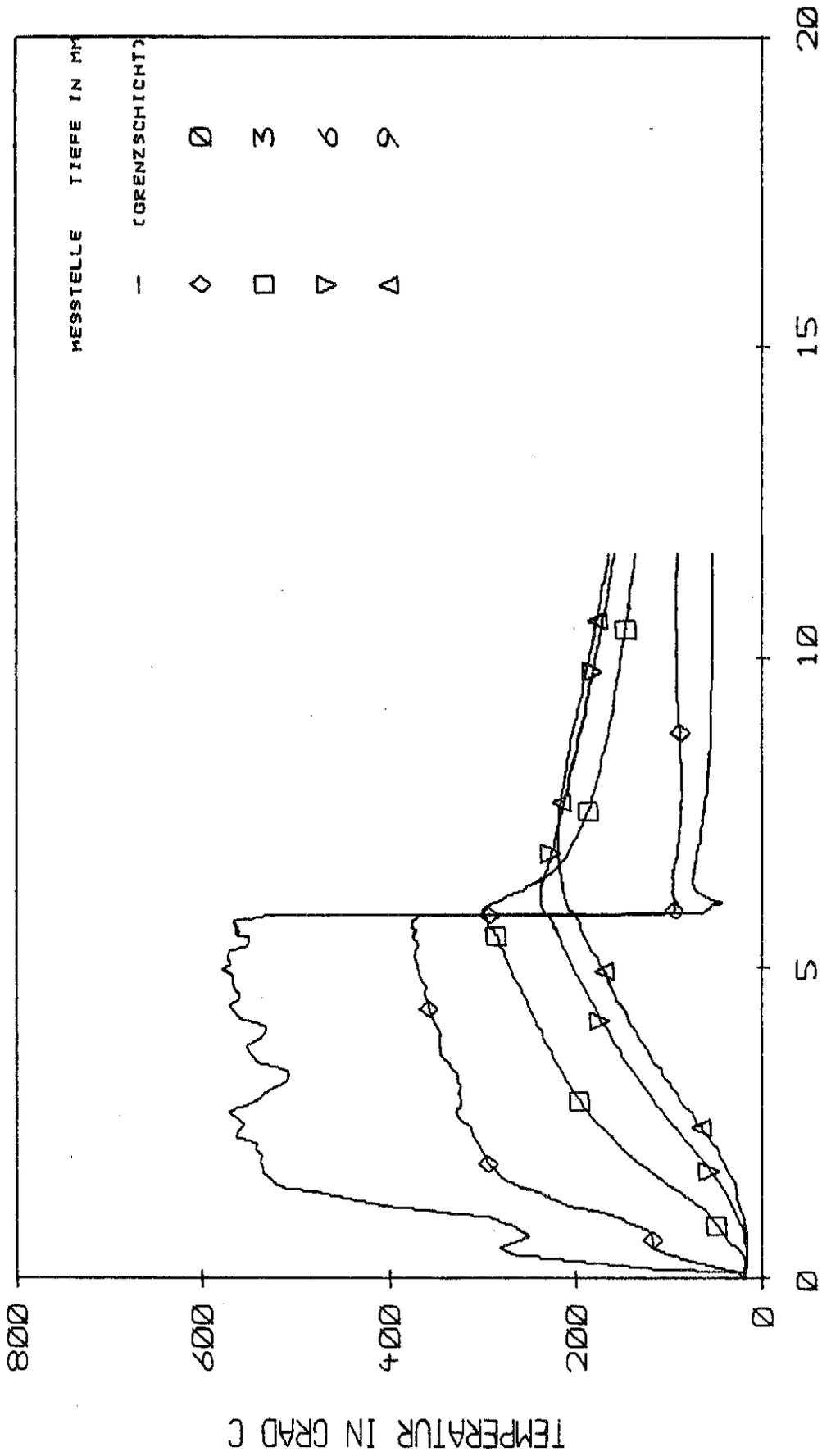


Bild 5: Zeitlicher Temperaturverlauf in den fünf Messpunkten einer Ebene; Versuch Nr.5. Brandgut Holz.

