

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Teil 4: Brand- und Löschversuche mit unterschied-
lichen Brandstoffen mit und ohne Zusätze
zum Löschwasser und die Bestimmung von
Schadstoffen

119

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ausschuß Feuerwehrrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Forschungsbericht 119

Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Teil 4. Brand- und Löschversuche mit
unterschiedlichen Brandstoffen
mit und ohne Zusätze zum Löschwasser
und die Bestimmung von Schadstoffen

von
Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Oktober 1999

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	2
2.1	Versuchsaufbau und Meßeinrichtung	2
2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	5
2.2.1	Temperatur	9
2.2.2	Abbrand	13
2.2.3	Wärmefreisetzung	15
2.2.4	GC/MS-Analyse	17
3.	VERGLEICH DER MEßERGEBNISSE	20
4.	ZUSAMMENFASSUNG	25
5.	LITERATURVERZEICHNIS	26
6.	TABELLEN UND BILDER	28

1. EINLEITUNG

Brände können durch die unterschiedlichsten Ursachen entstehen. Aufgrund der verschiedenen brennbaren Materialien, deren Zusammensetzung und Anhäufung breiten sich Brände ausgehend von einer Zündquelle unterschiedlich schnell aus. Sie können einerseits ihren Ursprung in natürlichen und andererseits in von Menschen verursachten Ereignissen haben.

Zur Bekämpfung derartiger Brände werden unterschiedliche Löschmittel eingesetzt, die entweder beim mobilen Einsatz durch die Feuerwehren oder durch das Auslösen von ortsfesten Löschanlagen auf den jeweiligen Brandherd gelangen. Als bevorzugtes Löschmittel wird das beinahe überall vorhandene Wasser eingesetzt.

Um einerseits die Effektivität des Löschwassers zu steigern und andererseits das Löschmittel Wasser auch in Bereichen einsetzen zu können, in denen Wasser alleine nicht den gewünschten Lösch-erfolg gezeigt hat, werden sowohl beim mobilen Einsatz als auch bei ortsfesten Löschanlagen dem Löschwasser unterschiedliche Zusatzstoffe beigemischt.

In einem Forschungsvorhaben an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Brandstoffen und Löschmitteln durchgeführt, um weitere Erkenntnisse darüber zu erhalten, wie sich die Zumischung von flüssigen oder pulverartigen Zusätzen zum Löschwasser beim Löscheinsatz auswirkt. Bei diesen Zusatzstoffen handelt es sich um sogenannte "Quellkörper", die in Verbindung mit Wasser ihr Volumen vergrößern. Dadurch wird eine höhere Viskosität des Löschmittels erreicht. Beim Versprühen mit Düsen bleiben diese Löschmittelgemische besser als Wasser ohne Zusätze auf der Oberfläche des zu löschenden Brandgutes haften.

Der vorliegende Bericht umfaßt Untersuchungen mit unterschiedlichen Brandstoffen, bei denen derartige Quellkörper als Zusätze zum Löschwasser in verschiedenen Konzentrationen verwendet wurden. Bei Brandversuchen wurde die Löschwirksamkeit des jeweili-

zum Löschwasser in verschiedenen Konzentrationen verwendet wurden. Bei Brandversuchen wurde die Löschwirksamkeit des jeweiligen Löschmittelgemisches mit dem Löschmittel Wasser ohne Zusätze verglichen.

Bei den Brandversuchen wurden brennende Holzkippen, Kunststoffkästen, mit Kunststoffflaschen befüllte Kartons und Sekundärrohstoffe aus Kunststoff in Ballenform abgelöscht.

2. BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

2.1 Versuchsaufbau und Meßeinrichtung

In der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) mit den Abmessungen 30 m * 15 m * 12 m (L*B*H) wurden Löschversuche mit unterschiedlichen Brandstoffen und dem Löschmittel Wasser mit und ohne Zusätze durchgeführt. Eine schematische Übersicht der einzelnen Versuchsaufbauten ist in den Bildern 1 bis 5 dargestellt. Als Brandstoffe wurden Holzkippen (Bild 1), Kunststoffkästen aus Polypropylen (Bild 2), Kunststoffflaschen in Pappkartons (Bild 3) und Recyclingmaterial in Form von gepreßten Kunststoffballen (Bilder 4, 5) verwendet.

Bei den Versuchen mit Holzkippen wurden jeweils 6 Lagen mit je 4 bzw. 5 Stäben mit den Abmessungen 4 cm * 4 cm * 30 cm bzw. mit 4 cm * 4 cm * 40 cm und 5 cm * 5 cm * 50 cm übereinander aufgeschichtet (Bild 1). Die verwendeten Kunststoffkästen hatten die Abmessungen 60 cm * 40 cm * 12 cm und wurden in 4 bzw. 5 Lagen zu je 2 Kästen aufeinander gestapelt (Bild 2). Bei den Versuchen mit Pappkartons wurden 10 Kartons in 3 Lagen angeordnet, wie es in Bild 3 dargestellt ist. In jedem Karton befanden sich jeweils 12 leere Kunststoffflaschen. Bei den gepreßten Sekundärrohstoffen handelte es sich um modifizierte Kunststoffballen mit den Abmessungen von je ca. 1 m * 0,8 m * 0,6 m (L * H * B), was einem Volumen von ca. 0,5 m³ entsprach (Bild 4). Bei einem weiteren Versuch wurden 8 halbierte Kunststoffballen in 2 Lagen überein-

ander gestapelt (Bild 5). Dies entsprach einem Volumen von ca. 4 m³ und einem Gesamtgewicht von ca. 1400 kg. Bei diesem Versuch befanden sich in einer Höhe von 6,80 m über dem Waageboden unterhalb des Daches jeweils ein optischer - und ein Ionisationsbrandmelder (B1, B2), um deren Auslöseverhalten zu erfassen.

Die Zündung des jeweiligen Brandgutes erfolgte mit einer Menge zwischen 100 ml und 2 l n-Heptan und teilweise, um schneller einen gleichmäßigen Vollbrand bei den Kunststoffballen zu erreichen, zusätzlich mit einem Gasbrenner. Die Größe der Zündwannen variierte entsprechend der verwendeten Heptanmenge von 15 cm * 15 cm bis 40 cm * 40 cm. Die Lage der Zündwanne ist jeweils in den Bildern 1 bis 5 gekennzeichnet.

Als Löschdüsen wurden handelsübliche Vollkegeldüsen mit unterschiedlichen Sprühwinkeln und Sprühköpfe mit mehreren Wassernebeldüsen eingesetzt. Der Sprühwinkel der Vollkegeldüsen lag zwischen 60° und 120°. Der an der jeweiligen Düse durchgesetzte Volumenstrom betrug je nach verwendetem Düsentyp und Art des eingesetzten Löschmittels bei vorgegebenen Druckeinstellungen zwischen 5 l/min und 26 l/min für jede Düse.

Als Löschmittel wurden sowohl Wasser in Trinkwasserqualität ohne Zusätze, im folgenden als "Löschwasser" bezeichnet, und Wasser mit den Zusätzen A bzw. B in unterschiedlichen Konzentrationen, im folgenden als "Löschmittel A" bzw. als "Löschmittel B" bezeichnet, verwendet.

Bei einem Teil der Untersuchungen befand sich die Düse zunächst als Einzeldüse zentral über dem Brandgut. Bei weiteren Versuchen wurde je eine Düse seitlich oberhalb des Brandgutes angeordnet, um größere Flächen des Brandgutes mit Löschmittel beaufschlagen zu können. Ein zusätzlicher Brand- und Löschversuch wurde mit Spühköpfen mit mehreren Wassernebeldüsen durchgeführt. Der dabei durchgesetzte Volumenstrom betrug ca. 60 l/min je Sprühkopf beim Einsatz von 2 Sprühköpfen bzw. ca. 55 l/min je Sprühkopf beim Einsatz von 4 Sprühköpfen. Die jeweilige Lage der Düsen bzw.

Sprühköpfe ist in den Versuchsanordnungen auf den Bildern 1 bis 5 zu erkennen.

Bei mehreren Versuchen wurde das Brandgut auf einer Waage angeordnet, so daß es möglich war, den Massenverlust dieses Brandgutes während des Versuchsablaufes zu registrieren. Zusätzlich wurden an den in den Bildern 1 bis 5 gekennzeichneten Stellen Thermoelemente (T01 bis T03, T1 bis T6, TS0 bis TS4, TZ) angebracht, um sowohl die Brandentwicklung als auch die Abnahme der Flammen beim Löschvorgang besser beurteilen zu können.

Die Analysen der bei den Brandversuchen mit Sekundärrohstoffen in Ballenform auftretenden Schadstoffe wurde mittels der an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhandenen Meßtechnik durchgeführt. Es handelt sich hierbei um die sehr komplexe GC/MS Analyse. Das Verfahren der GC/MS-Analyse wurde bezüglich der Probenahme, der Qualitätssicherung und des Einsatzes eines Thermodesorbers so optimiert, daß quantitative Analysen von Brandrauch reproduzierbar möglich sind. Schadstoffmessungen dieser Art wurden bei den über eine längere Versuchszeit andauernden Brandversuchen mit Kunststoffballen durchgeführt.

Mit einer in der Versuchshalle installierten Rauchgasreinigungsanlage können die entstehenden Brandgase mit einem Volumenstrom von bis zu 35.000 m³/h abgesaugt werden. Bei den in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen wurden die Brandgase mit einem geringen konstant eingestellten Volumenstrom von ca. 7.000 m³/h aus der Versuchshalle abgesaugt und der Rauchgasreinigungsanlage zugeführt. Die beim Absaugen entstandenen Luftströmungen innerhalb der Versuchshalle waren dabei so gering, daß dadurch keine Beeinflussung des Brandablaufs entstand.

Die Wasserversorgung erfolgte über einen während des Löschvorganges auf konstantem Druck gehaltenen Windkessel, aus dem das jeweilige Löschmittel (Wasser oder vorgemischtes Löschmittelgemisch) über eine Rohrleitung zu den Düsen gelangte. Bei einem Versuch wurde das Löschwasser mit einer Kreiselpumpe zu den

Sprühköpfen gefördert. Das Auslösen der Löschmittelzufuhr erfolgte bei allen Versuchen durch manuelle Betätigung. Der Löscheinsatz selbst erfolgte nach Kriterien wie der Versuchszeit, der Vorbrennzeit, der Brandausbreitung, der Vollbrandphase oder auch dem Erreichen von Temperaturen und Auslösezeitpunkten von installierten Brandmeldern.

