

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

41

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

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

Forschungsbericht Nr.41

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

von
Dipl.-Ing. Peter Fuchs

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Juli 1980

81 (4/78)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. Theoretische Grundlagen	3
3. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG	5
4. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG	7
4.1. Darstellung der gemessenen Temperaturen	7
4.2. Massenverlust	8
4.3. Wärmeleitfähigkeit λ von Holz	8
4.4. Bestimmung der Wärmeströme	10
4.5. Veränderungen der Randbedingungen während der Löschphase	14
5. ZUSAMMENFASSUNG	14
6. FORMELZEICHEN UND INDICES	16
7. LITERATURVERZEICHNIS	17
8. TABELLEN UND BILDER	21

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Eine Analyse der physikalischen Vorgänge beim Löschen mit Wasser ermöglicht es, eine genauere Berechnung der Löschwassermenge vorzunehmen, die zur Bekämpfung eines Brandes notwendig ist. Dadurch wird die Auslegung von Sprinkleranlagen, die Bestimmung der Wasseraufgabemengen sowie Löschwasservorräte etc. genauer und die Brandbekämpfung sicherer und effektiver. Bisher vorliegende Arbeiten /1-10/ zur Berechnung der Löschwassermenge basieren im wesentlichen auf Auswertungen experimenteller Ergebnisse und daraus abgeleiteten empirischen Formeln, die z.T. als "Faustformeln" für grobe Abschätzungen benutzt werden.

In experimentellen Untersuchungen wurde versucht, die Vorgänge beim Löschen eines Brandes zu beschreiben und die wichtigsten Einflußgrößen zu bestimmen. Die Experimente wurden vornehmlich an brennenden Holzkrippen vorgenommen, die auf verschiedene Weise gelöscht wurden. Das Brandverhalten von Holzkrippen wurde in einer Reihe von Arbeiten /11,12,13/ untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, daß in gewissen Grenzen der Abbrand, d.h. der zeitliche Massenverlust und die Brandausbreitung, in Abhängigkeit von der Krippengeometrie und der Lage der Zündquelle im voraus berechnet werden kann. Für die Beurteilung der komplexen Vorgänge beim Löschen mit Hilfe von örtlichen Temperaturmessungen ist eine Holzkrippe weniger gut geeignet, da die örtliche Temperaturentwicklung und das Brandgeschehen starken zeitlichen Schwankungen unterliegt. So liegt es nahe, zur Bestimmung der Wärmeübertragungsmechanismen beim Löschen die Untersuchungen an Proben vorzunehmen, bei denen die Ereignisse an den jeweiligen Meßstellen gut reproduzierbar sind. Aus diesen Gründen wurde die vorliegende Untersuchung an einzelnen Holzbrettern mit nahezu einheitlicher Messung vorgenommen.

In Teil I dieser Untersuchungsreihe /14/ wurde die Mindestlöschwassermenge mit einem mathematischen Modell bestimmt. Dem Brandgut wird nach diesem Modell während des Löschens eine bestimmte Wärmemenge entzogen, sodaß die Oberflächen-temperatur unter die Zündtemperatur sinkt und die Flamme erlischt. Die Berechnung der Wärmemenge ist bei vorgegebener, definierter Temperaturverteilung im Körper möglich. Bei der Modellvorstellung wird der Mechanismus der Wärmeübertragung an das Löschwasser außer Acht gelassen, es wird lediglich angenommen, daß das Löschwasser die zum Abkühlen notwendige Wärmemenge während des Löschens durch Erwärmung und Verdampfung abführt. Die wichtigsten Vereinfachungen dieses Modells betreffen den Verbrennungsprozeß vor und während des Löschvorganges, den Wärmeübergang vom Brandgut an das Löschwasser sowie die Stoffgrößen des Brandgutes. In Teil I dieser Untersuchungsreihe wurden u.a. experimentell die Temperaturleitzahl sowie die Geschwindigkeit des Abbrandes der Oberflächen an Holzstäben gemessen, die durch eine äußere Wärmequelle örtlich derart erwärmt wurde, daß sich die Holzsubstanz zersetzte. Die Temperaturleitzahl ändert sich im Verlauf des Verbrennungsvorganges entsprechend der fortschreitenden Zersetzung von Holz zu Holzkohle. Bei dieser Untersuchung konnte eine Abhängigkeit der Löschwassermenge vom Zersetzungsgrad des Holzes zu Holzkohle gefunden werden.

In dem hier vorliegenden Teil II der Untersuchungsreihe wird versucht, die Wärmeübertragung vom Brandgut an das Löschwasser zu bestimmen und die auftretenden Wärmeströme zu berechnen.

2. Theoretische Grundlagen

Zwischen Wärmestromdichte \dot{q} und Temperaturverteilung in einem Körper besteht die Beziehung

$$\dot{q} = \lambda \text{ grad } \delta, \quad (1)$$

sodaß die Richtung des Wärmeflusses mit der Richtung des negativen Temperaturgradienten übereinstimmt, wenn die Wärmeleitfähigkeit λ eine richtungsunabhängige Größe ist. Nimmt man als Körper eine homogene Platte an, bei der symmetrische Bedingungen bezüglich der Körpermitte herrschen, so braucht man nur eine Körperhälfte zu betrachten. Zur Berechnung des Wärmestromes an der Oberfläche wird der Körper in K_N äquidistante Volumenstreifen, sodaß man mit i als Zeitschritt und K als Ortsschritt für den eindimensionalen Wärmefluß aus Gleichung (1)

$$\dot{q}_{\text{Ob}} = -\lambda \frac{2}{d} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} = -\frac{4\lambda}{d} \cdot \frac{\delta_{i,K_N} - \delta_{i,\text{Ob}}}{\Delta \xi} \quad (2)$$

mit

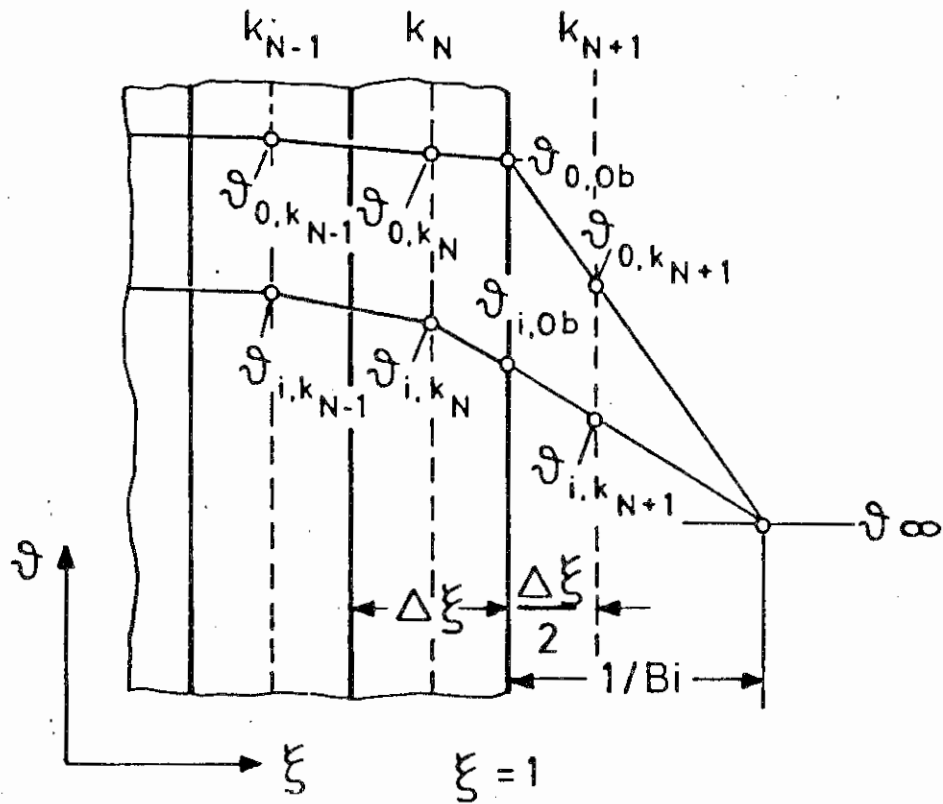
$$\xi = \frac{x}{d/2} = \frac{2x}{d} \quad (3)$$

$$\Delta \xi = \frac{2 \Delta x}{d} = \frac{1}{K_N} \quad (4)$$

erhält.

Die in der Skizze angegebene Biotzahl Bi gibt das Verhältnis des inneren Wärmeleitwiderstandes (d/λ) zum äußeren Wärmeübergangswiderstand ($1/\alpha$) an:

$$Bi = \frac{d \cdot \alpha}{2 \lambda} \quad (5)$$



Skizze: Darstellung des Differenzenverfahrens für eine ebene Platte

Die Biotzahl kann zur Beschreibung der Randbedingung herangezogen werden /15/. Verschwindet der äußere Wärmeübergangswiderstand ($1/Bi \rightarrow 0$), so rückt der Richtpunkt in der Skizze direkt an die Körperoberfläche heran und es herrscht die Randbedingung 1. Art mit konstanter Oberflächentemperatur. Wird der äußere Wärmeübergangswiderstand gegenüber dem inneren Wärmeleitwiderstand immer größer, so verschiebt sich der Richtpunkt weiter nach außen. Für kleine Biotzahlen ($Bi \rightarrow 0$) kann daher die Randbedingung 3. Art mit konstantem Wärmefluß an der Oberfläche angenommen werden.

3. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Ausgehend von den theoretischen Überlegungen in Abschnitt 2 wurde ein Versuchsaufbau gewählt, mit dem die Anwendung des Differenzenverfahrens zur Berechnung der Temperaturverteilung und der Wärmeströme beim Löschvorgang möglich ist. Als Brandobjekt wurden Fichtenholzbretter der Abmessungen 200 mm x 140 mm x 24 mm verwendet. Es wurden Bretter gewählt, die aus der Stammitte geschnitten waren, sodaß die Maserung annähernd senkrecht auf die Oberfläche der breiten Brettseite mündete. Damit war die Richtung des Wärmefflusses beim Aufheizen und Ablöschen im wesentlichen parallel zur Holzfaser. Die Bretter wurden vor den Versuchen in einem Trockenschrank bei 105 °C 24 Stunden getrocknet. Eine Gewichtskontrolle zeigte, daß eine längere Trockenzeit zu keiner wesentlich weiteren Gewichtsabnahme führte, sodaß die gewählte Zeitspanne eine konstante Trocknung der Bretter gewährleistete. Die Bretter wurden senkrecht stehend an den Schmalseiten an einer Halterung befestigt. Unter dem Brett befand sich eine Schale zur Aufnahme von Spiritus, der zur Zündung diente. An jeder Brettseite wurden in zwei verschiedenen Abständen von der Brettunterkante Meßebenen angeordnet. In jeder Meßebene wurden Löcher für die Temperaturlaufnehmer so gebohrt, daß die Spitzen der Temperaturfühler 0, 3, 6 und 9 mm von der jeweiligen Brettoberfläche entfernt waren. An jedem Brett waren somit 4 Meßebenen - 2 an jeder Seite - mit je 4 Temperaturaufnehmern angeordnet. In Bild 1 ist die Anordnung der Temperaturaufnehmer in den 4 Meßebenen dargestellt. Die Bohrungen einer Meßebene hatten einen Abstand von 10 mm voneinander, die Bohrungen der Meßstelle auf der gegenüberliegenden Seite lagen jeweils dazwischen. An die Oberfläche des Brettes war in jeder Meßebene ein Temperaturaufnehmer federnd von außen angelegt, sodaß damit eine mittlere Temperatur von Flamme und Oberfläche in der jeweiligen Meßebene gemessen wurde. Als Temperaturaufnehmer wurden Mantelthermoelemente aus Chromel/Alumel (Typ NiCr - Ni nach DIN 43710) mit 0,5 mm Außendurchmesser verwendet.

In Bild 2 ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Das Holzbrett 1 befand sich mit Halterung und Spiritusschale 3 auf dem Teller einer Waage 4, mit der der Abbrand kontrolliert wurde. Der entsprechende Massenverlust wurde während des Versuches auf einem Kompensationsschreiber (K) registriert.