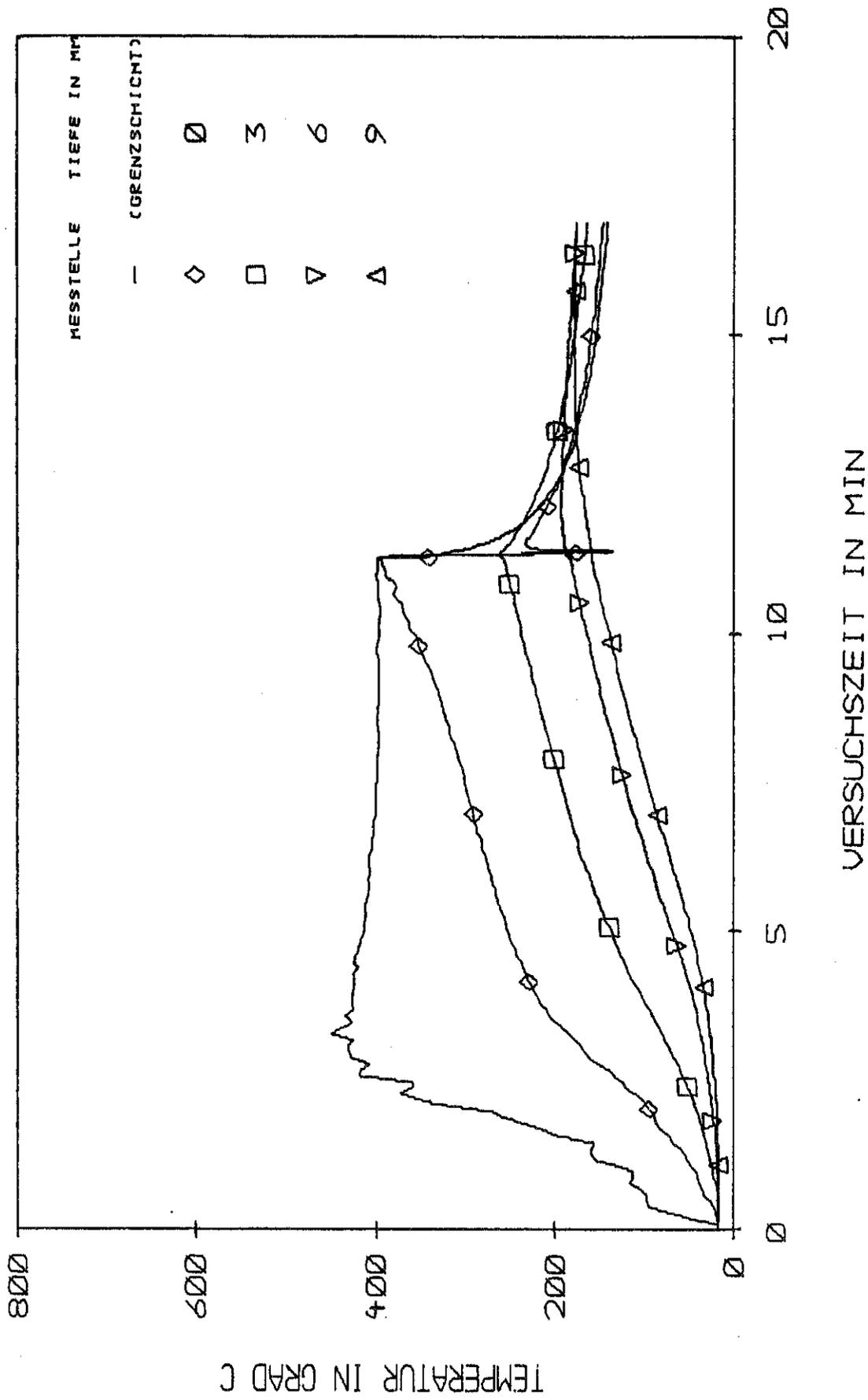


Bild 6: Zeitlicher Temperaturverlauf in den fünf Meßpunkten einer Ebene; Versuch Nr.11. Brandgut Plexiglas.