2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Bei den Untersuchungen wurden als Brandgut die bereits erwähnten Materialien verwendet. Die Brandentwicklung und der Versuchsablauf wurde anhand von Videoaufzeichnungen und Fotos dokumentiert. Die Bilder 6 bis 14 zeigen einerseits den Versuchsaufbau und geben andererseits einen Eindruck des Versuchsablaufes wieder. Wie bereits erwähnt, wurden die Versuchsbrände mit Löschwasser oder den Löschmitteln A bzw. B abgelöscht.

In Bild 6 ist beispielhaft ein Versuch mit einer Holzkrippe abgebildet, bei der in einer Lage 4 Stäbe angeordnet waren. Bild 6a zeigt die brennende Holzkrippe vor dem Löscheinsatz nach einer Versuchszeit von 8 min 38 s. Um einen voll entwickelten Brand zu bekommen, betrug bei dieser Holzkrippe die Vorbrennzeit 10 min. In Bild 6b ist der Löscheinsatz mit Wasser mit einer Düse mit einem deutlich erkennbaren Sprühwinkel von 60° zu erkennen. Durch den Sprühstrahl wurden sowohl die Flammen als auch der Brandrauch zur Seite weggedrückt. Bild 6c zeigt die abgelöschte Holzkrippe nach dem Brand.

Bild 7 zeigt einen Versuch mit einer Holzkrippe mit 5 Stäben in einer Lage. Bild 7a zeigt die brennende Holzkrippe nach einer Versuchszeit von 8 min 45 s. Auch hier betrug die Vorbrennzeit wie zuvor 10 min. In Bild 7b wird der Löscheinsatz mit Wasser mit einer 0,5 %igen Zumischung des Zusatzes A aus einer Düse mit einem Sprühwinkel von 60° durchgeführt. Die Flammen werden auch hier vom Sprühstrahl weggedrückt. Im Gegensatz zu Bild 6 ist hier nur wenig Brandrauch vorhanden. Bild 7c zeigt die abge-

löschte Holzkrippe mit einer aufsteigenden Rauchsäule und die vom Löschmittelzusatz herrührenden Spuren in der Auffangwanne.

Bild 8 zeigt den Aufbau mit 5 Lagen Kunststoffkästen aus Polypropylen auf einer Holzpalette. Während bei gleichem Versuchsaufbau die Kunststoffkästen auf Bild 8a (links oben) nach einer Versuchszeit von 7 min 30 s bereits begonnen in der Mitte zusammenzusinken, standen die Kästen in Bild 8b (rechts oben) bei einem weiteren Versuch nach einer Versuchszeit von 12 min gerade noch aufeinander. Der Löscheintritt erfolgte mit einer zentral angeordneten Düse. Bei beiden Versuchen ist zu erkennen, daß ca. 2 min nach dem Löscheintritt der Versuchsaufbau durch das Abschmelzen des Kunststoffes trotz Löschmittels zusammensank und die noch vorhandenen Flammen durch die Kästen vom Löschmittel abgeschirmt wurden, so daß das Brandgut nicht vollständig gelöscht werden konnte. In Bild 8c (links unten) wurde mit Wasser und in Bild 8d (rechts unten) mit Wasser mit dem Zusatzmittel A gelöscht. Aufgrund des Abschirmeffektes wurden keine weiteren Versuche mit Kunststoffkästen durchgeführt. Die großen Zeitdifferenzen bis zum Löscheintritt waren bedingt durch die unterschiedliche Brandausbreitung zu Beginn des Brandes.

Bild 9 zeigt einen modifizierten Preßballen in unterschiedlichen Brandstadien. Bild 9a zeigt den Brandfortschritt nach einer Versuchszeit von 12 min. In Bild 9b umhüllen die Flammen den gesamten Ballen. In Bild 9c ist der Brand voll entwickelt. Die Flammen schlagen mehrere Meter hoch und die Wärmeentwicklung ist beträchtlich.

Bild 10 zeigt einen Kunststoffballen beim Löscheintritt mit einer Düse mit einem Sprühwinkel von 90° . In den Bildern 10a und 10b ist deutlich zu erkennen, daß mit einer zentralen Düse die Flammen an den Ecken des Kunststoffballens nicht gelöscht werden konnten, weil der Sprühkegel des Löschmittels nur die horizontale Oberfläche des Ballens erreichte und die Flüssigkeit auf den Seiten und nicht über die Ecken herunterlief. Die Abfließspuren sind gut erkennbar.

Der Sprühkegel der Düse verringerte sich auf Werte unter 90° , wenn dem Löschwasser die Zusätze A oder B zugemischt wurden. Grund dafür war die dadurch bedingte höhere Viskosität des jeweiligen Löschmittels, die zu einem höheren Druckabfall in der Rohrleitung führte, so daß beim Austritt aus der Düse der für Löschwasser geltende Austrittswinkel von 90° nicht mehr erreicht wurde. In Bild 10b beim Einsatz des Löschmittels B mit einer Zumischung von 1% ist deutlich zu erkennen, daß bei diesem Versuch der Sprühwinkel nur noch ca. 45° betrug. Die brennenden Ecken des Kunststoffballens wurden später mit dem Strahlrohr abgelöscht. Die Bilder 10c und 10d zeigen beim Einsatz des Löschmittels A mit Zumischungen von 0,5% und 1% die bei steigender Zumischung von Quellkörpern zunehmende Schichtenbildung auf der horizontalen Oberfläche des Brandgutes und das zähere Abfließen auf den Seiten. Dadurch wird einerseits das Brandgut weitgehend abgekühlt und andererseits die Sauerstoffzufuhr auf die Oberfläche stark vermindert. Auf diese Weise wird die erneute Flammenbildung erschwert.

In Bild 11 ist als Brandgut eine Holzkrippe mit 6 Lagen zu je 5 Stäben diagonal zu zwei seitlich installierten Düsen mit einem Sprühwinkel von 120° angeordnet. Bild 11a zeigt die Ausbreitung der Flamme innerhalb der ersten 5 min mit einer langen schmalen Flamme und Bild 11b die Phase während des konstanten Abbrandes nach einer Vorbrennzeit von 15 min mit einer kürzeren die gesamte Oberfläche der Holzkrippe erfassenden Flamme. Bild 11c zeigt die Holzkrippe kurz nach Beginn des Löscheinsatzes mit Löschwasser nach einer Versuchszeit von 16 min. Auf Bild 11d ist eine mit dem Löschmittel A gelöschte Holzkrippe mit einer Rauchsäule nach einer Versuchszeit von 22 min abgebildet. Bei einer nicht vollständig gelöschten Holzkrippe (hier Löschmittel A) können sich, wie in Bild 11e nach einer Versuchszeit von 23 min 22 s zu erkennen ist, wieder kleine Flammen bilden, die sich anschließend je nach Art des Löschmittels mehr oder weniger schnell ausbreiten.

Bild 12 zeigt als Brandgut die auf einer Holzpalette gestapelten

10 Pappkartons mit je 12 leeren Kunststoffflaschen als Inhalt. Der Aufbau ist diagonal zu den zwei Düsen mit einem Sprühwinkel von 120° angeordnet. Bild 12a zeigt die Brandphase nach einer Versuchszeit von ca. 3 min. In Bild 12b ist der kurz darauf beginnende Löscheinsetz mit Löschwasser abgebildet. Die Bilder 12c bzw. 12d zeigen das Brandgut nach den erfolgreichen Löscheinsetzungen mit dem Löschmittel B (1,5%) bzw. Löschwasser nach einer Versuchszeit von ca. 5 min.

Bild 13 zeigt den Brand eines halben Kunststoffballens auf einer Holzpalette in diagonaler Anordnung zu den beiden Düsen mit einem Sprühwinkel von 120° . In Bild 13a umhüllen die Flammen den gesamten Ballen. Bild 13b zeigt den Beginn des Löscheinsetzes mit dem Löschmittel B (1,5%) bei einem im Vollbrand befindlichen Ballen. Anhand dieses Bildes kann sehr deutlich gezeigt werden, daß der für Wasser vorgegebene Sprühwinkel der Düsen von 120° beim Einsatz der Löschmittel A oder B in löschtfähigen Konzentrationen auf Sprühwinkel zwischen 40° und 70° abnahm, was auf die Änderung des Vordruckes infolge der Zunahme der Viskosität und der dadurch bedingten Reibungsverluste in der Rohrleitung zurückzuführen war. In Bild 13c ist die Schichtenbildung des Löschmittels B (1,5%) auf dem Ballen und das seitliche Herunterfließen sowie die Stromlinien des Löschmittels in der Auffangwanne deutlich zu erkennen. Kleinere auf den Seiten des Ballens befindliche Flammen wurden zwar nicht vollständig gelöscht, konnten sich aber aufgrund des anhaftenden Löschmittels auch nur langsam wieder entwickeln.

Bild 14 zeigt einen Versuchsaufbau mit acht zu je vier in zwei Lagen aufeinander gestapelten halben Kunststoffballen und die seitlich neben und oberhalb der Ballen installierten Sprühköpfe. Wie in Bild 14a zu erkennen ist, schlagen die Flammen nach einer Versuchszeit von 1 min oben aus dem Stapel heraus. Nach einer Versuchszeit von 4 min brennt das Innere des Stapels wie auf Bild 14b ersichtlich.

Der Löscheinsetz erfolgte nach einer Versuchszeit von 4 min 8s.

Die beiden Brandmelder (Bild 5: B1, B2) lösten bereits nach einer Versuchszeit von 20 s aus. Bild 15 zeigt die Auslösekurven beider Brandmelder. Um den Löscheintritt nicht zu früh einzuleiten, wurde der Löscheintrittszeitpunkt so gewählt, daß einerseits 2 Indikatorsprinkler (Bild 5: SP1, SP2) auslösten und andererseits nach weiteren 30 s insgesamt an 5 Temperaturmeßstellen (Bild 5: TS0 bis TS4) in einer Höhe von 6,8 m über der Zündstelle Werte von ca. 160 °C erreicht wurden. Diese Temperatur in Sprinklernähe reicht in den meisten Fällen aus, um einen Glasfaßsprinkler mit einer Auslösetemperatur von 68°C auszulösen. Bild 14c zeigt den Einsatz von 2 Sprühköpfen (Bild 5: SK1, SK2) der Wassernebelanlage seitlich oberhalb des Versuchsaufbaus. Durch die Beaufschlagung wurden die Flammen auf der Oberseite gelöscht, konnten jedoch an der nicht direkt beaufschlagten Längsseite zwischen den Kunststoffballen herausschlagen. Die zwischen den Ballen liegenden und nicht vom Sprühstrahl erfaßten Brandbereiche wurden nach einer Versuchszeit von mehr als 22 min manuell abgelöscht. Nach dem Auslösen der Löschanlage wurde keine weitere Brandausbreitung festgestellt.