Zum Löschen wurden zwei mit schnell auslösenden Magnetventilen geschaltete Düsen 2 verwendet, die in ca. 250 mm Abstand auf beide Brettseiten sprühten. Die Aufgabezeiten, d.h. die Öffnungszeiten der Magnetventile, wurden mit Hilfe einer Zeitschaltuhr Z gesteuert. Es wurden zwei verschiedene Typen von Düsen mit Öffnungswinkeln von 40° und 45° und Durchflüssen von $0,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ und $2,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ verwendet. Die Durchflußmenge wurde bei konstantem Überdruck von 2 bar im Druckbehälter 6 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 PI kontrolliert werden. Die von den Thermoelementen abgegebene Thermospannung wurde ebenso wie die Analogspannung der Waage über den Multiplexer MP und den Analog-Digital-Wandler AD von dem Prozeßrechner PR digital erfaßt und auf dem Magnetspeicher MS gespeichert. Der Multiplexer MP wurde vom Prozeßrechner so gesteuert, daß z.B. die Zeitintervalle zwischen zwei Meßzyklen variiert werden konnten. Neben diesen Spannungen wurde noch die Raumtemperatur als Vergleichsmeßstelle der Thermoelemente und die Versuchszeit erfaßt und gespeichert. Die digital gespeicherten Daten wurden mit Hilfe des Prozeßrechners verarbeitet, sodaß eine graphische Darstellung der Ergebnisse auf dem Plotter P erfolgen konnten. Während der Brandphase wurden alle Daten in einem Zeitintervall von ca. 6 Sekunden gemessen und gespeichert. Kurz vor der Löschphase wurde das Zeitintervall auf ca. 1 Sekunde verkürzt und dieses verkürzte Zeitintervall ca. 30 Sekunden während der Löschphase beibehalten, sodaß schnelle Änderungen der Meßwerte mit ausreichender Genauigkeit erfaßt wurden. Nach dieser

Zeitspanne von 30 Sekunden änderten sich die Meßwerte nur langsam, sodaß wieder ein Zeitintervall von 6 Sekunden gewählt wurde. Durch die Wahl eines längeren Zeitintervalls zwischen zwei Messungen in der Brand- und Abklingphase wird die zu verarbeitende Datenmenge reduziert. Die Verarbeitung der Daten erfolgte durch spezielle Programmierung des Prozeßrechners. Die Thermospannungen wurden in entsprechende Temperaturwerte umgerechnet und mit der Raumtemperatur korreliert. Zur Berechnung der Wärmeströme wurden die entsprechenden Versuchswerte auf gleiche Zeitabstände interpoliert, ein Mittelwert über alle Meßebenen, und damit für alle Versuche eines Parameters wiederum ein Mittelwert gebildet. Gleichzeitig wurden die Varianzen als Maß der statistischen Schwankungen und ein Konfidenzintervall für einen 95%igen Vertrauensbereich /16/ bestimmt.

4. VERSUCHSERGEBNISSE UND VERSUCHSAUSWERTUNG

In insgesamt 48 Versuchen wurden verschiedene Löschmittel wie Wasser, wässrige Salzlösungen und gasförmiges CO_2 verwendet. Es wurde die beaufschlagte Löschmittelmenge, die Löszeit und der Abbrand des Brandgutes variiert. Tabelle 1 gibt die verschiedenen Parameter und die jeweilige Anzahl der Versuche wieder.

4.1. Darstellung der gemessenen Temperaturen

Bild 3 zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf der Temperatur in einer Meßebene bei einem Abbrand von 25 Gew.-%, einer Wasserbeaufschlagung von $21,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Löszeit von 3 Sekunden. Man sieht, daß die Temperatur an der Oberfläche des Brettes von etwa $550^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$ beim Löschen auf etwa 100°C sinkt. Die Temperatur in der Oberfläche des Brettes fällt beim Löschen von ca. 350°C ebenfalls auf etwa 100°C , steigt aber danach wegen des Wärmetransportes aus dem Brettinnern wieder auf ca. 250°C an und klingt dann ähnlich

wie die Temperatur an den übrigen Meßpunkten im Brettinnern ab. In Bild 4 ist die Temperaturverteilung in der Aufheizphase im Innern des Holzes für verschiedene Zeiten, ermittelt aus den Meßpunkten zweier gegenüberliegender Meßebenen, dargestellt. Die gleiche Art der Darstellung der Temperaturverteilung zeigt Bild 5 für die Löschphase. Eine quasi dreidimensionale Darstellung des zeitlichen Temperaturverlaufs im Holzbrett zeigt Bild 6. Diese Darstellung veranschaulicht den zeitlichen Temperaturverlauf im Holzbrett an den Meßpunkten in zwei gegenüberliegenden Meßebenen.

4.2. Massenverlust

In Bild 7 ist die zeitliche Abnahme der Masse des Holzbrettes und des für die Zündung benötigten Spiritus für Versuche mit unterschiedlicher Löschwasserbeaufschlagung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß sich vor Löschbeginn eine stationäre Phase des Brandes mit konstantem zeitlichen Massenverlust einstellt. Weiter ist zu erkennen, daß bei der hohen Löschwasserbeaufschlagung ein Teil des Wassers unverdampft am Brett abläuft, sich in der Zündwanne sammelt und von der Waageeinrichtung als Massenzunahme nach Löschbeginn erfaßt wird. Damit kann der Teil des Löschwassers bestimmt werden, der unverdampft das Holzbrett benetzt oder in die Zündwanne abfließt.

4.3. Wärmeleitfähigkeit λ von Holz

Bei der Verbrennung von Holz entstehen durch thermische Zersetzung verschiedene Stoffbereiche mit unterschiedlichen Stoffgrößen. Nach /17/ kann man diesen Bereich von außen nach innen in drei Zonen aufteilen:

1. Holzkohle
2. Holz im Zustand der thermischen Zersetzung
3. Holz

Jede dieser Zonen besitzt verschiedene, temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten. Zur Berechnung der Wärmeströme über die Temperaturgradienten muß daher für jede Zone die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden. Dazu wurde ein Modell entwickelt, das die Umwandlung von Holz in Holzkohle in Abhängigkeit von der Temperatur für die o.g. drei Zonen berücksichtigt:

1. für Temperaturen über 400 °C : Holzkohle
2. für Temperaturen zwischen
200 °C und 400 °C : Übergangszustand
3. für Temperaturen unter 200 °C: Holz

Zudem wird in dem Modell berücksichtigt, daß die Umwandlung irreversibel ist, d.h. daß ein einmal erreichter Zersetzungszustand beibehalten wird, wenn die Temperatur in dieser Zone sinkt. Es wird davon ausgegangen, daß bei Temperaturen über 400 °C die Zersetzung von Holz zu Holzkohle weitgehend abgeschlossen ist und Holzkohle als reine Komponente vorliegt.

Im Bereich zwischen 200 °C und 400 °C findet die Zersetzung statt. Unter 200 °C ist die Zersetzungsgeschwindigkeit von Holz gering /17/ und kann für die betrachteten Zeitspannen vernachlässigt werden. Zur Vereinfachung der Berechnung wird die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit für die einzelnen Zonen als linear angenommen. In Bild 8 ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit über der Temperatur mit den im Modell benutzten Zahlenwerten dargestellt.

Ausgangspunkt ist die Wärmeleitfähigkeit von Holz, die bis 200 °C reversibel ist, d.h. auch für fallende Temperaturen nach der Gleichung

$$\lambda = A_1 + B_1 (\delta - \delta_\infty) \quad (6)$$

berechnet wird. Steigt die Temperatur über 200 °C, so wird λ nach

$$\lambda = A_2 + B_2 (\delta - \delta_\infty). \quad (7)$$

Diese Werte sind irreversibel, d.h. daß bei fallenden Temperaturen, ausgehend vom Zersetzungszustand bei der maximal erreichten Temperatur δ_1 λ nach der Gleichung

$$\lambda = A_4 + B_3 (\delta_1 - \delta_\infty) + B_1 (\delta - \delta_\infty) \quad (8)$$

bestimmt werden muß.

Steigt die Temperatur über δ_1 , geht die Zersetzung weiter bis eine Temperatur von 400 °C erreicht wird. Ab dieser Temperatur gilt die Berechnung

$$\lambda = A_3 + B_1 (\delta - \delta_\infty) \quad (9)$$

für Holzkohle.

Mit diesem Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Holz ist die Bestimmung der Wärmestromdichte an der Brettoberfläche bei bekanntem Temperaturgradienten $\partial\delta / \partial x$ in Randnähe möglich.

4.4. Bestimmung der Wärmeströme

Nach den Ausführungen in Kapitel 2 ist die Berechnung des Wärmestromes möglich, wenn die Temperaturverteilung im Körper in Abhängigkeit von Ort und Zeit bekannt ist. An der Oberfläche des Körpers mit der Koordinate $x = 0$ wird der Wärmestrom senkrecht zu dieser Fläche im eindimensionalen Fall berechnet nach

$$\dot{q}_{(x=0,t)} = - \lambda \frac{\partial\delta(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (10)$$

Der Gradient $\partial\delta/\partial x$ wird näherungsweise durch Messen zweier benachbarter Temperaturen in Randnähe bestimmt:

$$\frac{\partial\delta}{\partial x} = \frac{\Delta\delta}{\Delta x} = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{x_i + 1 - x_i} \quad (11)$$

Der Temperaturgradient in Randnähe wird durch Differenzbildung der gemessenen Temperaturen in $x = 0$ mm und $x = 3$ mm Tiefe angegeben. Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach Kapitel 4.3 wird die Mitteltemperatur an dieser Stelle eingesetzt:

$$\dot{q}_{Ob} = \dot{q}(x=0) = \lambda(\delta_m) \frac{\delta(x=3) - \delta(x=0)}{\Delta x} \quad (12)$$

$$\delta_m = \frac{1}{2} (\delta_{(x=0)} + \delta_{(x=3)}) \quad (13)$$

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

Aus dem gemessenen zeitlichen Verlauf der Temperaturen erhält man so den zeitlichen Verlauf der Wärmestromdichte. Die Kurven für die einzelnen Meßebenen waren ähnlich, jedoch traten versuchstechnisch bedingte Schwankungen auf. Diese Schwankungen wurden hauptsächlich durch die Inhomogenität des Holzes verursacht, die zu örtlich unterschiedlichen Verbrennungsreaktionen führte. Um diese Einflüsse weitgehend zu eliminieren, wurden die Werte aller Meßebenen pro Brett gemeinsam betrachtet und die Werte aller Versuche mit gleichen Versuchsparametern gemittelt.

Bild 9 zeigt als Beispiel einen gemittelten Verlauf der Wärmestromdichte über der Zeit vom Zeitpunkt der Zündung ($t = 0$) bis zum Ende des Versuches nach ca. 600 Sekunden. Gelöscht wurde 7,3 Sekunden lang mit Wasser bei einer Beaufschlagung von $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Zum Vergleich sind gemittelte Versuchswerte für einen Löschvorgang mit gasförmigem CO_2 eingezeichnet.

In den Bildern 10 bis 14 ist der Verlauf der Wärmestromdichte über der Zeit nur für die Löschphase eingezeichnet. Als Löschbeginn wird der Zeitpunkt definiert, zu dem an der Meßstelle Wärme abgegeben wird. Aus den Versuchsdaten wurden die Varianzen bestimmt und im Diagramm Konfidenzintervalle für einen 95% statistischen Vertrauensbereich /16/ eingetragen.