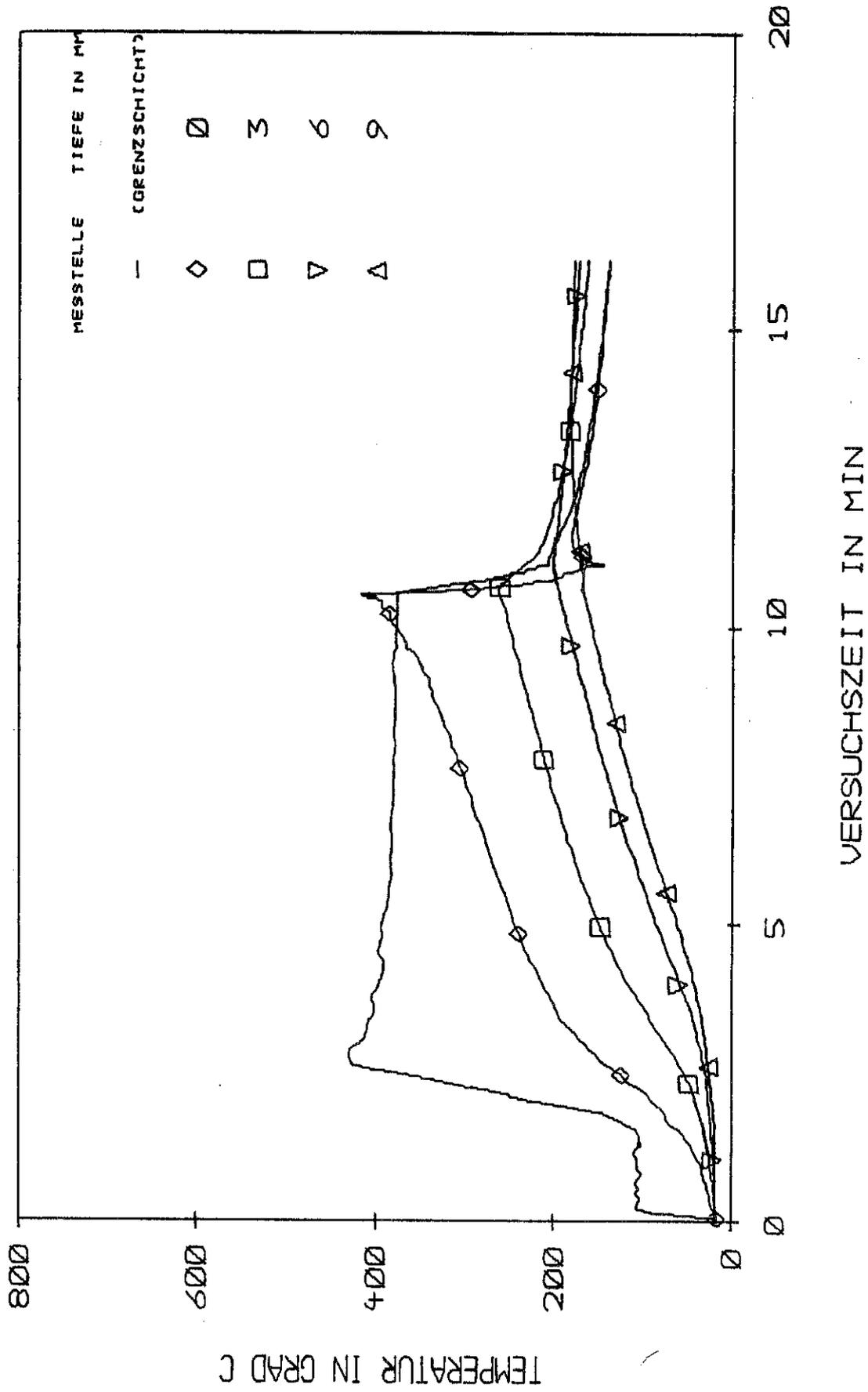


Bild 7: Zeitlicher Temperaturverlauf in den fünf Meßpunkten einer Ebene; Versuch Nr.28. Brandgut Plexiglas.