2.2.1 Temperatur

Die Bilder 16 bis 22 zeigen den Verlauf der Temperaturen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei den Versuchen mit Kunststoffballen als Brandgut (Tabelle 3: V24 bis V30). Es ist zu erkennen, daß die Temperaturwerte zuerst an den Meßstellen T3 und T4 (Bild 4) ansteigen, da die Flammen von der Zündwanne ausgehend seitlich an dem jeweiligen Ballen emporstiegen. Die restliche Oberfläche wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfaßt. Um jedoch zu gewährleisten, daß die gesamte Oberfläche brannte, wurde diese zusätzlich mit einem Gasbrenner entzündet, was insbesondere an den Temperaturspitzen der Meßstellen T3 und T4 zu erkennen ist. Nachdem sich nach visuellen Gesichtspunkten ein Vollbrand entwickelt hatte und der betreffende Kunststoffballen mehrere Minuten auf der gesamten Oberfläche brannte, wurde der Löscheintrittszeitpunkt mit zwei Düsen mit den Sprühwinkeln von 120° ein-

geleitet.

Bei Versuch V30 (Tabelle 3) war, wie sich aus dem Verlauf der Temperaturen in Bild 22 ergibt, bis zum Erreichen des Vollbrandes und damit auch bis zum Auslösen der Löschanlage eine wesentlich längere Zeit als bei vergleichbaren Versuchen erforderlich. Dies war wohl auf die nicht immer einheitliche Zusammensetzung der Kunststoffe bei diesem Ballen zurückzuführen.

Die Temperaturwerte lagen an den Meßstellen T3 und T4 seitlich oder T5 (ca. 1 m über dem Ballen) bei max. 800 °C bis 900 °C (Bild 4). Welche Temperatur zu welchem Zeitpunkt die Höhere war, hing direkt von der Flammenbildung in der Nähe des jeweiligen Thermoelementes ab. Die Temperatur an der Meßstelle T6 stieg auf ca. 300 °C und an den Meßstellen T1 und T2 auf Werte von etwa 150 °C bis 200 °C an.

Bei den Versuchen V24 bis V30 (Tabelle 3) wurden als Löschmittel sowohl Löschwasser als auch als auch die Löschmittel B (1,5%) und A (1%) verwendet. Die Bilder 16 bis 22 zeigen unabhängig vom verwendeten Löschmittel beim Löscheintritt an allen Temperaturmeßstellen deutlich den steilen Abfall auf Temperaturen von ca. 100 °C und niedriger. Kleinere Temperaturerhöhungen danach lassen auf einzelne Flammen schließen, die jedoch nach kurzer Zeit wieder erloschen waren. Aus den Temperaturen in den Bildern nicht zu erkennen sind dagegen die meist an den Ecken der Kunststoffballen aufgetretenen und nicht vollständig gelöschten kleineren Flammen, die unabhängig von der Art der hier verwendeten Löschmittel immer vorhanden waren. Diese Restflammen wurden anschließend mit dem Strahlrohr abgelöscht.

Eine Ausnahme bildete der Versuch V25 (Bild 17). Der Löscheintritt mit dem Löschmittel B (1,5%) erfolgte nach einer Versuchszeit von 6 min 40 s beim gleichen Vordruck im Löschmittelbehälter wie bei Versuch V24 (Bild 16) mit Löschwasser. Das Wasser-Quellkörper-Gemisch wurde jedoch wegen der höheren Viskosität nicht richtig versprüht. Auf einer Seite des Kunststoffballens

(Meßstellen T2 und T4) machte sich dies in einem kleineren Temperaturabfall bemerkbar. Die Brandintensität wurde dadurch nicht beeinflusst. Nach einer Versuchszeit von 7 min 20 s wurde mit dem Strahlrohr abgelöscht. Die Gesamtwassermenge lag dabei in der gleichen Größenordnung wie bei Versuch V24.

Die Bilder 23 (V31) und 24 (V32) zeigen die Temperaturverläufe bei den Versuchen mit gestapelten Kartons und Kunststoffflaschen (Bild 3) in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Nach der Zündung stiegen die Temperaturen an den Meßstellen T3, T4 und T5 (0,6 m über dem Stapel) auf max. 800 °C an. Visuell betrachtet war der jeweilige Brandverlauf bei Löschanfang bei beiden Versuchen als etwa gleich anzusehen. Infolge des Löschanfangs nach einer Versuchszeit von 2 min 55 s bzw. 3 min 25 s sanken die jeweiligen Temperaturen sofort stark ab. Nach dem Abschalten der Löschmittelzufuhr waren in beiden Fällen keine Flammen mehr zu erkennen, der jeweilige Brand war gelöscht.

Die Bilder 25 bis 28 (V33 bis V36) geben die Temperaturverläufe bei den Versuchen mit Holzkrippen in diagonaler Anordnung zu den beiden seitlichen Düsen wieder (vergl. diag. Anordnung Bild 3). Unmittelbar nach dem jeweiligen Zündvorgang ist durch die aufsteigenden heißen Brandgase ein Temperaturanstieg an der zentralen Meßstelle T5 (1,3 m über der Holzkrippe) auf Werte von 550 °C bis 650 °C zu verzeichnen. Nach einer Versuchszeit von ca. 5 min wurde die Flammenhöhe niedriger und die jeweilige Temperatur fiel auf einen mittleren Wert von ca. 450 °C. Die Holzkrippe brannte gleichmäßig weiter. Die Temperaturen T1 und T2 an den Düsen, T3 und T4 seitlich und T6 in einer Höhe von 4 m über der Zündstelle wurden nicht direkt von den Flammen erfaßt und lagen deshalb deutlich niedriger. Der Löschanfang sowohl mit Löschwasser als auch mit den Löschmitteln A und B (Wasser-Quellkörper-Gemisch) bewirkte jeweils einen steilen Abfall der Temperatur. Der Löscheinsetz wurde beendet, als visuell keine Flammen mehr erkennbar waren.

Die Bilder 29 und 30 zeigen für den Versuch V37 die Temperaturen

an den Meßstellen T1 bis T6 und TZ (Bild 5) in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Die Temperatur an der Meßstelle TZ (Bild 30) stieg beim Zündvorgang sofort steil an, während es zentral an der Meßstelle T5 ca. 40 s und an der Meßstelle T6 ca. 1 min dauerte, bis ein steiler Anstieg erfolgte. An den anderen Meßstellen (T1 bis T4) war bis zum Löscheintritt nach einer Versuchszeit von ca. 4 min nur an der Meßstelle T3 ein langsamer Temperaturanstieg zu verzeichnen (Bild 29).

Bild 31 zeigt für den Versuch V37 die in einer Höhe von ca. 7 m über der Zündstelle aufgezeichneten Temperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4, die durch das Aufsteigen der heißen Brandgase bis zum Zeitpunkt des Löscheintrittes nach ca. 4 min in einem Temperaturbereich liegen, in dem ein dort installierter Sprinkler hätte auslösen können.

Bei der nach einer Versuchszeit von 4 min 8 s manuell betätigten Auslösung der Löschanlage fiel die Temperatur an allen Meßstellen bis auf die an den Meßstellen T2, T3 und T5 (Bilder 29 und 30) stark ab. An diesen 3 Meßstellen wurden sie erst während des Löschevorganges nach ca. 2 min bis 3 min niedriger, da diese Meßstellen zentral bzw. an der Außenseite des Stapels lagen (Bild 5). Ein Abschalten der Löschanlage bewirkte einen erneuten mehr oder weniger starken Temperaturanstieg. Das Auslösen der unteren beiden Sprühköpfe SK3 und SK4 (Bild 5) nach einer Versuchszeit von 9 min 38 s hatte auf die Temperaturen an allen Meßstellen kaum einen Einfluß. Erst das Zuschalten der beiden oberen Sprühköpfe nach einer Versuchszeit von 11 min 45 s ließ wieder mehrere Temperaturen abfallen (TS0 bis TS4 in Bild 31 und T6 in Bild 30) und teilweise die an den abgewandten Seiten bzw. in der Mitte durch die jetzt in diese Richtung gehende heiße Strömung wieder anstiegen wie an den Meßstellen T1 und T3 (Bild 29) zu erkennen ist. Da kein weiterer Löscherfolg mit dieser Anordnung der Löschdüsen ersichtlich war, wurde der Kunststoffballenstapel nach einer Versuchszeit von ca. 22 min durch den Einsatz eines Strahlrohres abgelöscht.

In Bild 32 ist für den Versuch V37 der über die Sprühköpfe SK1 bis SK4 (Bild 5) abgegebene Wasservolumenstrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen. Der Löscheintritt nach einer Versuchszeit von ca. 4 min mit den 2 oberen Sprühköpfen SK1 und SK2 bewirkte bei den Deckentemperaturen TS0 bis TS4 den bereits in Bild 31 erwähnten steilen Abfall. Nach dem Abschalten des Löschwassers nach einer Versuchszeit von ca. 7,5 min begannen die Deckentemperaturen wieder langsam zu steigen. Der Löscheintritt nach einer Versuchszeit von ca. 9,5 min mit den 2 unteren Sprühköpfen SK3 und SK4 hatte auf das Brandgeschehen praktisch keinen Einfluß. Erst das erneute Zuschalten der oberen beiden Sprühköpfe ließ die Deckentemperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4 (Bild 31) wieder absinken. Wie bereits beschrieben, ist im Stapelinnern und an den Seiten des Stapels auch nach längerer Brandbekämpfung durch die Sprühköpfe keine Löschwirkung ersichtlich.

2.2.2 Abbrand

Bei einigen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde während des jeweiligen Versuches die Massenabnahme des Brandgutes mit fortschreitender Branddauer bestimmt. In Bild 33 ist die Massenänderung während des Brandverlaufes und des Ablöschvorganges beim Brandgut Karton mit Kunststoffflaschen für die Versuche V31 und V32 dargestellt. Nach der Zündung mit einer Menge von 0,5 l n-Heptan wurde die Phase des konstanten Abbrandes bei einem Massenverlust von 20% bis 25 % erreicht. Zu diesem Zeitpunkt war außerdem gewährleistet, daß der Stapel noch nicht zusammengefallen war, so daß der Löscheintritt mit unterschiedlichen Löschmitteln unter gleichen Bedingungen erfolgen konnte.