Bild 10 zeigt den gemittelten zeitlichen Verlauf der abgeführten Wärmestromdichte für 15%, 25% und 35% Abbrand mit einer Wasserbeaufschlagung von $21,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ und einer Löschzeit von 7,3 Sekunden. Ein Einfluß des Abbrandes ist nicht zu erkennen, da die Kurven ähnlich verlaufen. Dagegen ist der Einfluß der Löschmittelmenge und der Löschzeit aus Bild 11 deutlich zu erkennen. Bei einer Wasserbeaufschlagung von $96,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ und einer Löschzeit von 11,8 s ist der Verlauf der Wärmestromdichte deutlich höher als bei der Beaufschlagung mit $21,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ und 14,3 s bzw. 7,3 s Löschzeit. Daraus folgt, daß bei großen Löschmittelmengen mehr Wärme abgeführt wird als bei kleinen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die hier verwendeten niedrigen Löschmittelmengen etwa der experimentell ermittelten Mindestlöschmittelmenge /5/ entsprachen.

Um den Einfluß wässriger Salzlösungen zu untersuchen, wurde neben Wasser eine 5%ige Fluortensidlösung sowie eine 5%ige Diammoniumphosphatlösung verwendet. Die Lösungen wurden mit vollentsalztem Wasser hergestellt, die Konzentrationsangabe bezieht sich auf Gewichtsprozent.

Bei einem Abbrand von 25 Gew.-% wurden wässrige Salzlösungen mit einer Beaufschlagung von $21,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ und 7,3 s Löschzeit aufgegeben. Der zeitliche Verlauf der Wärmestromdichte ist in Bild 12 aufgetragen. Der ähnliche Verlauf der Kurven zeigt, daß kein Unterschied zwischen den wässrigen Salzlösungen und Wasser hinsichtlich des Wärmeflusses beim Löschen besteht.

Eine Reduzierung der Löschmittelmengen führte hier nicht zu einem vollen Löscherfolg, wie dies im Gegensatz dazu in /18/ festgestellt wurde. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß bei den niedrigen Abbrandraten nur wenig Glutnester entstanden. Wegen der fehlenden Glutnester kommt der inhibitorische Effekt der Diammoniumphosphat-Lösung, ebenso wie der schaubildende und benetzende Effekt der Fluortensidlösung nicht zur Wirkung. Eine unterschiedliche Löschwirkung tritt bei der Verwendung von gasförmigem CO_2 als Löschmittel auf. Im Bild 13 ist der zeitliche Verlauf der Wärmestromdichte beim Löschen mit gasförmigem CO_2 für verschiedene Abbrände dargestellt. Auch aus diesem Bild ist wie aus Bild 10 kein Einfluß des Abbrandes auf den Verlauf der Wärmestromdichte abzuleiten. In Bild 14 wird der unterschiedliche zeitliche Verlauf der Wärmestromdichte bei der Verwendung von Wasser bzw. CO_2 als Löschmittel deutlich. Beim Löschen mit CO_2 fehlt das ausgeprägte Maximum zu Beginn des Löschens völlig, die Kurve steigt allmählich an und nähert sich nach ca. 100 s der Kurve, die mit Wasser als Löschmittel ermittelt wurde. Der Unterschied der Kurvenverläufe ist damit zu erklären, daß bei der Verwendung von Wasser als Löschmittel durch die große Verdampfungsenthalpie des Wassers während der Löschmittelbeaufschlagung eine große Wärmemenge entzogen wird. In der anschließenden Phase entzieht verdampfendes Wasser dem Brandgut weiterhin Wärme, bis nach ca. 100 s sich die Kurven annähern. Nach ca. 100 s ist kein Einfluß des Löschmittels auf den Verlauf der Wärmestromdichte festzustellen, die Wärmeabgabe des Brandgutes erfolgt aufgrund eines Wärmeaustausches mit der Umgebung. Bei der Verwendung von gasförmigem CO_2 wird die Luft und damit der Sauerstoff in der Umgebung des Brandgutes verdrängt bzw. verdünnt, sodaß die Abkühlung des Brandgutes vom Löscheintritt an auf einem Wärmeaustausch mit der Umgebung beruht.

4.5. Veränderungen der Randbedingungen während der Löschphase

Kühlt man eine heiße Brandgutoberfläche mit einem Wasserstrahl ab, so ist die Bestimmung der Randbedingungen aus theoretischen Überlegungen äußerst schwierig. Gibt man gerade so viel Wasser auf, wie verdampft, so fällt die Oberflächentemperatur vom Maximalwert auf 100 °C. Bei größerer Wasseraufgabemenge kann die Oberflächentemperatur auch unter 100 °C fallen. Es ist auch denkbar, daß nur soviel Wasser aufgegeben wird, daß die Oberflächentemperatur einen Wert über 100 °C annimmt. Mit diesen Vorgängen sind verschiedene Randbedingungen zur mathematischen Lösung der instationären Wärmeleitung verknüpft. Eine Aufklärung dieser Vorgänge ist mit Hilfe des Verlaufes der Biotzahl möglich. Für einen repräsentativen Versuch wurde der zeitliche Verlauf der Biotzahl aus Versuchswerten für eine konstante Umgebungstemperatur von 18 °C durch Umformung nach /15/ mit

$$Bi = \frac{d}{2\Delta x} \cdot \frac{\delta(x=0) - \delta(x=3)}{\delta_{OB} - \delta_{\infty}} \quad (14)$$

bestimmt und im Bild 15 aufgetragen. Das Ansteigen der Biotzahl zu Beginn der Löschphase deutet auf einen hohen äußeren Wärmeübergangskoeffizienten hin, (Randbedingung 1. Art) wie er im Falle von Verdampfung auftritt. Danach fällt die Biotzahl exponentiell bis auf einen konstanten Wert in der Abkühlphase ab. In der Abkühlphase gilt daher die Randbedingung 3. Art mit einem Wärmefluß, der der Differenz zwischen Oberflächen- und Umgebungstemperatur proportional ist.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im hier vorliegenden zweiten Teil der Untersuchungsreihe wurde der Mechanismus der Wärmeübertragung beim Löschen mit Wasser und CO₂ als Löschmittel betrachtet. Als Brandgut wurden Holzbretter mit einheitlicher Maserung verwendet, die bei verschiedenen Abbrandstadien gelöscht wurden. An verschiedenen

Stellen an der Holzoberfläche und im Holzinneern wurden Temperaturen gemessen und mit Hilfe eines Prozeßrechners registriert und ausgewertet. Zur Berechnung der Wärmeströme aus den gemessenen Temperaturen wurde ein Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Holz während der Zersetzung zu Holzkohle aufgestellt. Dieses Modell berücksichtigt irreversible Zersetzungs Vorgänge bei einer Erwärmung der Holzsubstanz. Als Löschmittel wurden neben vollentsalztem Wasser wässrige Fluortensid- und Diammoniumphosphatlösungen sowie gasförmiges CO_2 verwendet. Bezüglich der abgeführten Wärmeströme zeigte sich bei den verwendeten flüssigen Löschmitteln kein Unterschied, sodaß die Abkühlung des Brandgutes gleich war. Bei der Verwendung von gasförmigem CO_2 war der zeitliche Verlauf des abgeführten Wärmestromes von dem zeitlichen Verlauf des abgeführten Wärmestromes verschieden, der mit flüssigen Löschmitteln ermittelt wurde. Damit konnte deutlich der unterschiedliche Löscheffekt von CO_2 (Verdrängung des Luftsauerstoffes) und Wasser (Abkühlung des Brandgutes unter die Zündtemperatur) nachgewiesen werden.

Eine wichtige Voraussetzung zur mathematischen Lösung der instationären Wärmeleitungsvorgänge während des Löschens ist die Annahme von jeweils zutreffenden Randbedingungen. Eine Betrachtung des Verhältnisses von innerem Wärmeleitwiderstand und äußerem Wärmeübergangswiderstand (Biotzahl) zeigte, daß zu Beginn der Löschphase mit flüssigen Löschmitteln ein hoher äußerer Wärmeübergangskoeffizient herrschte (Randbedingung 1. Art). Die Randbedingung änderte sich im Verlauf der Abkühlung des Brandgutes, bis schließlich der Wärmefluß etwa proportional der Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Umgebungstemperatur war (Randbedingung 3. Art).

6. FORMELZEICHEN UND INDICES

A	Konstante
a	Temperaturleitfähigkeit
B	Konstante
Bi	Biotzahl
d	Brettdicke
i	Zeitschritt
K	Ortschritt
K_N	Anzahl der Elemente
\dot{q}	Wärmestromdichte (Wärmestrom pro Fläche)
T	absolute Temperatur
t	Zeit
x	Ortskoordinate
y	Ortskoordinate
z	Ortskoordinate
α	Wärmeübergangskoeffizient
Δ	Differenz
∂	Differential
λ	Wärmeleitfähigkeit
δ	Temperatur
ξ	dimensionslose Ortskoordinate

INDICES

i	Zählindex, Zeitindex
k	Ortsindex
m	gemittelt
Ob	Oberfläche
∞	Umgebung, Gleichgewicht
1,2,3	lfd. Nummer

7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Bryan, J.:
Smith, D.N. The Effekt of Chemicals in
Water Solution on Fire
Extinction
Engineering 159, Part I,
457 Part II (1945)
- /2/ Tamanini, F.: The Application of Water Sprays
to the Extinguishment of Crib
Fires
Technical Report 22359 - 1
Factory Mutual Research (1975)
- /3/ Folke, F.: Über Messung von Löschungs- und
Imprägnierungseffekt durch
Wiegen eines Scheiterhaufens
während der Verbrennung
Das Dänische Feuerschutz-
Komitee Kopenhagen (1934)
- /4/ Kida, M.: Extinction of Fires of Small
Wood Cribs with Sprays of Water
and Some Solutions Report of
Fire Research
Institute Japan Nr. 36 (1973)
- /5/ Tamanini, F.: A Study of the Extinguishment
of Vertical Wood Slabs in Self-
Sustained Burning by Water
Spray Application
Harvard University
Cambridge, Mass., 02139 (1975)

- /6/ Kung,H.C.: Extinction of Wood Crib and
Hill,S.P. Pallet Fires
Combustion and Flame 24
(1975) Nr. 3,S.305-317
- /7/ Salzberg,F.: Minimum Water Requirements
Vodvarka,F.I.; for Suppressing of Room Fires
Maatman,G.C. Fire Technology 6 Nr.1 (1970)
S.22-28
- /8/ Hird,D.;Pickard,R.W.: The Use of High an Low
Fittes,D.W.; Nash,P. Pressure Water Sprays against
Fully Developed Room Fires
Fire Research Note No. 388
März (1959)
- /9/ Stolp,M.: The Extinction of Small Wood
Crib Fires by Water
In: Internationales Brand-
schutzseminar 1976 in Karlsruhe
Karlsruhe: Vereinigung zur
Förderung des Deutschen Brand-
schutzes e.V.(1976)
Bd. 2, S.127-141
- /10/ Royer,K.: Water for Fog Fire Fighting -
Nelson,F.W. How much and how to apply it!
Fire Engineering
August 1959
- /11/ Gross,D.: "Experiments on the Buring of
Cross Piles of Wood"
Journal of Res.Nat. Bureau of
Standards 66 C (2) 99 (1962)

- /12/ Hoffman, W.:
John, R. "Modellbrandversuche"
Forschungsbericht Nr.12 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
1969
- /13/ Brein, D.:
Schatz, H. "Modellbrandversuche zur
Bestimmung des Brandablaufes von
Feststoffbränden"
Forschungsbericht Nr.28 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
1975
- /14/ Fuchs, P.:
Untersuchung der Löschwirkung
verschiedener Löschmittel und
Löschmethoden bei unterschied-
lichen Brandgütern
Forschungsbericht Nr.36 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
1979
- /15/ Martin, H.:
Instationäre Wärmeleitung in
ruhenden Körpern
in: VDI-Wärmeatlas 2.Auflage
Düsseldorf: VDI-Verlag (1974)
Ed1/Ed20
- /16/ Kreyszig, E.:
Statistische Methoden und ihre
Anwendungen
5. Auflage
Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht
1975

- /17/ Patzak,W.: Zur Theorie des Brandgeschehens
von Holz
VDI-Forschungsheft Nr.552
Düsseldorf: VDI-Verlag (1972)
- /18/ Fuchs,P.: Brand- und Löschversuche in
natürlichem Maßstab, um ge-
eignete Löschmittel oder
Kombinationen von Löschmitteln
zu finden, die den bei der der-
zeitigen Brandbekämpfung üb-
lichen Wasserschaden verringern
könnten.
Forschungsbericht Nr.33 der
Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz
1978

8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Versuchsparameter und Anzahl der Versuche.