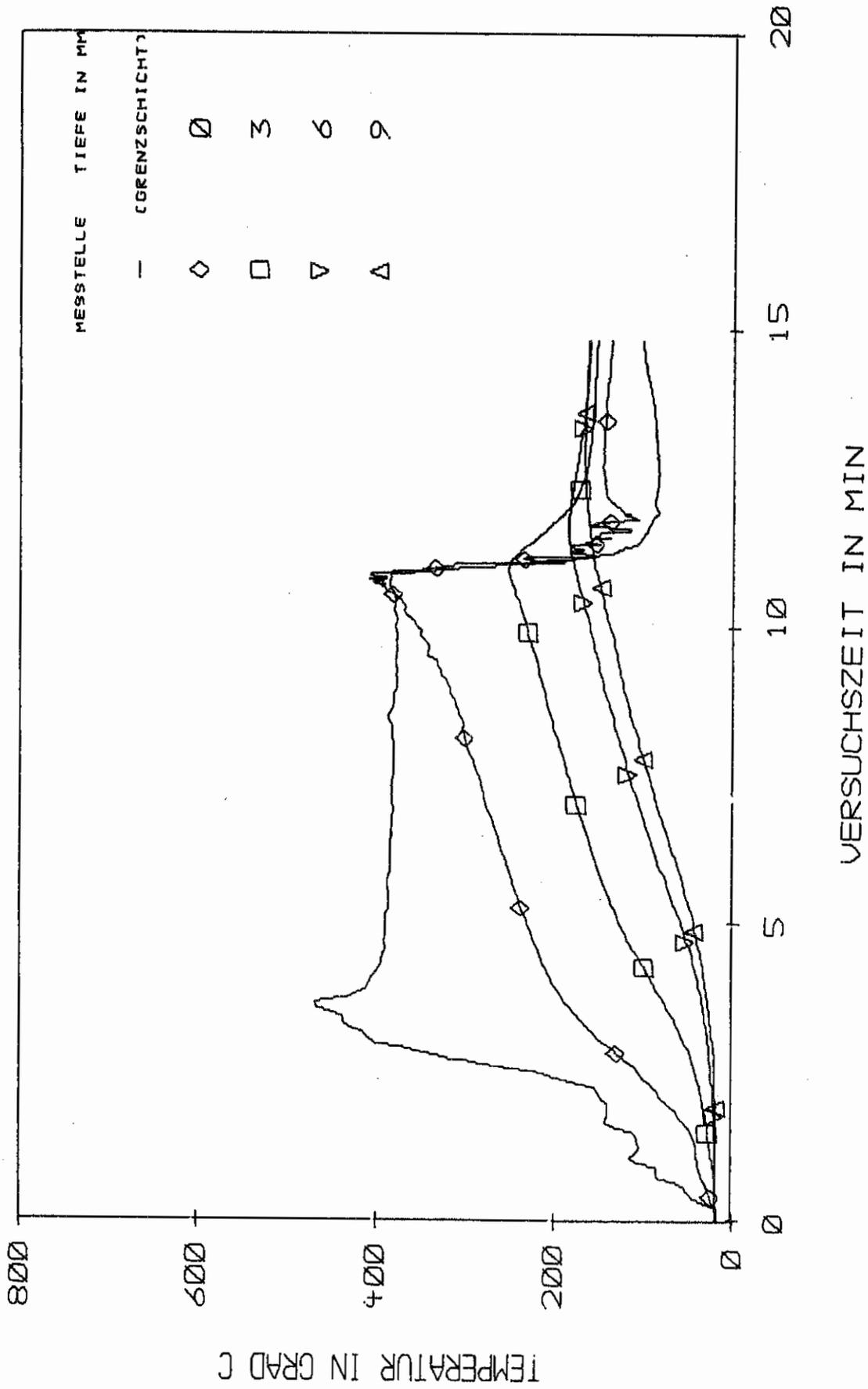
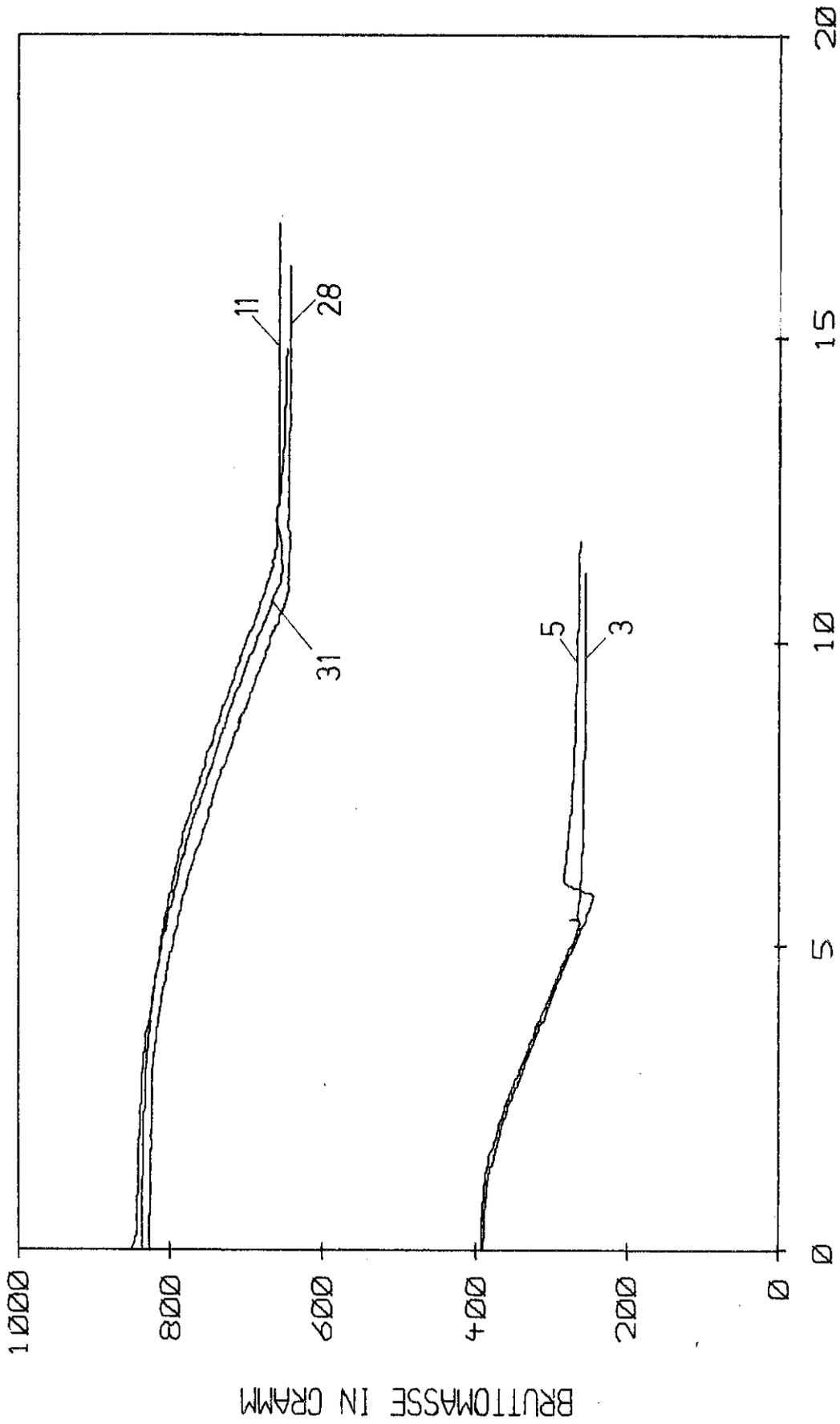


Bild 8: Zeitlicher Temperaturverlauf in den fünf Meßstellen einer Ebene; Versuch Nr.31. Brandgut Plexiglas.



VERSUCHSZEIT IN MIN

Bild 9: Zeitlicher Massenverlust des Brandgutes einschließlich Spiritus.

Kurven 11, 28, 31: Plexiglas.

Kurven 3, 5: Holz.