Die Massenzunahme durch den Löscheintritt war bei beiden Versuchen mit 6 kg bzw. 6,5 kg nahezu gleich. Bei Betrachtung der aufgegebenen Löschmittelmenge von 41 l bzw. 13 l (Tabelle 3) wird anhand dieser beiden Versuche besonders deutlich, daß ca. 15 % bzw. ca. 50 % des jeweiligen Löschmittels auf der Waage

verblieben. Dies ist damit zu erklären, daß der Sprühwinkel bei einem Wasser-Quellkörper-Gemisch, wie bereits erwähnt, kleiner wurde, deshalb mehr Löschmittel auf dem Brandgut auftraf und folglich auch mehr auf dem Brandgut haften blieb, so daß insgesamt weniger Löschmittel verbraucht wurde.

Bilder 34 zeigt die jeweilige Massenänderung während des Brandverlaufes bei Holzkrippen und während des Löscheinsatzes mit unterschiedlichen Löschmitteln bei den Versuchen V33 bis V36. Bei der Zündung betrug das Gewicht einer Holzkrippe ca. 20 kg. Nach einer Versuchszeit von ca. 5 min war die Phase des konstanten Abbrandes mit ca. 0,9 kg/min erreicht. Der Löscheinsatz erfolgte nach einer Versuchszeit von 15 min bis 16 min, als mindestens 50% des Holzes verbrannt waren und sich genügend Glut gebildet hatte. Durch die Löschmittelaufbringung auf das Brandgut stieg die Kurve wieder an. Der Anstieg ist bei einem Wasser-Quellkörper-Gemisch umso höher, je länger die Löschzeit ist (Versuche V33, V34, V36); er ist jedoch bei Löschwasser geringer, obwohl die Löschzeit länger andauerte und die auf den Brand aufgegebenen Löschmittelmengen am höchsten waren. Dies bedeutet, daß bei den Löschmitteln A und B mehr am Brandgut haften bzw. auf der Waage liegen blieb und nicht wie bei Wasser (Versuch V35) nach dem Versprühen größtenteils ablief. Dies setzt allerdings einen etwa gleichen Sprühstrahl aus der Düse voraus. Bei einer gleich angenommenen Löschzeit von 30 s wurden beim Löschmittel B (1,5%) ca. 7 kg, beim Löschmittel A (1,25%) ca. 5,8 kg, beim Löschmittel Wasser ca. 2,5 kg und beim Löschmittel A (1%) ca. 5,5 kg als Massenzunahme registriert. Der überlagerte Massenverlust durch Abbrand während des Löschvorganges ist wesentlich geringer.

Bei diesen Versuchen verblieb gegenüber Wasser ohne Zusätze etwa der 2 bis 3-fache Anteil des jeweiligen Wasser-Quellkörper-Gemisches auf der Oberfläche des Brandgutes bzw. der Abbrandwaage, obwohl beim Löscheinsatz mit Wasser der Gesamtverbrauch am höchsten war. Eine erneute Brandausbreitung durch noch vorhandene Glutreste im Brandgut wurde durch das anhaftende Löschmittelge-

misch eher verhindert oder zumindest stärker behindert als bei Löschwasser.

Bild 35 zeigt den Massenverlust während der Brandphase bei 8 halben Kunststoffballen als Brandgut (Versuch V37) bis zum Löscheinsatz. Bis zu diesem Zeitpunkt waren ca. 9 kg des Brandgutes verbrannt.

2.2.3 Wärmefreisetzung

Die Bilder 36 bis 42 zeigen den zeitlichen Verlauf der abnehmenden Masse des Brandgutes, auch als Abbrand oder Massenverlust bezeichnet, der Abbrandrate in kg/min, auch als Abbrandgeschwindigkeit bezeichnet und den durch den Brand entstehenden Wärmestrom in MW, auch als Wärmefreisetzung bezeichnet.

Während der Versuche wurde der Massenverlust, das heißt die Differenz der Anfangsmasse und der Restmasse, mit Hilfe einer unter dem Brandgut befindlichen Waage registriert. Durch Differentiation dieser in Abhängigkeit der Versuchszeit gemessenen Kurve wird die Abbrandrate bestimmt. Aus der Abbrandrate kann mittels des entsprechenden durchschnittlichen Heizwertes der beim Brand bei vollständiger Verbrennung freigesetzte theoretische Wärmestrom berechnet werden.

Der errechnete theoretische Wärmestrom liegt wegen der unvollständigen Verbrennung höher als der direkt von der Brandlast ausgehende fühlbare Wärmestrom. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch unvollständige Verbrennung der entsprechende untere Heizwert nicht erreicht wird und zusätzlich Strahlungswärme an die Umgebung abgegeben wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z. B. durch flammenhemmende Zusätze, durch Sauerstoffmangel oder auch durch nicht ausreichende Zündenergien zur Verbrennung der abströmenden Zersetzungsprodukte. Die führt u. a. zu einer Rußbildung. In /1, 2/ werden die Zusammenhänge und Rechenmethoden für die Wärmefreisetzung genauer beschrieben.

Bild 36 zeigt den Abbrand, die Abbrandrate und den Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit bis zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes bei Kunststoffballen als Brandgut. Trotz eines optisch eindrucksvollen Brandes betrug der Abbrand nur ca. 9 kg, die Abbrandrate bis ca. 8 kg/min und der mittlere maximale theoretische Wärmestrom ca. 5 MW.

Aus früheren Untersuchungen /3, 4, 5/ wurden zum Vergleich mit den hier erhaltenen Ergebnissen zu anderen Brandgütern bzw. Brandlasten Werte herangezogen und berechnet. Die Bilder 37 bis 39 zeigen die entsprechenden Kurven bis zum Löscheinsatz für die Brandgüter Holzwolle und Polystyrol-Chips in Kartons, die in Gitterboxen gelagert wurden. Die Anzahl der gelagerten Kartons betrug 48 bzw. 80 Stück.

Zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes wurden bei diesen Versuchen Werte für den Abbrand zwischen 10,5 kg und 13 kg erreicht. Die Abbrandrate lag bei Werten zwischen 3,5 kg/min und 6,5 kg/min und der theoretische Wärmestrom bei Werten zwischen 1 MW und 2 MW. Der Zeitpunkt des Löscheinsatzes bei den in den Bildern 37 bis 39 ausgewählten Versuchen war abhängig von der unterschiedlichen Brandausbreitung direkt nach dem Zündvorgang und dem weiteren zeitlichen Verlauf bei unterschiedlichen Brandgütern bzw. Brandlasten. Die Werte können bei anderen Versuchen von diesen Angaben abweichen.

Die Bilder 40 bis 42 zeigen die Abhängigkeiten für das Brandgut Holzwolle und Polystyrol-Chips in Kartons, die auf Paletten als Stapel oder im Regal gelagert wurden. Bei diesen Versuchen wurden 96 Kartons auf Paletten als Stapel bzw. 288 Kartons im Regal gelagert.

Zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes wurden bei diesen Versuchen Werte für den Abbrand zwischen 3 kg und 25 kg erreicht. Die Abbrandrate lag bei Werten zwischen 7 kg/min und 30 kg/min und die Wärmestrom bei Werten zwischen 2 MW und 8 MW. Auch bei diesen Versuchen hängen die angegebenen Werte stark von der Brandent-

wicklung nach dem Zündvorgang und dem Zeitpunkt des Löscheinsatzes ab und können bei anderen Versuchen von den obigen Werten abweichen.

2.2.4 GC/MS Analyse

Während des Brandes wurden mit einer elektronisch gesteuerten Probenahmepumpe ca. 2 m über dem über dem brennenden Kunststoffballen Brandrauchproben entnommen. Die erste Probe wurde ca. 2 min nach dem Zündvorgang gezogen als an der Oberfläche des Ballens erste Zersetzungsprodukte freigesetzt wurden. Eine weitere Probe wurde nach einer Versuchszeit von ca. 4 min an der gleichen Stelle über dem Brandgut in der Nähe der aufsteigenden Flammen entnommen. Beide Brandrauchproben wurden auf Carbotrap® 400 Adsorptionsröhrchen adsorbiert. Ausführlichere Angaben über die Probenahme und Analysetechnik finden sich in /6, 7, 8/.

Die Desorption der Analyten erfolgte mit Hilfe eines Thermodesorbers. Die Programmschritte des Thermodesorbers wurden an der Forschungsstelle auf die Anforderungen der Brandrauchanalytik abgestimmt. Die Trennung der Analyten erfolgte im Gaschromatographen auf einer 50 m Kapillarsäule mit unpolarer stationärer Phase. Bei einer unpolaren stationären Phase besteht eine Korrelation zwischen der Retentionszeit und dem Siedepunkt des Analyten. Zur Detektion der Analyten wurde ein Massenspektrometer verwendet. Die Identifikationsvorschläge der Auswertesoftware des Massenspektrometers wurden mit Hilfe der Retentionszeit-Siedepunkt-Korrelation auf ihre Richtigkeit überprüft. Durch die Verwendung der Beilstein-Datenbank "CrossFire" konnte ein erheblicher Fortschritt bei der Datenrecherche für die detektierten Schadstoffe erreicht werden.

Für eine korrekte Quantifizierung müßte für jede detektierte Verbindung eine Standardlösung bekannter Konzentration vorliegen. Bei komplexen Schadstoffgemischen kann dies praktisch nicht realisiert werden.

Bei der Kalibrierung wird das Signal des Massenspektrometers bei der Analyse verschiedener, genau bekannter Mengen einer Substanz über der Substanzmenge aufgetragen. Bei diesen Versuchen wurde als Signal die Peakfläche im Totalionenstrom-Chromatogramm verwendet.

Verfahren zur Kalibrierung sind:

- Kalibrierung mittels externem Standard
- Kalibrierung mittels internem Standard
- Standard-Additionsverfahren

Bei der Versuchsauswertung wurde ausschließlich die Kalibrierung mittels externem Standard verwendet. Bei dieser Kalibrierung wird eine bekannte Menge eines Kalibrier-Standards auf das Adsorptionsröhrchen gegeben und unter den gleichen Bedingungen analysiert wie ein mit einer Probe beladenes Adsorptionsröhrchen. Da die Menge der im Kalibrier-Standard enthaltenen Stoffe bekannt ist, kann eine Auftragung der Peakfläche über der Stoffmenge einer Substanz erstellt werden. Im linearen Bereich ist das Detektorsignal proportional zur Menge des Analyten im Adsorptionsröhrchen. Die Steigung der Regressionsgeraden durch die Kalibrierpunkte in diesem Bereich wird Responsefaktor genannt. Die so ermittelten Responsefaktoren sind von den geräte-technischen Einstellungen des Massenspektrometers abhängig. Wegen möglicher Veränderungen im System ist es notwendig, die Kalibrierung laufend zu überprüfen.