Löschmittel	Abbrand	Löschmittel- beaufschlagung		Löschzeit	Versuchszahl
		Gew.-%	$10^{-6} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s}) /$		
Wasser	15	21,4	7,3	5	
Wasser	25	21,4	7,3	5	
Wasser	35	21,4	7,3	5	
Wasser	25	21,4	14,3	5	
Wasser	25	96,4	11,8	5	
5 Gew.-% Diammonphosphat	25	21,4	7,3	5	
5 Gew.-% Fluortensid	25	21,4	7,3	3	
5 Gew.-% Fluortensid	25	96,4	11,8	3	
CO ₂ , gasförmig	15	-	5,0	4	
CO ₂ , gasförmig	25	-	5,0	4	
CO ₂ , gasförmig	35	-	5,0	4	

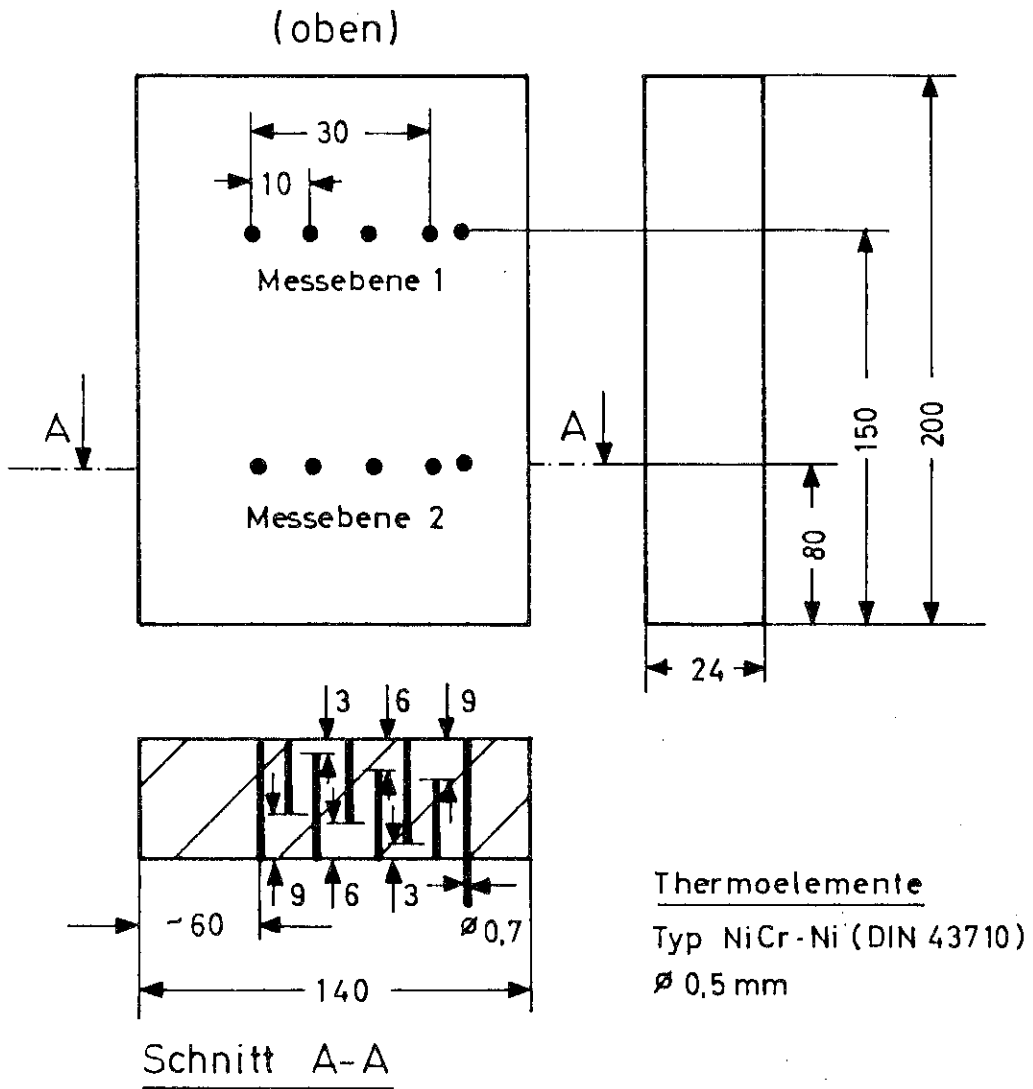
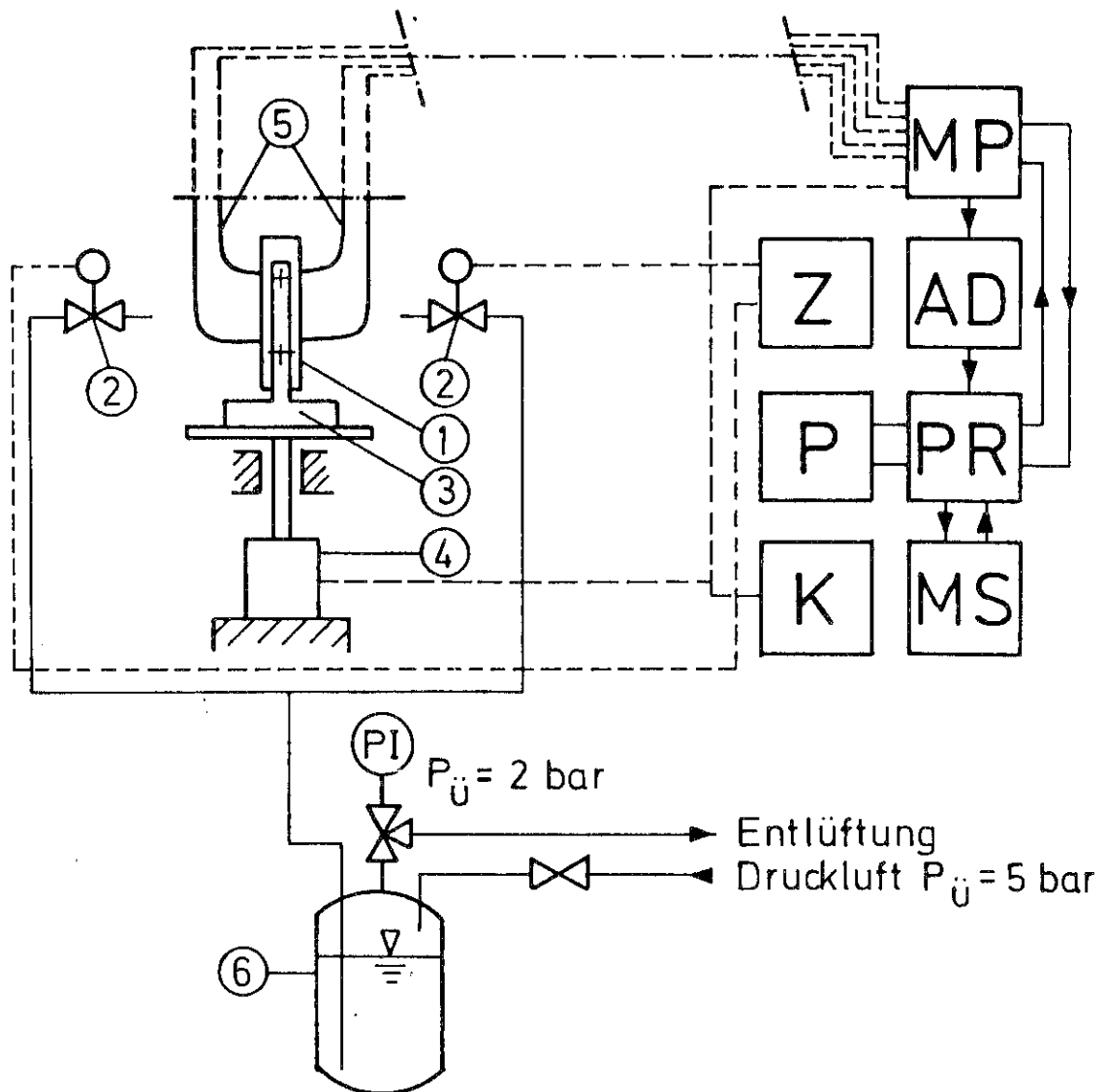


Bild 1. Brandgutabmessungen und Lage der Thermoelemente.



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

Bild 2. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.

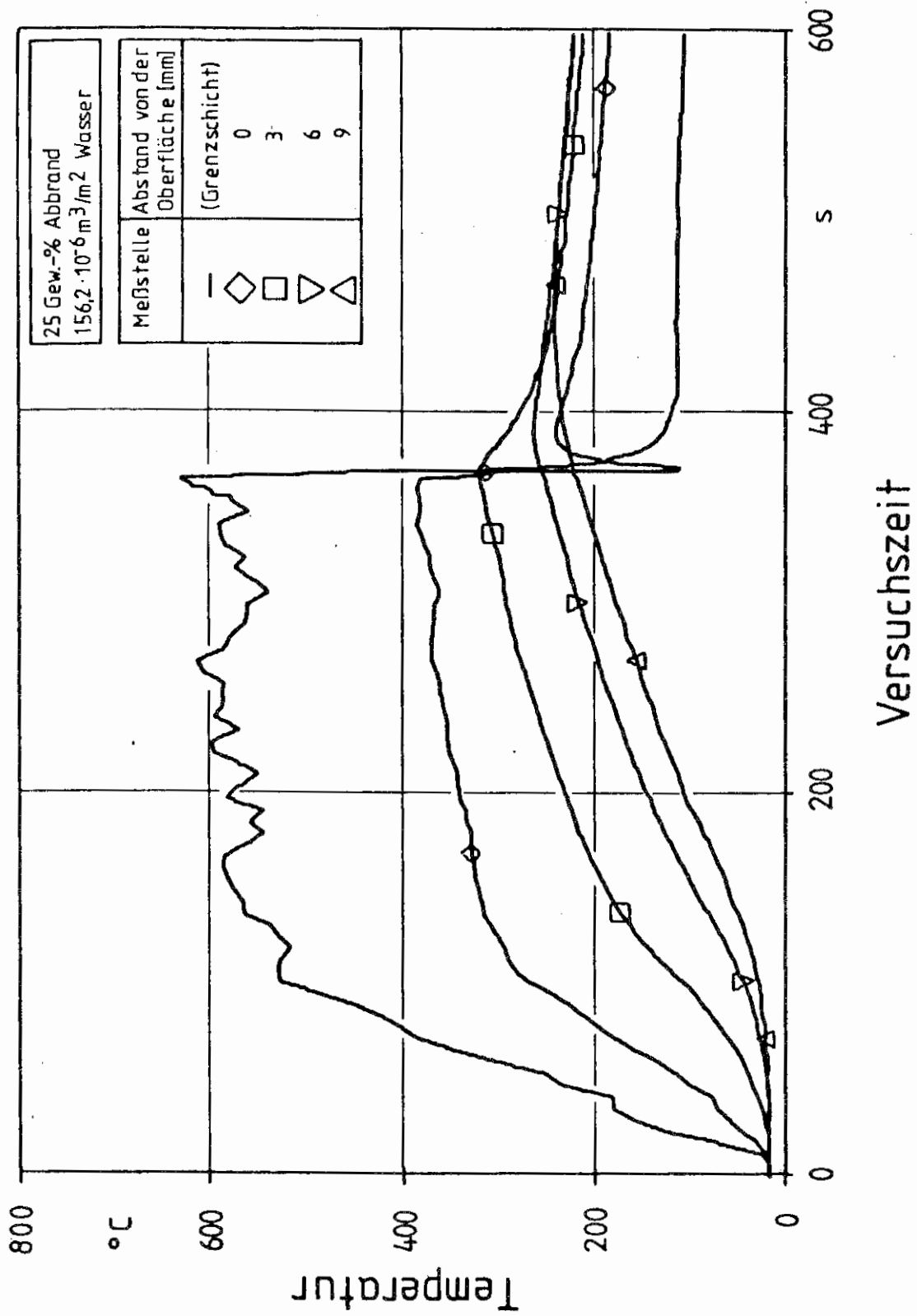


Bild 3. Zeitlicher Temperaturverlauf an den fünf Meßpunkten in einer Meßebeene für einen repräsentativen Versuch.