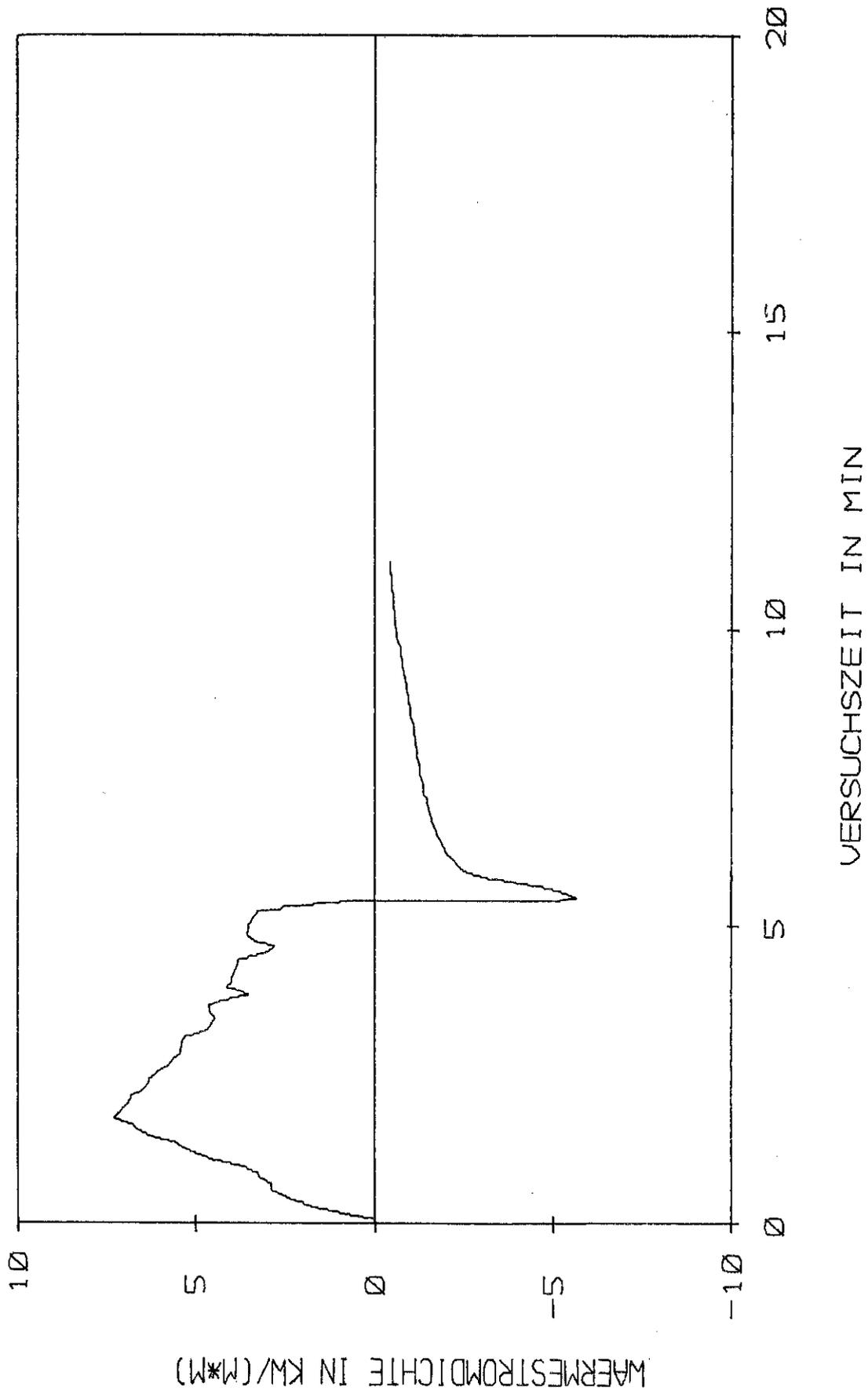


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte.
Versuch Nr.3. Brandgut Holz.