Die bei den Brandrauchanalysen der Sekundär-Rohstoffe erhaltenen Ergebnisse sind beispielhaft in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt. Neben dem Namen der Substanz sind die Formel, die CAS Nr. und die Konzentration aufgetragen. Es wurden nur Konzentrationen von Einzelsubstanzen, die größer als $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sind, aufgelistet. Dies bedeutet nicht, daß keine anderen Substanzen in geringerer Menge vorhanden sein können. Da Kunststoffballen verschiedene Materialien, neben den Hauptbestandteilen auch kleinere Mengen anderer Stoffe, enthalten, werden dementsprechend evtl. unterschiedliche Substanzen zu verschiedenen Zeiten und/oder auch an unterschied-

lichen Meßstellen analysiert.

Wie die über dem Kunststoffballen gezogenen Proben zeigen, wurden nach einer Versuchszeit von 2 min und von 4 min die gleichen Substanzen im Brandrauch gemessen. Dabei ist besonders deutlich zu erkennen, daß in der ersten Phase des Brandes nach einer Versuchsdauer von 2 min wesentlich höhere Konzentrationen bei den einzelnen Komponenten auftreten als nach einer Versuchsdauer von 4 min. Bei 3 Substanzen sind die Konzentrationen kleiner oder gleich.

Anhand der Tabellen 1 und 2 ist deutlich zu erkennen, daß bei diesem Versuch die Substanzen Benzol, Toluol und Styrol nach einer Versuchszeit von 2 min in höheren Konzentrationen auftreten (Tabelle 1). Zu diesem Zeitpunkt waren die Brandgase noch nicht vollständig verbrannt. Im weiteren Verlauf des Brandes nach einer Versuchszeit von ca. 4 min (Tabelle 2) war die Konzentration dieser Substanzen bereits wesentlich geringer, was auf die vollständigere Verbrennung zu diesem Zeitpunkt zurückzuführen ist. In diesem Zusammenhang sei auf die bei Schwelbränden auftretenden Brandgase hingewiesen, bei denen eine unvollständige Verbrennung stattfindet und somit eine hohe Schadstoffbelastung vorhanden sein kann.

Zusätzlich können weitere Substanzen im Brandrauch vorhanden sein, die außerhalb des Meßbereichs des hier eingesetzten GC/MS-Systems liegen. Zu einer anderen Zeit an einer anderen Meßstelle können andere Zusammensetzungen der Substanzen vorliegen. Die Angaben in den Tabellen 1 und 2 zeigen jedoch, daß eine quantitative Analyse von Schadstoffen generell möglich ist.

3. VERGLEICH VON MESSERGEBNISSEN

Tabelle 3 zeigt neben der Versuchsnummer, dem jeweiligen Brandgut, den verwendeten Düsen und der Vorbrennzeit die Löschzeiten für den Löscheintritt, das jeweilige Löschmittel und den zugehörigen Löschmittelverbrauch. Bei den Untersuchungen wurde von Versuch zu Versuch nur ein Parameter geändert, um den jeweiligen Einfluß dieses Parameters besser beurteilen zu können.

Bei den Versuchen V1 und V2 ist deutlich zu erkennen, daß bei zunehmender Vorbrennzeit von 10 min auf 20 min und dem Löscheintritt mit der gleichen Düse mit einem Austrittswinkel von 60° die Löschzeit und damit verbunden der Löschmittelverbrauch von 32 l auf 12 l abnahm. Dies war auf die abnehmende Intensität des Brandes mit zunehmender Branddauer zurückzuführen.

Die Versuche V3 und V4 zeigen bei Verwendung einer Düse mit einem Austrittswinkel von 90° mit einem Öffnungsdurchmesser von 3 mm ebenso die Abnahme der Löschmittelmenge mit zunehmender Branddauer, um den gleichen Endzustand zu erreichen. Die Versuche wurden beendet, als der Wasserverbrauch mit 36 l und 17 l den der vorherigen Versuche V1 und V2 übertraf und somit keine Verbesserung darstellte. Es bleibt jedoch festzustellen, daß mit einer Düse mit einem Winkel von 60° die Holzkrippe bei unterschiedlichen Vorbrennzeiten vollständig gelöscht wurde, während sie mit einer Düse mit einem Winkel von 90° und einem Öffnungsdurchmesser von 3 mm trotz eines höheren Wasserverbrauches nicht gelöscht wurde, da aufgrund des Winkels das Löschwasser weiträumiger versprüht wurde. Das Ablöschen erfolgte manuell.

Bei Versuch V5 wurde bei sonst gleichen Parametern im Unterschied zu Versuch V3 das Löschmittel A (0,5%) eingesetzt. Die Versuchsergebnisse zeigten deutlich, daß die zugesetzte Menge der Quellkörper nicht ausreichte, um einen Löscherfolg herbeizuführen bzw. einen günstigeren Löschmittelverbrauch bis zum Erreichen des gleichen Endzustandes wie bei Versuch V3 mit Löschwasser zu erzielen.

Versuch V6 entspricht dem Versuch V1, wobei jedoch das Löschmittel A (0,5%) wie bei Versuch V5 eingesetzt wurde. Beim Lösch-einsatz ergab sich mit 12 l ein deutlich geringerer Löschmit-telverbrauch gegenüber Versuch V1 mit einer Löschwassermenge von 32 l. Beide Versuche wurden gelöscht.

Versuch V7 wurde mit einer anderen Düse mit einem für Wasser gültigen Sprühwinkel von 90° (Öffnungsdurchmesser 4 mm) durch-geführt. Bei Verwendung des Löschmittels A (0,5%) bei sonst gleichbleibenden Bedingungen wurde festgestellt, daß der Lösch-mittelverbrauch auf 5 l zurückging.

Da dies zunächst unglaublich erschien, wurde der Versuch als Versuch V8 wiederholt. Auch hier ergab sich ein Verbrauch von nur 6 l bei Verwendung des Löschmittels A (0,5%).

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Versuch V6 als Versuch V9 ebenfalls wiederholt und dabei festgestellt, daß eine Löschmit-telmenge von 9 l genügte, um die Holzkrippe zu löschen. Dies bestätigte den günstigeren Löscheinsatz trotz kleinerer Druck-schwankungen im Vorratsbehälter, die sich in einer etwas länge-ren Löschzeit auswirkten.

Bei Versuch V10 wurde die Holzkrippe etwas vergrößert, d. h. die Brandlast erhöht. Der Löscheinsatz erfolgte mit dem Löschmittel A (0,5%) und den gleichen Parametern wie bei Versuch V6. Der Löschmittelverbrauch war mit 13,5 l jedoch nur um ca. 10% höher.

Ein Wiederholungsversuch V11 zeigte, daß Brände trotz gleicher Parameter doch nicht immer identisch ablaufen, da hier die drei-fache Menge an Löschmittel benötigt wurde, um den Brand voll-ständig zu löschen. Dies kann an einer evtl. unterschiedlichen Zusammensetzung der Holzstäbe liegen.

Der Versuch V12 wurde durchgeführt, um Wasser als Löschmittel mit der 90°-Düse einzusetzen. Es zeigte sich, daß bei einem Ver-gleich mit den Versuchen V7 und V8 mit einem Verbrauch von 13 l

mehr als die doppelte Menge an Löschmittel benötigt wurde.

Bei Versuch V13 wurden die Versuchsbedingungen des Versuches V11 beibehalten und das Löschmittel B (1%) verwendet. Es ist zu erkennen, daß der Löschmittelverbrauch mit 7 l unter den der Versuche V10 und V11 gesunken ist und sogar niedriger liegt als bei Versuch V9 mit der etwas geringeren Brandlast.

Versuch V14 zeigt, daß beim Löschmittel B (0,5%) bei gleich gebliebenen Parametern wie bei Versuch V13 der Löschmittelverbrauch auf 13 l angestiegen ist. Dies bedeutet eine schlechtere Wirkung auf den Brandherd als beim Löschmittel B mit 1%iger Zumischung.

Aufgrund der Tatsache, daß die zuletzt verwendete 90°-Düse sowohl bei Wasser ohne als auch mit Zusatzstoffen eindeutig Vorteile bewies, wurde sie auch bei den nächsten Untersuchungen mit den anderen Brandstoffen wie den Kästen aus Polypropylen und den gepreßten Kunststoffballen zentral über dem jeweiligen Brandgut eingesetzt.

Die Versuche V15 bis V19 wurden mit Kästen aus Polypropylen als Brandgut und Wasser sowohl ohne als auch mit Zumischung von 0,5% des Stoffes A als Löschmittel durchgeführt. Da der Brandverlauf bei diesem Brandgut sehr unterschiedlich war, wurde nach visuellen Gesichtspunkten entschieden, zu welchem Zeitpunkt der Lösch-einsatz erfolgen sollte. Der Löschbeginn lag bei Versuchszeiten zwischen 7 min und 12 min. Die Löschzeit hing von der Anzahl der übereinander aufgesetzten Lagen (4 bzw. 5 Kästen) ab. Dies wirkte sich direkt auf den Löschmittelverbrauch (15 l bis 30 l bzw. 65 l bis 70 l) aus, der erforderlich war, um etwa den gleichen Endzustand zu erreichen. Es wurde bei diesen Versuchen festgestellt, daß die Art des Löschmittels keine Rolle spielte. Die Kunststoffkästen schmolzen während des Brandes und brannten auch während des Löschvorganges noch weiter. Da die Kästen so in sich zusammensanken, daß das Löschmittel durch Brückenbildung der Kästen nicht auf darunter liegende Brandherde einwirken konnte

war es nicht möglich, den Brand mit der Löschanlage vollständig zu löschen. Die noch brennenden Kästen wurden anschließend manuell abgelöscht.

Bei den Versuchen V20 bis V23 wurden als Brandgut gepreßte Kunststoffballen und als Löschmittel sowohl Löschwasser als auch die Löschmittel B (1%) und A (0,5%) bzw. A (1%) verwendet. Obwohl jeweils nach dem Löscheinsatz vor allem an den Ecken des Brandgutes noch Flammen sichtbar waren, also nicht vollständig gelöscht werden konnte, läßt sich eine eindeutige Tendenz beim Löschmittelverbrauch in Abhängigkeit von der Löschmittelart feststellen. Bei etwa gleichem Löschzustand des Brandgutes war der Verbrauch mit 100 l bei Löschwasser am höchsten (V20). Eine geringe Zumischung bei Löschmittel A (0,5%) reduzierte den Verbrauch nur um ca. 10% (V22). Bei Verwendung des Löschmittels B (1%) nahm der Verbrauch auf 68 l und bei Verwendung des Löschmittels A (1%) sogar auf 60 l ab.