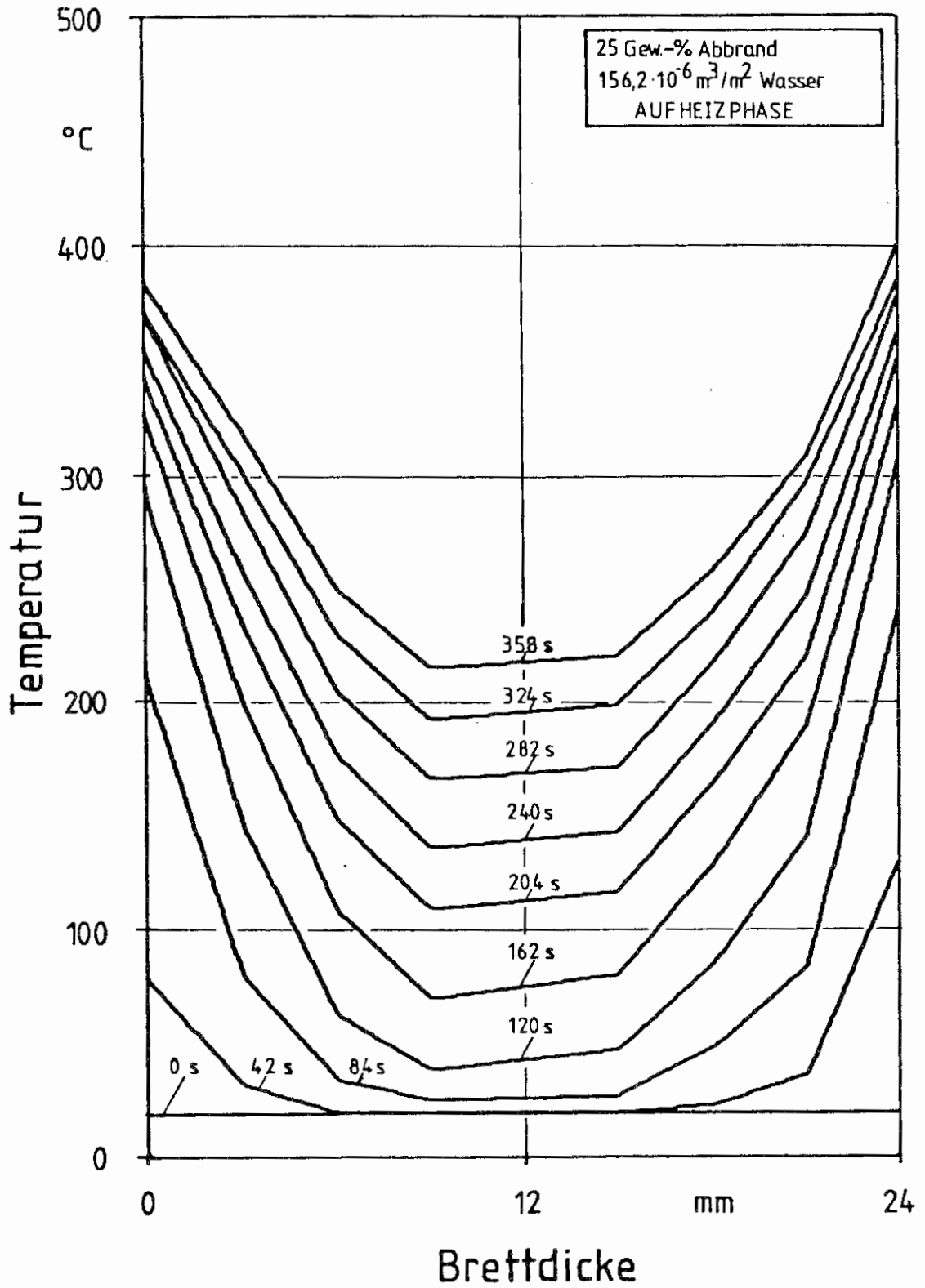


Bild 4. Temperaturverteilung im Innern des Holzes bei verschiedenen Versuchszeiten vor Löscheintritt.

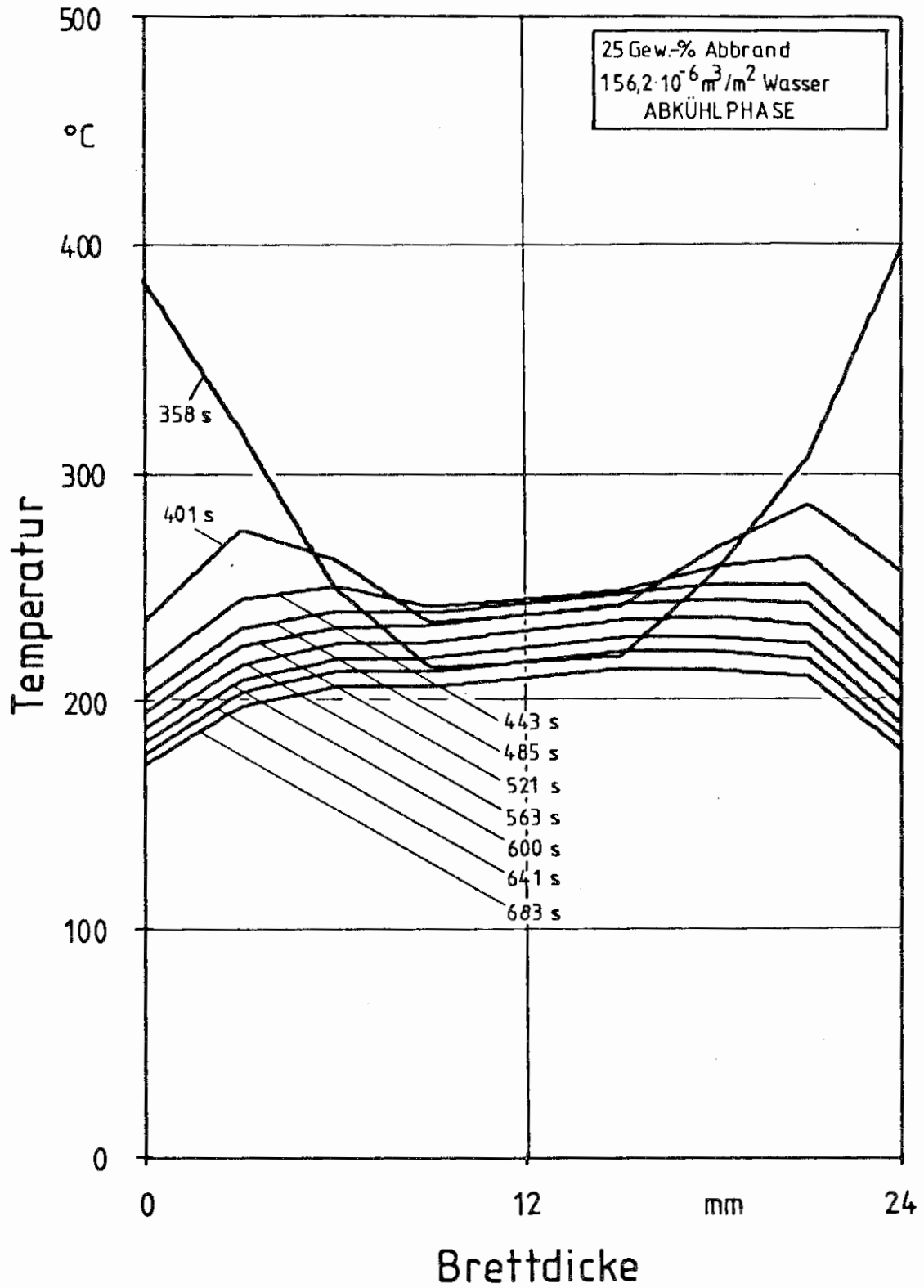


Bild 5. Temperaturverteilung im Innern des Holzes bei verschiedenen Versuchszeiten nach Löschbeginn.

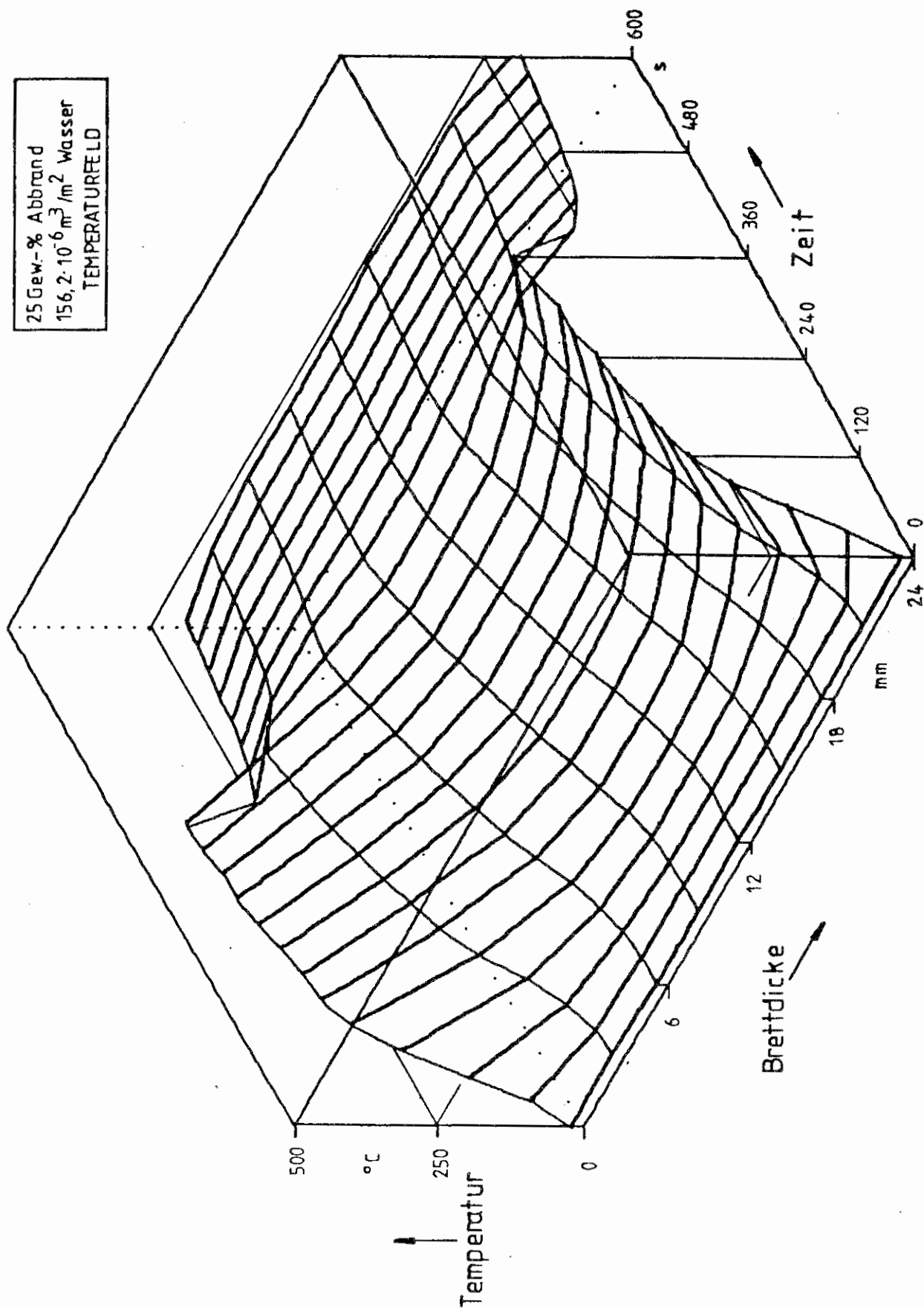


Bild 6. Zeitlicher Verlauf der Temperaturverteilung im Innern des Holzes über der gesamten Versuchszeit.