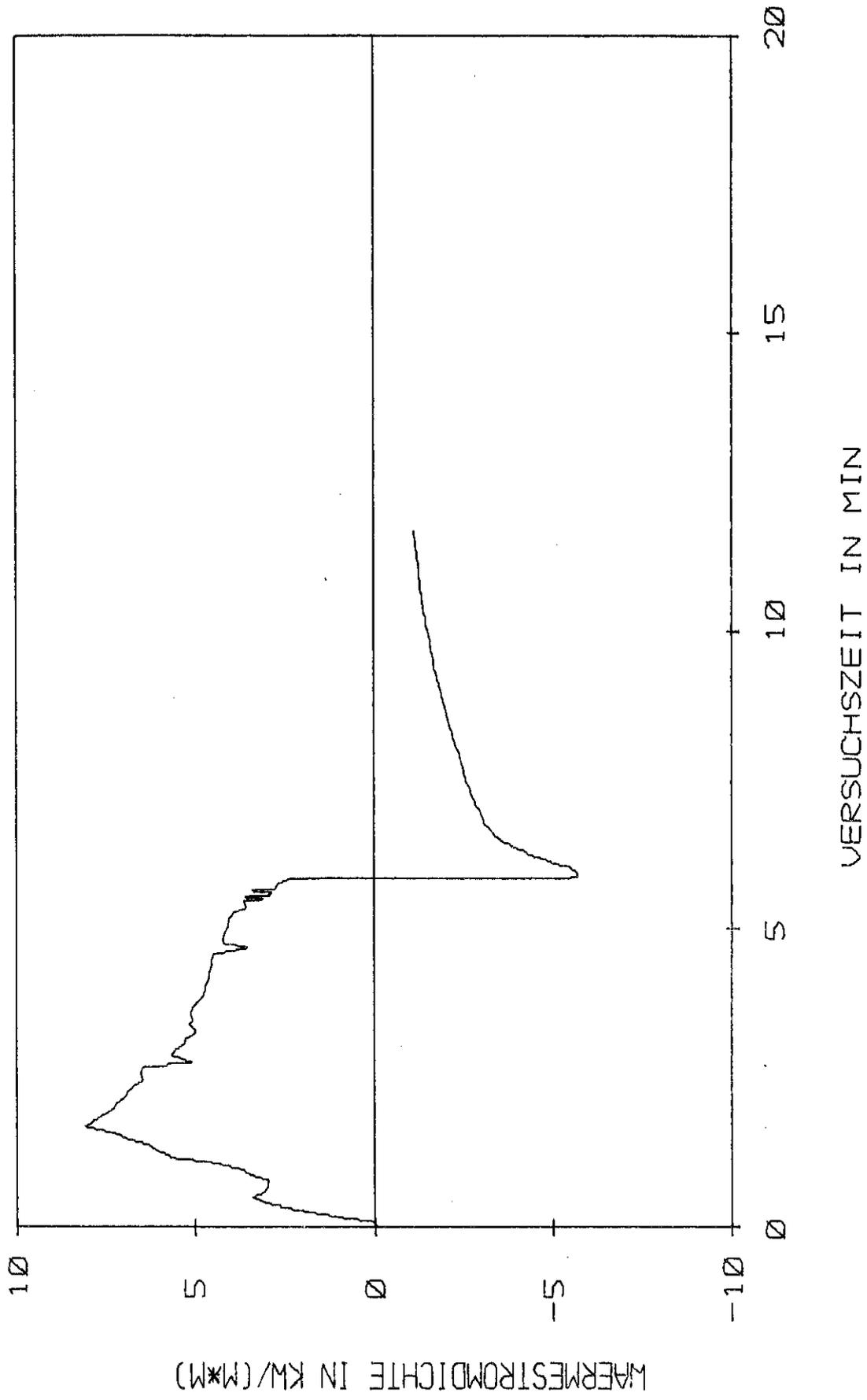


Bild 11: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte.
Versuch Nr.5. Brandgut Holz.