Bei den weiteren Versuchen V24 bis V30 wurden wie bei den Versuchen V20 bis V23 Kunststoffballen als Brandgut verwendet, jedoch die Anzahl der Düsen auf 2 erhöht. Dabei wurden Düsen mit einem Winkel von 120° eingesetzt. In Versuch V24 wurde der Kunststoffballen bis auf Restflammen mit 120 l Wasser gelöscht. Bei den gleichen Bedingungen wurde in Versuch V25 mit dem Löschmittel B (1,5%) gearbeitet. Dies hatte zur Folge, daß der Druckverlust so groß war, daß das Löschmittel nicht mehr versprüht wurde und somit keinerlei Löscherfolg vorhanden war, so daß die Rohrleitung und Vordrücke geändert werden mußten.

Die Versuche V26 bis V30 zeigen, daß sowohl bei Verwendung von Löschwasser (Versuche V26 und V28) als auch beim Einsatz der Löschmittel A (Versuch V30) und B (Versuche V27 und V29) jeweils vergleichbare Werte für nahezu gleiche Endzustände erreicht wurden, d.h. kleinere Flammen um den jeweiligen Kunststoffballen konnten nicht vollständig gelöscht werden.

Beim Löscheinsatz mit Wasser bei Versuch V26 wurden 120 l benö-

tigt. Der Einsatz des Löschmittels B (1,5%) bei Versuch V27 brachte mit 54 l eine Löschmittlersparnis von über 50%.

Um diese Ergebnisse zu überprüfen, wurden beide Versuche wiederholt (Versuche V28 und V29) und dabei festgestellt, daß mit 120 l Löschwasser und 60 l des Löschmittels B (1,5%) der Verbrauch jeweils praktisch übereinstimmte. Eine Durchführung des Versuches mit dem Löschmittel (1%) bei Versuch V30 führte ebenfalls zum gleichen Ergebnis.

Um die Ergebnisse zu belegen, wurde bei den Versuchen V31 und V32 ein anderes Brandgut (Kartons und Kunststoffflaschen) verwendet. Für das Löschmittel Wasser bei Versuch V31 wurde beim Löscheinsatz ein Verbrauch von 41 l registriert und beim Löschmittel B (1,5%) bei Versuch V32 ein Verbrauch von nur noch 13 l, was eine Verringerung des Löschmittelbedarfs auf ca. 30% bedeutet. Bei beiden Versuchen wurde der Brand vollständig gelöscht.

Bei den Versuchen V33 bis V36 wurden die Brände mit Holzkrippen durchgeführt. Bei nahezu gleichen Vorbrennzeiten, die wegen des visuellen Eindruckes etwas variierten, wurden beim Löschmittel B (1,5%) bei Versuch V33 eine Menge von nur 16 l benötigt. Der Einsatz des Löschmittels A (1,25%) bei Versuch V34 ergab einen Löschmittelverbrauch von 40 l. Die Durchführung des Versuches mit Löschwasser bei Versuch V35 führte zu einem Verbrauch von 69 l und mit dem Löschmittel A (1%) bei Versuch V36 zu einem Löschmittelverbrauch von 60 l. Auch hier wurde eindeutig eine geringere Löschmittelmenge benötigt, wenn dem Löschwasser ein Zusatz beigemischt wurde.

Versuch V37 wurde durchgeführt, um bei Bränden im Innern eines Stapels aus mehreren Kunststoffballen beim Löscheinsatz die Auswirkung von Wassernebel als Löschmittel zu ermitteln. Da der Brand mit dieser Anordnung der Sprühköpfe nur an der Oberfläche und nicht zwischen den Stapeln gelöscht wurde, mußte ein Strahlrohr eingesetzt werden, um den innenliegenden Brand zu löschen. In der Tabelle 3 wurden deshalb weder Löschzeit noch Wasserver-

brauch angegeben.

In Bild 32 ist die Löschzeit und der Wasserverbrauch beim Einsatz bei 2 Sprühköpfen mit ca. 122 l/min bzw. 4 Sprühköpfen mit ca. 215 l /min während des Löschvorganges aufgezeichnet. Da mit der Löschanlage kein deutlicher Löscherfolg innerhalb des Stapels zu erkennen war, wurde die Anlage nach einer Versuchszeit von über 22 min abgeschaltet und der Stapel manuell abgelöscht.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsprogramms wurden Brand- und Löschversuche mit unterschiedlichen Brandstoffen wie Holz, Pappkarton und Kunststoff durchgeführt. Es wurden Temperaturen und Gaskomponenten gemessen sowie der Massenverlust des Brandgutes, die Abbrandrate und der Wärmestrom bestimmt, dessen Höhe durch den Löschzeitpunkt begrenzt wurde. Für den Löscheinsatz wurden handelsübliche Düsen mit Sprühwinkeln von 60° bis 120° sowie Wassernebelsprühköpfe eingesetzt. Als Löschmittel wurde Wasser sowohl mit als auch ohne Zusatzstoffe verwendet, die in flüssiger Form oder auch pulverförmig vorlagen. Diese Zusatzstoffe wurden dem Wasser in Massenanteilen von 0,5% bis 1,5% zugemischt. Bei höheren Zumischungen wurden die Viskosität und damit verbunden die Reibungsverluste in den verwendeten Zuleitungen und Düsen stark erhöht, so daß ein Versprühen bei Drücken, die beim Verdüsen des Wassers verwendet wurden, bei den Löschmittelmischungen nicht mehr möglich war.

Ein Vergleich der Löschwirkung bei den hier durchgeführten Versuchen zeigt, daß zum Erreichen des gleichen Endzustandes bei einem Brand (entweder vollständig oder bis auf Restflammen gelöscht), durch eine Zumischung von Zusätzen zum Löschwasser wesentlich weniger Löschmittel benötigt wurde. Durch die höhere Viskosität des Löschmittels mit Zusätzen war eine bessere Haftung auf der Oberfläche des Brandgutes möglich. Dadurch wurde ein Weiterbrennen oder eine Rückzündung verzögert bzw. vollstän-

dig verhindert. Wie die Versuche zeigten, ist der Löschmittelverbrauch z. B. abhängig vom Brandgut, der geometrischen Anordnung des Versuchsaufbaus, der Brandentwicklung, aber auch von den Düsen und deren Anordnung. In einem günstigen Fall kann bei Verwendung des Wassers mit Zusätzen als Löschmittel der Verbrauch nur noch ca. 30% dessen an Löschwasser betragen. In einigen Versuchen wurden gegenüber Wasser bis zu 50% der Menge benötigt. Eine zu geringe Zumischung hatte gegenüber Wasser keine eindeutigen Vorteile.

Die Ergebnisse bei der Rauchgasanalyse lassen erkennen, daß eine quantitative Analyse einzelner Gaskomponenten mit dem an der Forschungsstelle modifizierten GC/MS-System möglich ist. Die durch den Brandrauch hervorgerufenen Gesundheitsgefahren sind in der Anfangsphase sowie beim Ablöschen eines Brandes hoch einzuschätzen.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind
Teil 2: Großbrandversuche 1
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986) Nr.58
- /2/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind
Teil 12: Zusammenstellung von Erkenntnissen aus theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen als Planungshilfe zur Ausführung von Lagern und Sprinkleranlagen sowie zur Überprüfung von numerischen Simulationen.
Darstellung der Problematik bei der meßtechnischen Erfassung von physikalisch/chemischen Größen bei Brand- und Löschversuchen insbesondere im Hinblick auf die Verwendung bei numerischen Simulationen.
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995) Nr.95

- /3/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen
Teil 10: Literaturlauswertung -
Tropfenverteilungen - Löschversuche
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1993) Nr.85
- /4/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen
Teil 11: Literaturlauswertung -
Sprinklereinsatz bei Palettenlager
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1994) Nr.87
- /5/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen
Teil 12: Literaturlauswertung, Messung der
Wasserbeaufschlagung und -verteilung, Brand-
und Löschversuche mit Sprinklern an Regal
lagern mit und ohne Zusatz von Quellkörpern
zum Löschwasser
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1996) Nr.97
- /6/ Föhl, C.A.
Basmer, P.: Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter: Bewertung von Adsorptionsmate-
rialien für die GC/MS Analyse von Pflanzen-
schutzmittel-Brandgasen
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1996) Nr.103
- /7/ Föhl, C.A.
Basmer, P.
Schwarz, J.: Untersuchung der Löschverfahren und Lösch-
mittel zur Bekämpfung von Bränden gefähr-
licher Güter - Bewertung von Adsorptions
materialien für die quantitative Analyse von
Pflanzenschutzmittel-Brandgasen mit einer
GC/MS Gerätekombination
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1998) Nr.106
- /8/ Schatz, H.: Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Teil 3: Brand- und Löschversuche mit unter-
schiedlichen Brandstoffen mit und ohne Wind-
einfluß und die Bestimmung von Schadstoffen
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik (1998) Nr.111

6. TABELLEN UND BILDER

Brandrauchanalyse bei Bränden mit Sekundär - Rohstoffen

Tabelle 1: Konzentrationen von Einzelsubstanzen ($\geq 25 \mu\text{g} / \text{m}^3$) nach einer Branddauer von 2 Minuten in der Reihenfolge zunehmender Retentionszeit

Substanz	Formel	CAS - Nr.	C_1 in $\mu\text{g} / \text{m}^3$
1,3 - Cyclohexadien	C6.H8.	592-57-4	114
Benzol	C6.H6.	71-43-2	10248
Toluol	C7.H8.	108-88-3	1257
Ethyl - Benzol	C8.H10.	100-41-4	154
p - Xylol und m - Xylol	C8.H10.	---	< 25
Ethynyl - Benzol	C8.H6.	536-74-3	919
Styrol	C8.H8.	100-42-5	809
o - Xylol	C8.H10.	95-47-6	90
Benzaldehyd	C7.H6.O.	100-52-7	76
Limonen	C10.H16	138-86-3	47
Naphthalin	C10.H8.	91-20-3	130
2 - Ethenyl - Naphthalin	C12.H10	827-54-3	25

Tabelle 2: Konzentrationen von Einzelsubstanzen ($\geq 25 \mu\text{g} / \text{m}^3$) nach einer Branddauer von 4 Minuten in der Reihenfolge zunehmender Retentionszeit

Substanz	Formel	CAS - Nr.	C_1 in $\mu\text{g} / \text{m}^3$
1,3 - Cyclohexadien	C6.H8.	592-57-4	41
Benzol	C6.H6.	71-43-2	260
Toluol	C7.H8.	108-88-3	185
Ethyl - Benzol	C8.H10.	100-41-4	72
p - Xylol und m - Xylol	C8.H10.	---	253
Ethynyl - Benzol	C8.H6.	536-74-3	< 25
Styrol	C8.H8.	100-42-5	61
o - Xylol	C8.H10.	95-47-6	49
Benzaldehyd	C7.H6.O.	100-52-7	58
Limonen	C10.H16	138-86-3	107
Naphthalin	C10.H8.	91-20-3	94
2 - Ethenyl - Naphthalin	C12.H10	827-54-3	25

Tabelle 3. Löschzeit und Löschmittelverbrauch in Abhängigkeit des Brandgutes, der Düsen, der Vorbrennzeit und der Art des Löschmittels.