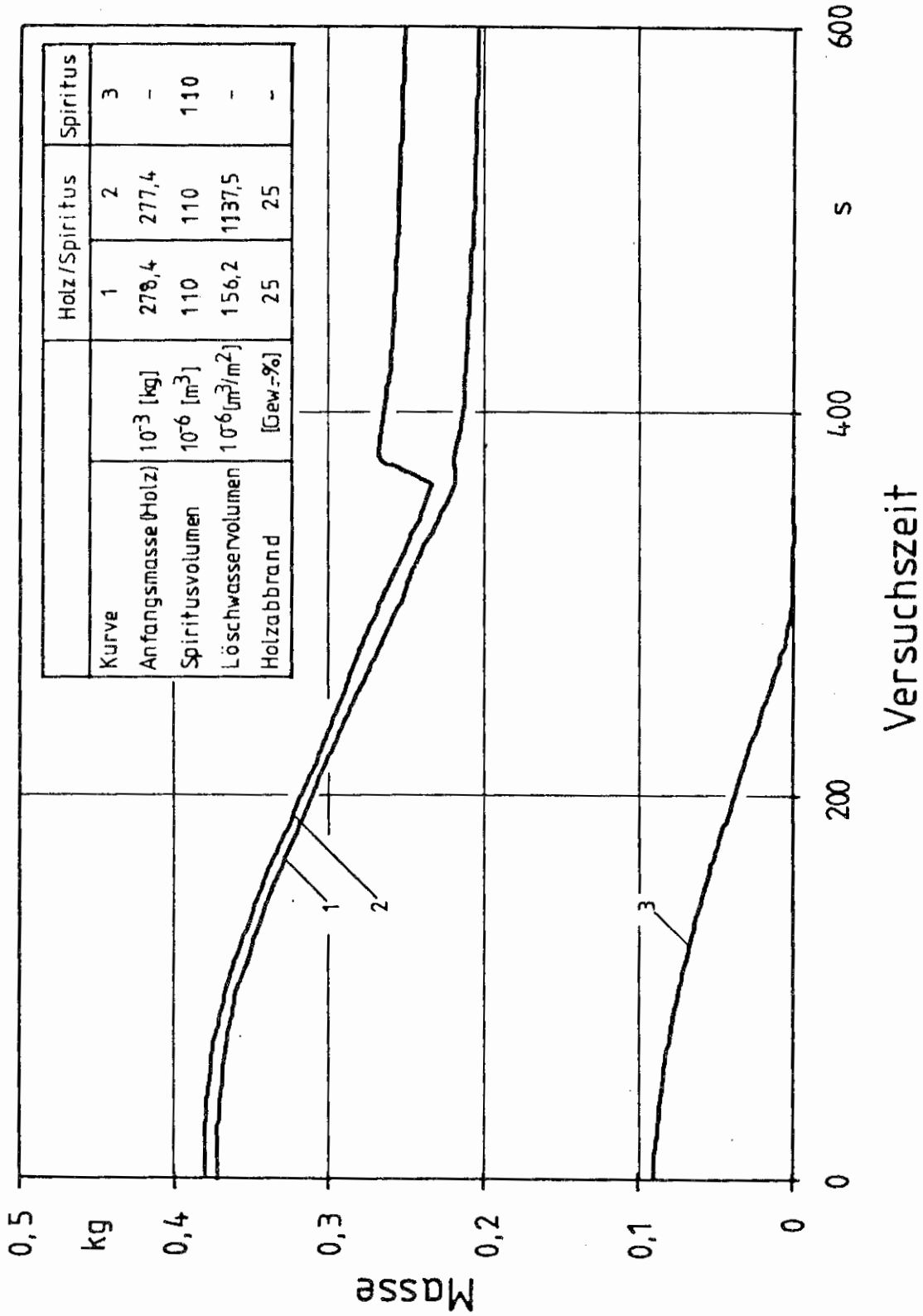


Bild 7. Zeitlicher Massenverlust des Brandgutes (Holz + Spiritus) bei geringer Löschmittelmenge (1), großer Löschmittelmenge (2) und Spiritus alleine (3).

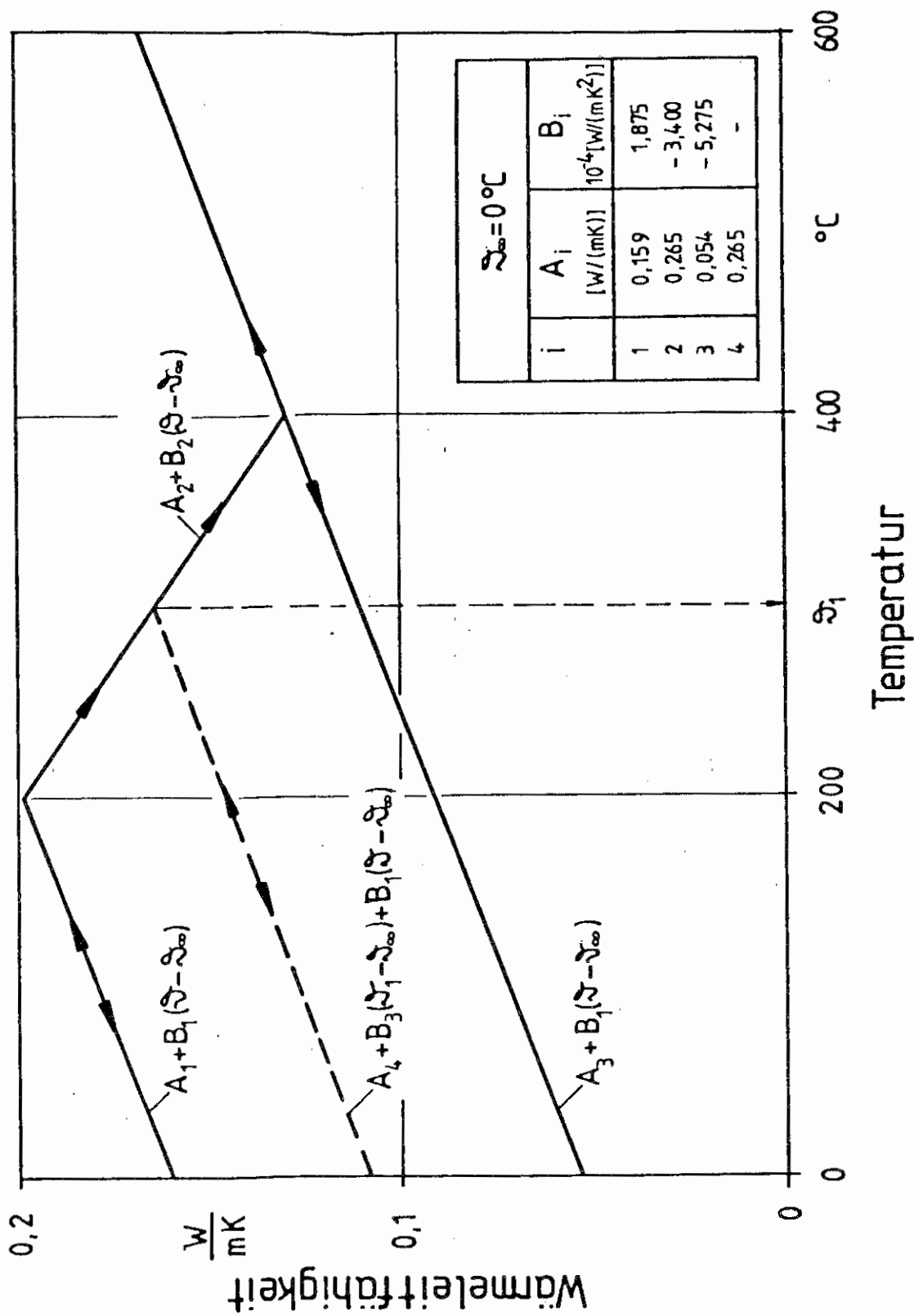
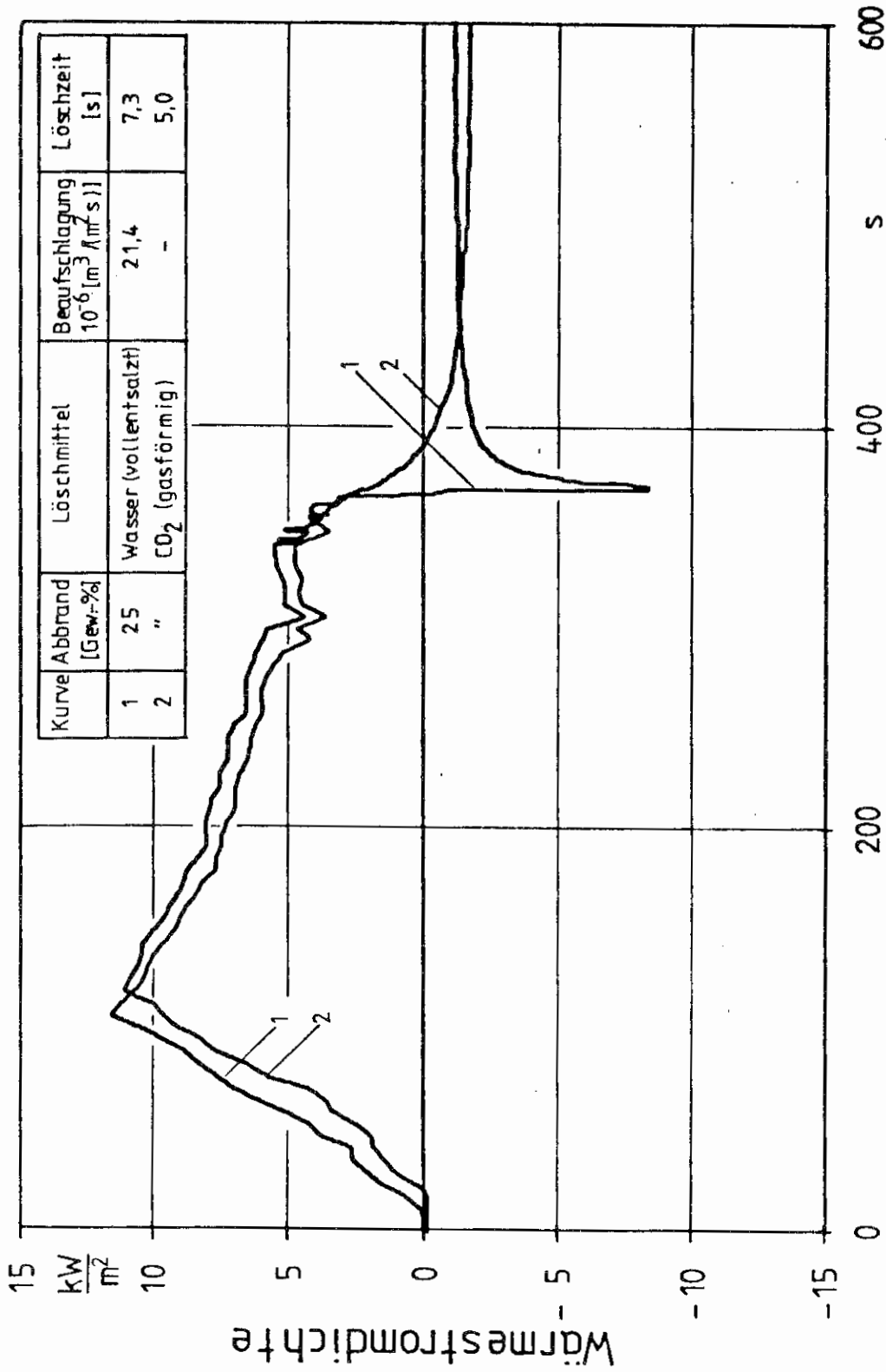
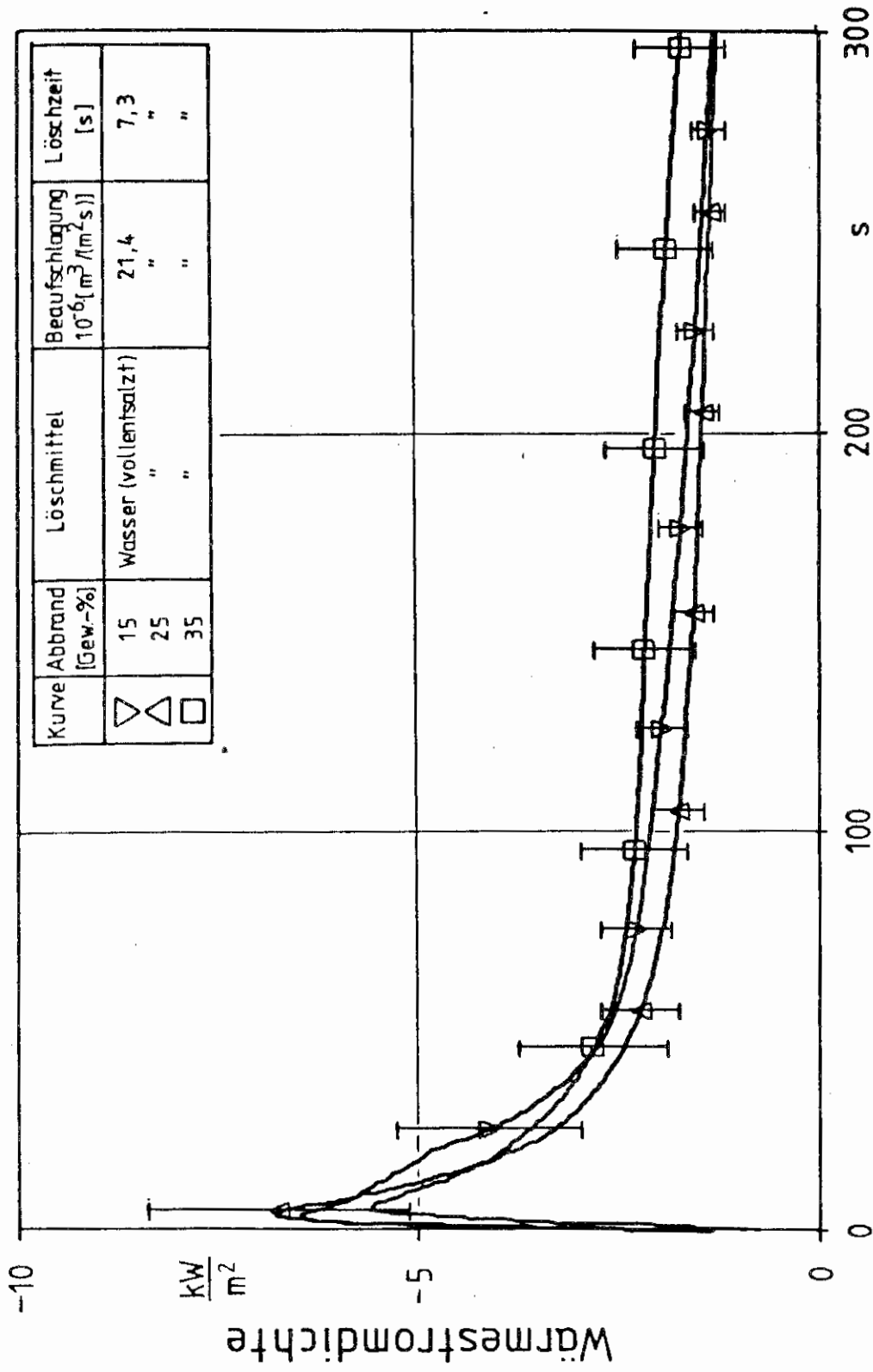