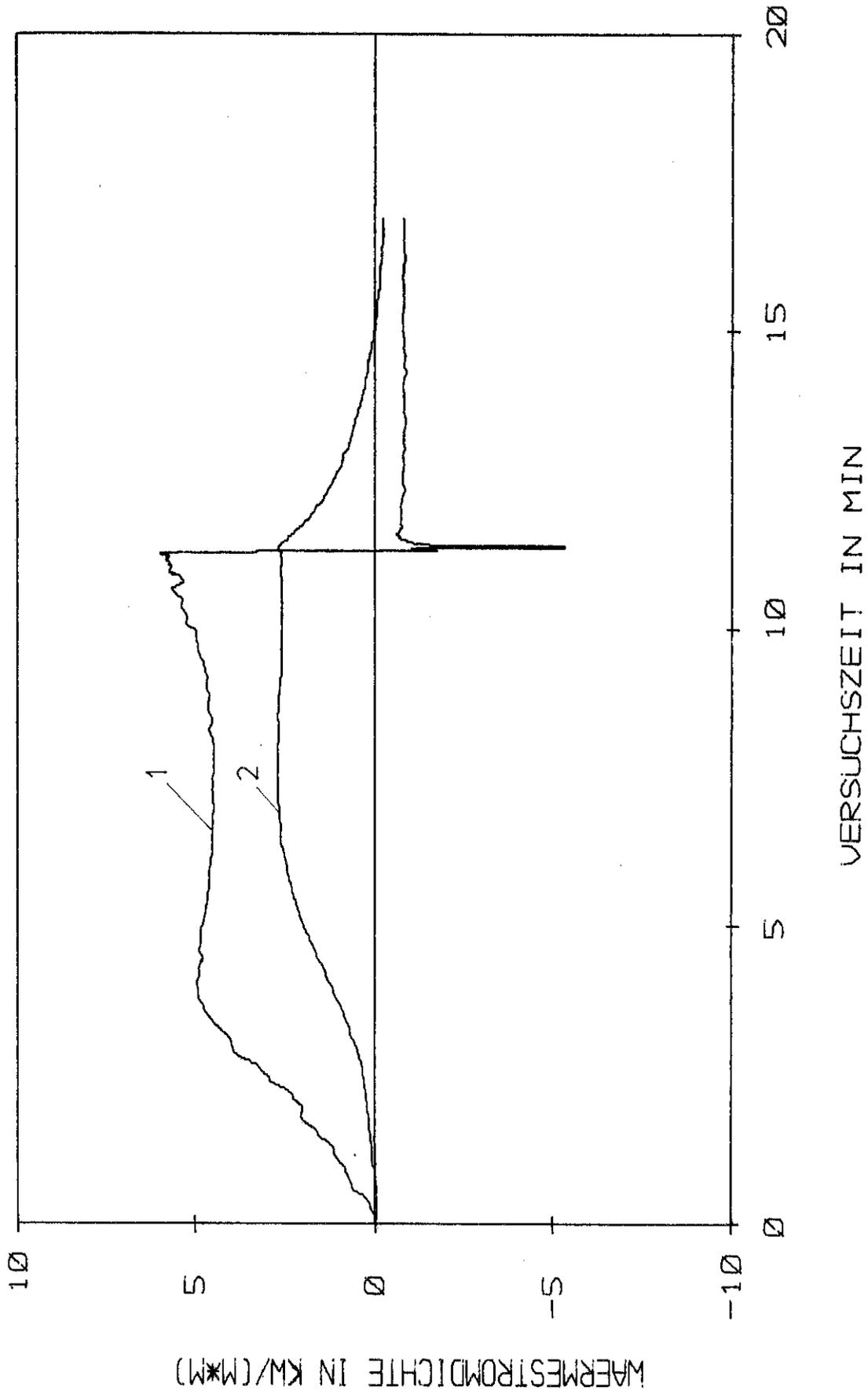
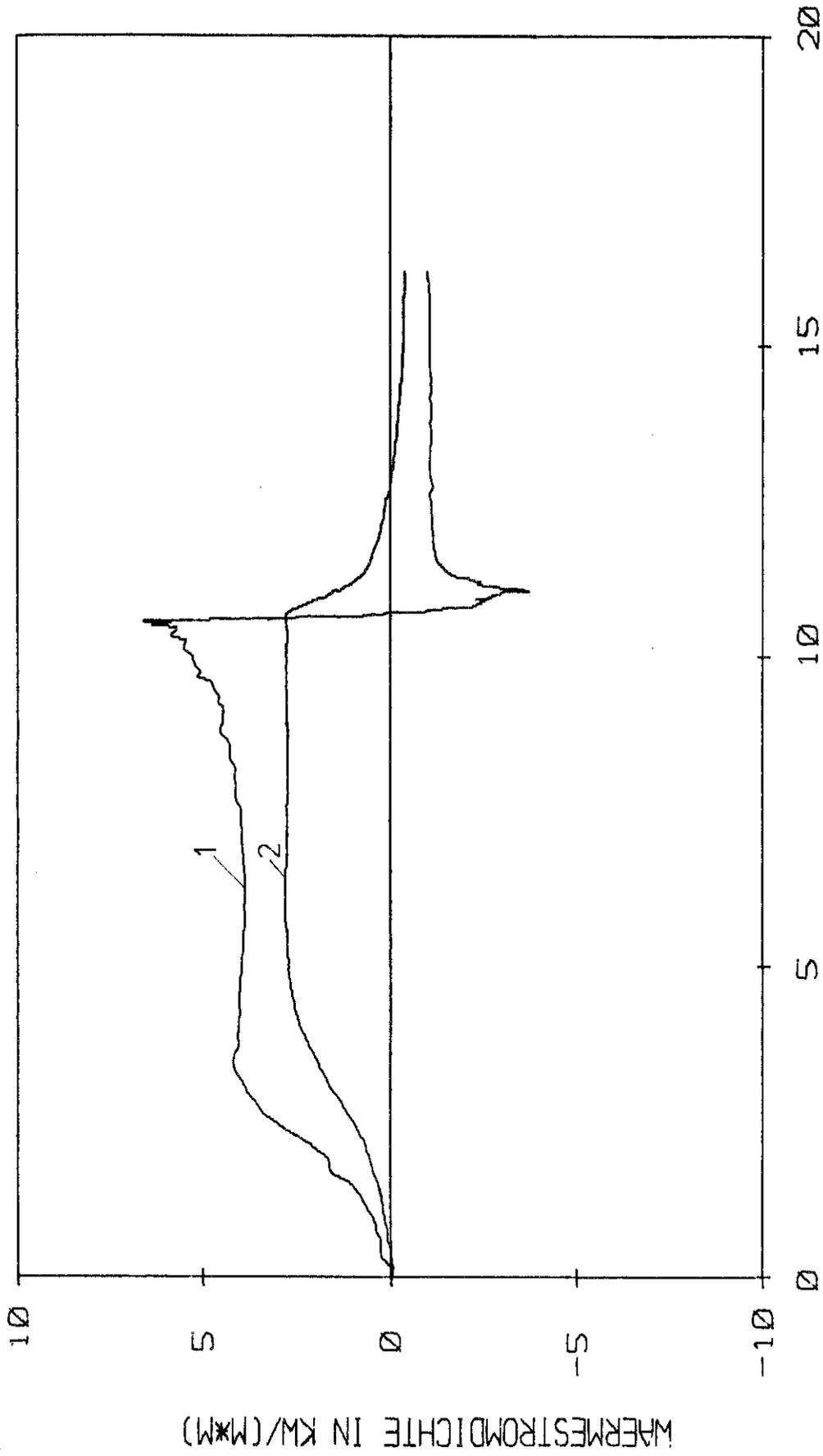


Bild 12: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte.