Versuch Nr.	Brand- gut	Düsen- anzahl/ winkel	Vorbrenn- zeit min:s	Lösch- zeit min:s	Lösch- mittel- art	Lösch- mittel- verbrauch l
V1	H K 1	1 60°	10	3:18	Wasser	32
V2	H K 1	1 60°	20	1:01	Wasser	12
V3	H K 1	1 90°**	10	4:46	Wasser	36 *
V4	H K 1	1 90°**	20	2:17	Wasser	17 *
V5	H K 1	1 90°**	10	3:30	A 0,5%	33 *
V6	H K 1	1 60°	10	1:26	A 0,5%	12
V7	H K 1	1 90°	10	0:24	A 0,5%	5
V8	H K 1	1 90°	10	0:40	A 0,5%	6
V9	H K 1	1 60°	10	1:46	A 0,5%	9
V10	H K 2	1 60°	10	1:06	A 0,5%	14
V11	H K 2	1 60°	10	2:30	A 0,5%	31
V12	H K 1	1 90°	10	1:02	Wasser	13
V13	H K 2	1 60°	10	0:42	B 1%	7
V14	H K 2	1 60°	10	1:05	B 0,5%	13
V15	PP-Kä4	1 90°	7	1:05	Wasser	15 *
V16	PP-Kä4	1 90°	8:30	2:23	A 0,5%	30 *
V17	PP-Kä4	1 90°	10	2:00	Wasser	27 *
V18	PP-Kä5	1 90°	7	5:00	Wasser	65 *
V19	PP-Kä5	1 90°	12	5:25	A 0,5%	70 *
V20	Ku-Bal	1 90°	15	7:45	Wasser	100 *
V21	Ku-Bal	1 90°	15	2:58	B 1%	68 *
V22	Ku-Bal	1 90°	15	6:50	A 0,5%	90 *
V23	Ku-Bal	1 90°	15	6:00	A 1%	60 *

noch Tabelle 3.

Versuch Nr.	Brand- gut	Düsen- anzahl/ winkel	Vorbrenn- zeit min:s	Lösch- zeit min:s	Lösch- mittel- art	Lösch- mittel- verbrauch l
V24	Ku-Bal	2 120°	voll	4:36	Wasser	120 *
V25	Ku-Bal	2 120°	voll	===	B 1,5%	=== *
V26	Ku-Bal	2 120°	voll	3:02	Wasser	120 *
V27	Ku-Bal	2 120°	voll	1:50	B 1,5%	54 *
V28	Ku-Bal	2 120°	voll	3:00	Wasser	120 *
V29	Ku-Bal	2 120°	voll	2:40	B 1,5%	60 *
V30	Ku-Bal	2 120°	voll	2:25	A 1%	60 *
V31	Flasch	2 120°	2:55	0:43	Wasser	41
V32	Flasch	2 120°	3:25	0:24	B 1,5%	13
V33	H K 3	2 120°	15:10	0:40	B 1,5%	16
V34	H K 3	2 120°	16:00	1:14	A 1,25%	40
V35	H K 3	2 120°	15:45	1:51	Wasser	69 *
V36	H K 3	2 120°	15:15	1:42	A 1%	60 *
V37	K-Bal8	2/4 SK	4:08	--	Wasser	-- *

* Brand nicht vollständig gelöscht, kleine Restflammen

** Düsenöffnung bei 90°-Düse 3 mm, sonst 4 mm

A, B Bezeichnung für unterschiedliche Quellkörper

% Zumischung der Quellkörper zum Wasser in %

H K 1 Holzkrippe 4*4*30 (Stabdicke 4 cm, Stablänge 30 cm)

H K 2 Holzkrippe 4*4*40 (Stabdicke 4 cm, Stablänge 40 cm)

H K 3 Holzkrippe 5*5*50 (Stabdicke 5 cm, Stablänge 50 cm)

PP-Kä4 Kunststoffkästen aus Polypropylen, 4 Lagen

PP-Kä5 Kunststoffkästen aus Polypropylen, 5 Lagen

Ku-Bal halbierte Kunststoffballen

Flasch 10 Kartons mit je 12 Kunststoffflaschen

K-Bal8 8 halbierte Kunststoffballen in 2 Lagen

voll Vollbrand

SK Sprühkopf von Wassernebelanlage

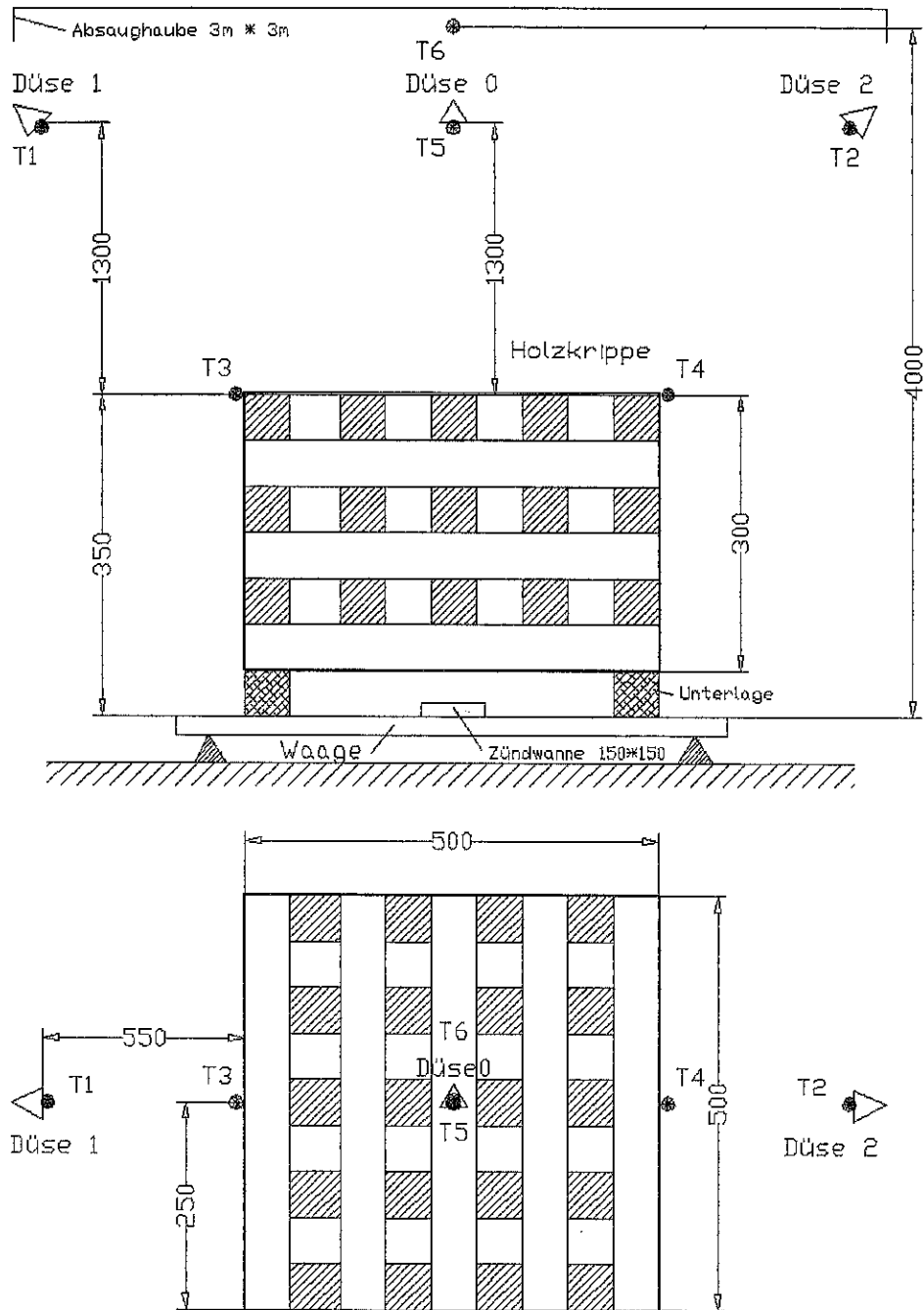


Bild 1. Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus mit Holzkippen unter 1 zentralen Düse 0 oder diagonal zu Düse 1 und Düse 2 wie Aufbau in Bild 3.