Bild 8. Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ von Holz für den Zersetzungsprozess von Holz zu Holzkohle.



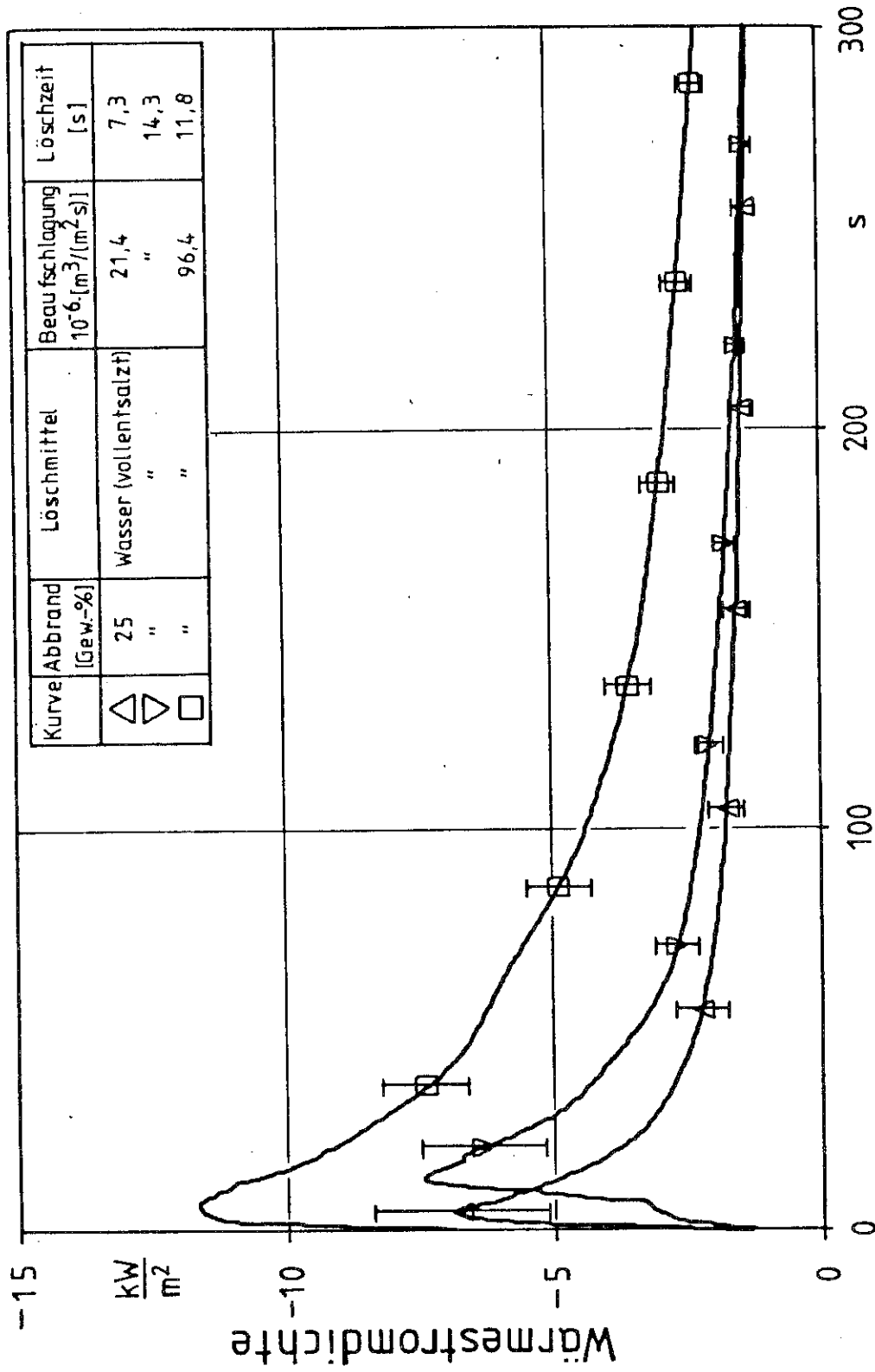
Versuchszeit

Bild 9. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichte bei Benutzung von Wasser (1) und CO₂ (2) als Löschmittel.



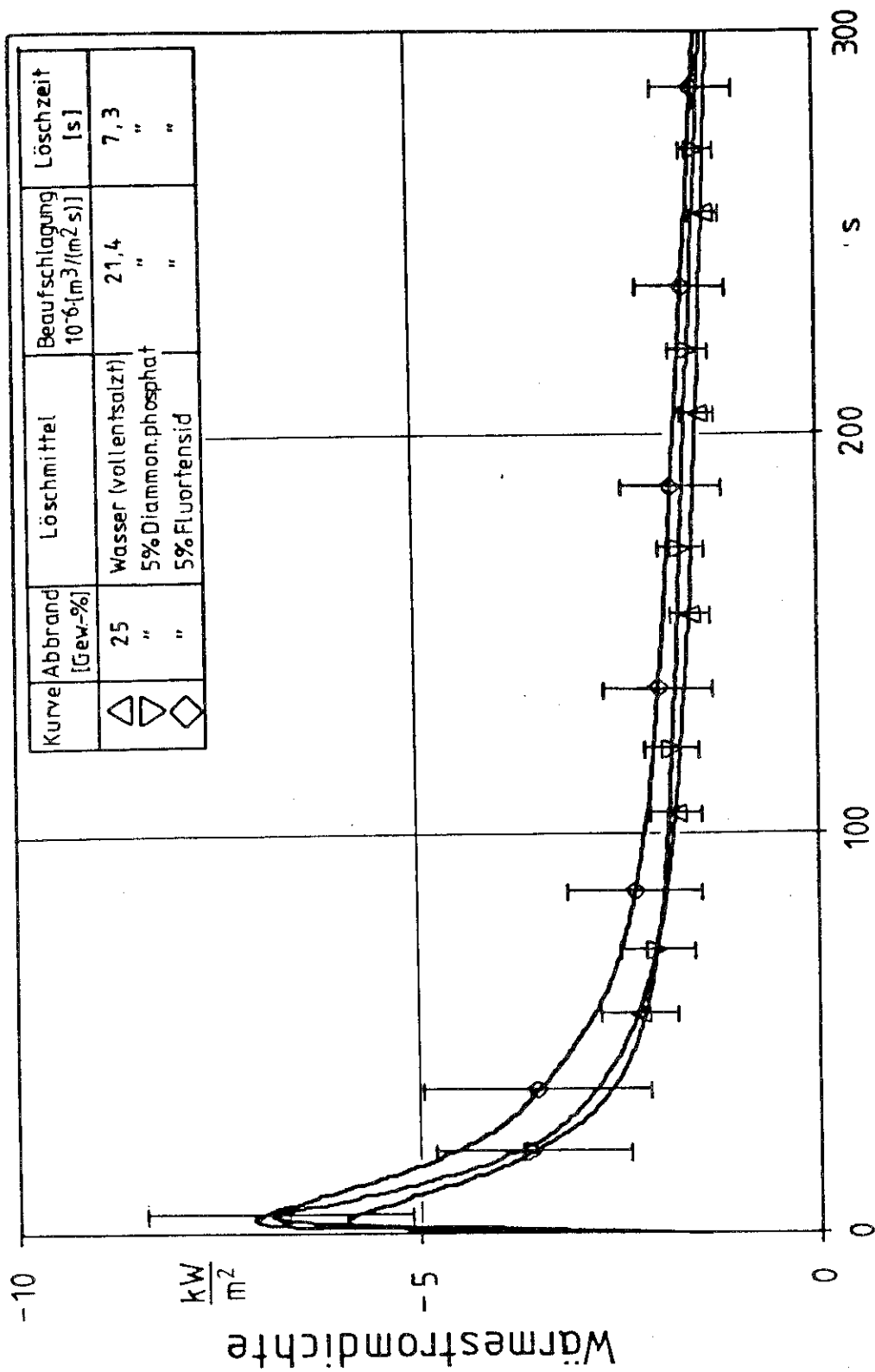
Zeit ab Beginn der Wärmeabgabe

Bild 10. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichten mit Wasser als Löschmittel bei verschiedenen Abbrandstadien.