Versuch Nr.11. Brandgut Plexiglas.

Kurve 1: 0 mm - 3 mm Tiefe.

Kurve 2: 3 mm - 6 mm Tiefe.



VERSUCHSZEIT IN MIN

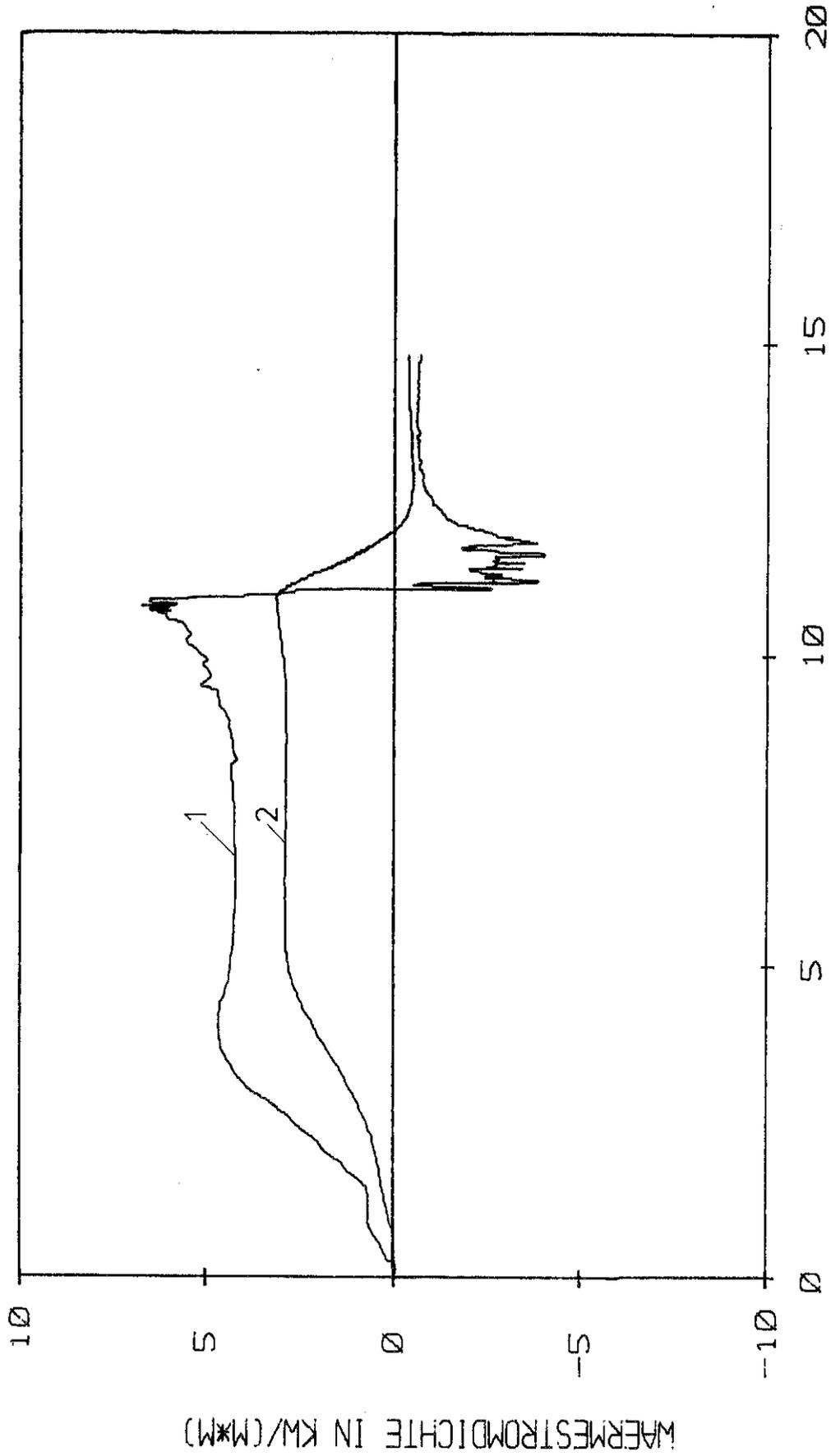
Bild 13: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte.

Versuch Nr.28. Brandgut Plexiglas.

Kurve 1: 0 mm - 3 mm Tiefe.

Kurve 2: 3 mm - 6 mm Tiefe.

WÄRMESTROMDICHTHE IN KW/(M²)



VERSUCHSZEIT IN MIN

Bild 14: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte.

Versuch Nr. 31. Brandgut Plexiglas.

Kurve 1: 0 mm - 3 mm Tiefe.

Kurve 2: 3 mm - 6 mm Tiefe.

WÄRMESTROMDICHTE IN KW/(M*M)