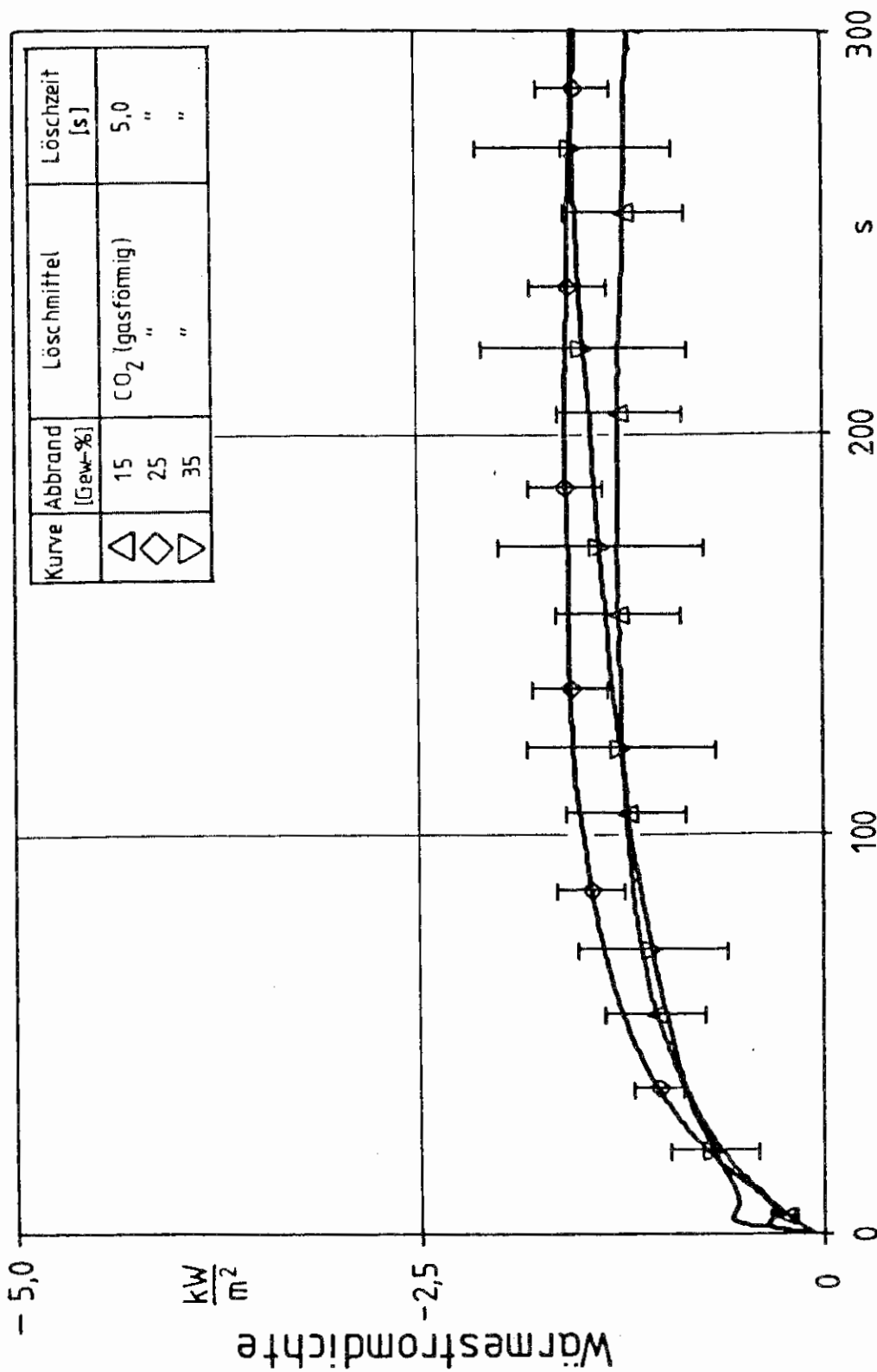
Zeit ab Beginn der Wärmeabgabe

Bild 11. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichten mit Wasser als Löschmittel bei verschiedenen Beaufschlagungsraten.



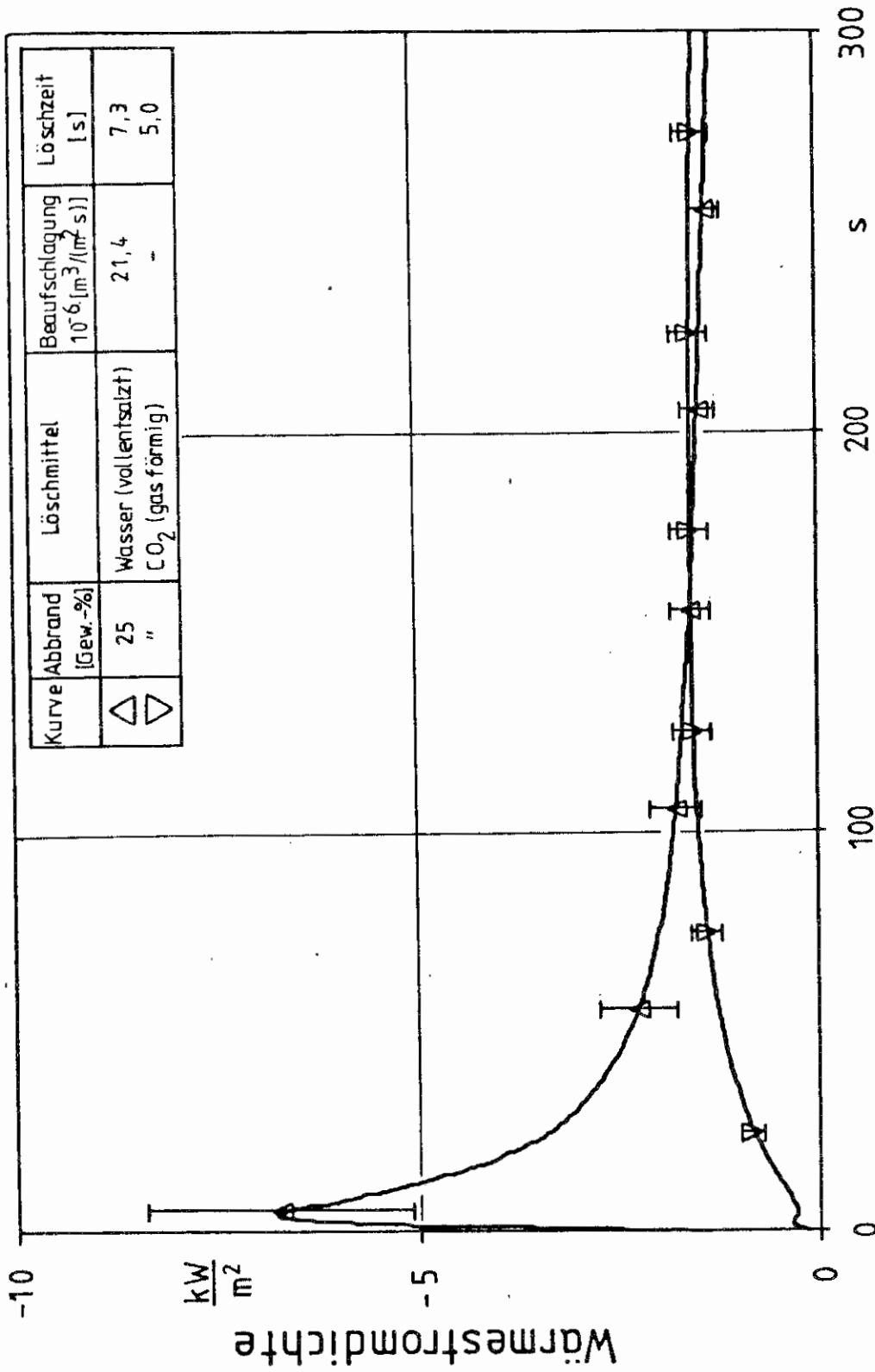
Zeit ab Beginn der Wärmeabgabe

Bild 12. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichten mit Wasser und wässrigen Salzlösungen als Löschmittel.



Zeitlicher Verlauf der Wärmeabgabe

Bild 13. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichten mit CO₂ als Löschmittel bei verschiedenen Abbrandstadien.



Zeit ab Beginn der Wärmeabgabe

Bild 14. Zeitlicher Verlauf der gemittelten Wärmestromdichten mit Wasser und CO₂ als Löschmittel.

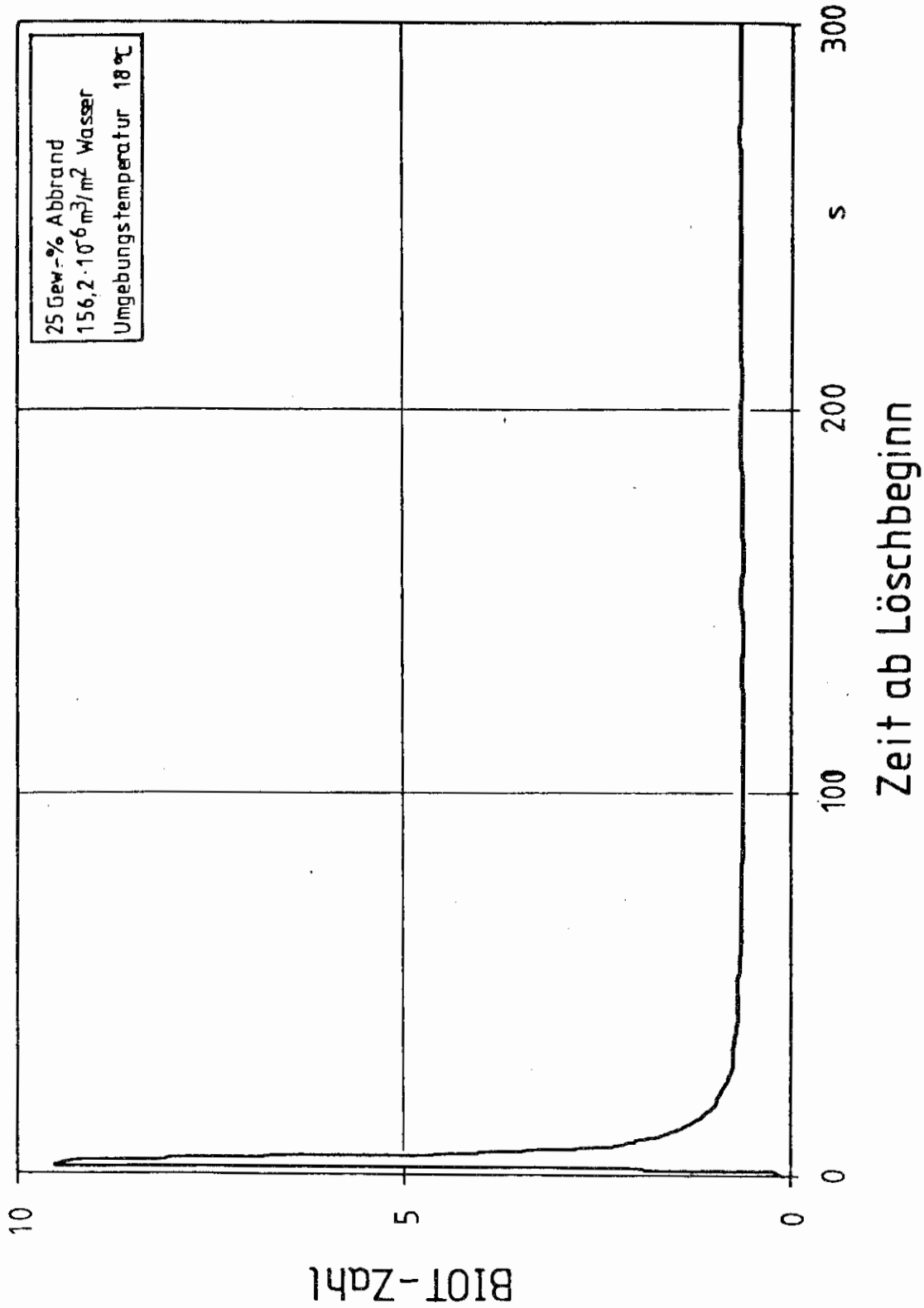


Bild 15. Zeitlicher Verlauf der Biotzahl für einen repräsentativen Versuch mit Wasser als Löschmittel.