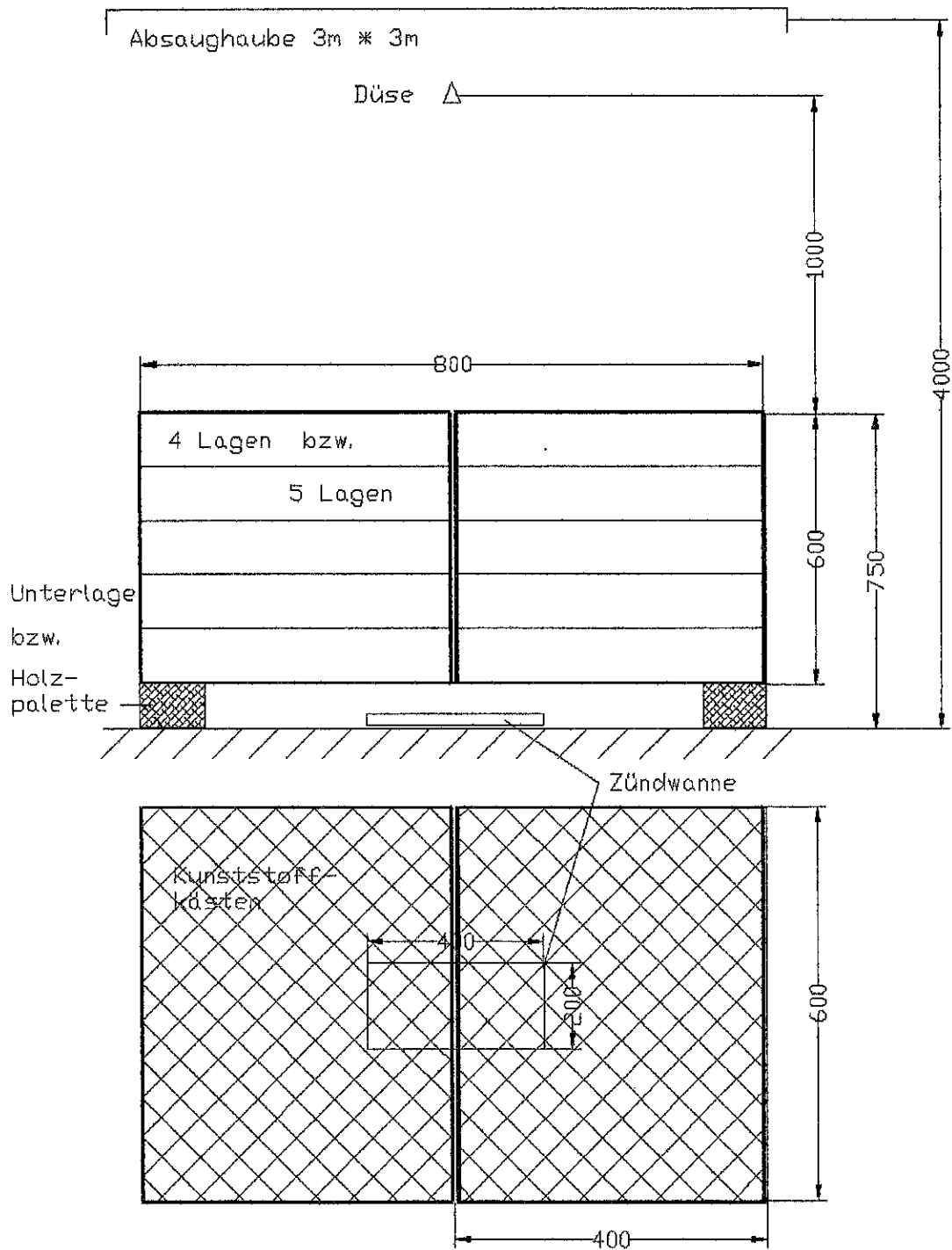


Bild 2. Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus mit 4 bzw. 5 Lagen Kunststoffkästen auf Holzpalette.

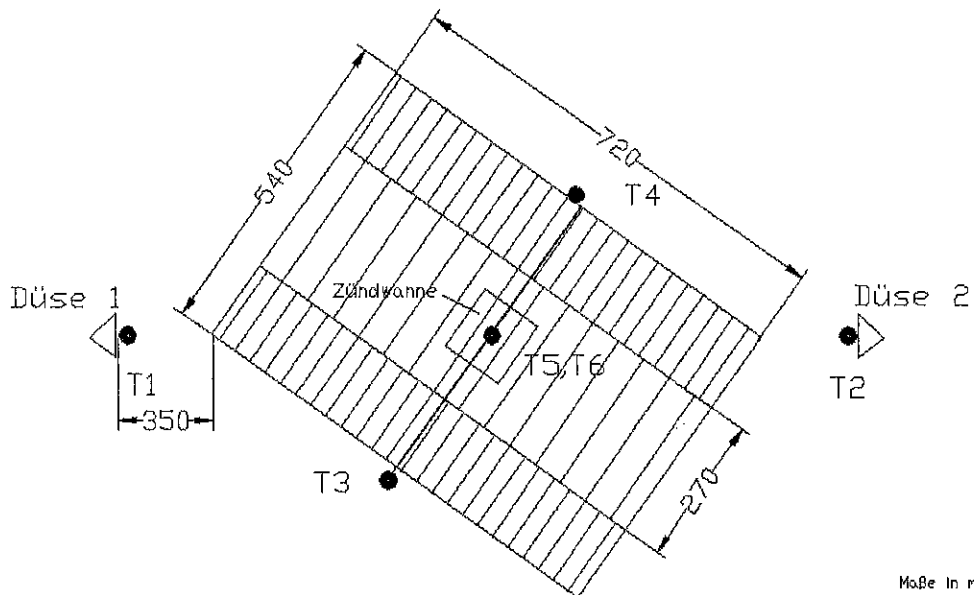
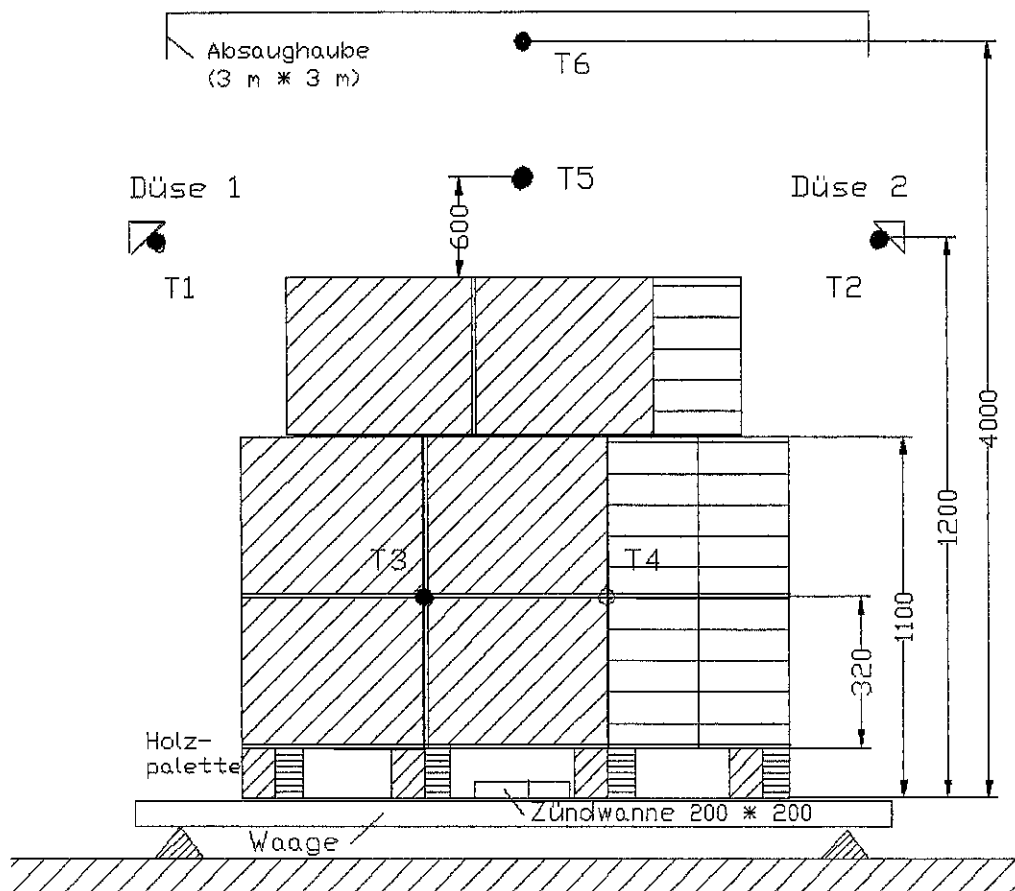


Bild 3. Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus mit Pappkartons (Inhalt Kunststoffflaschen) auf Holzpalette in diagonaler Anordnung.

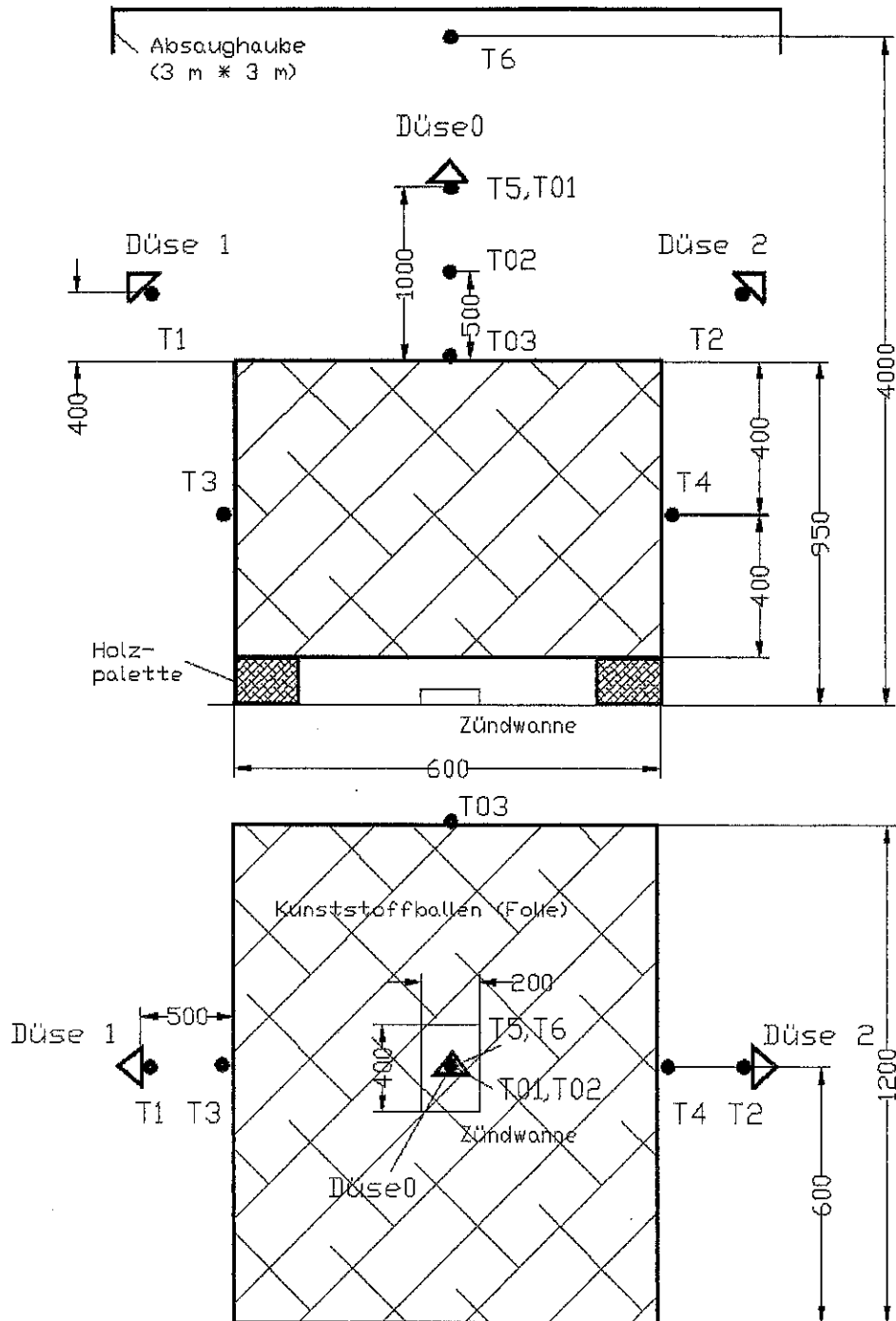
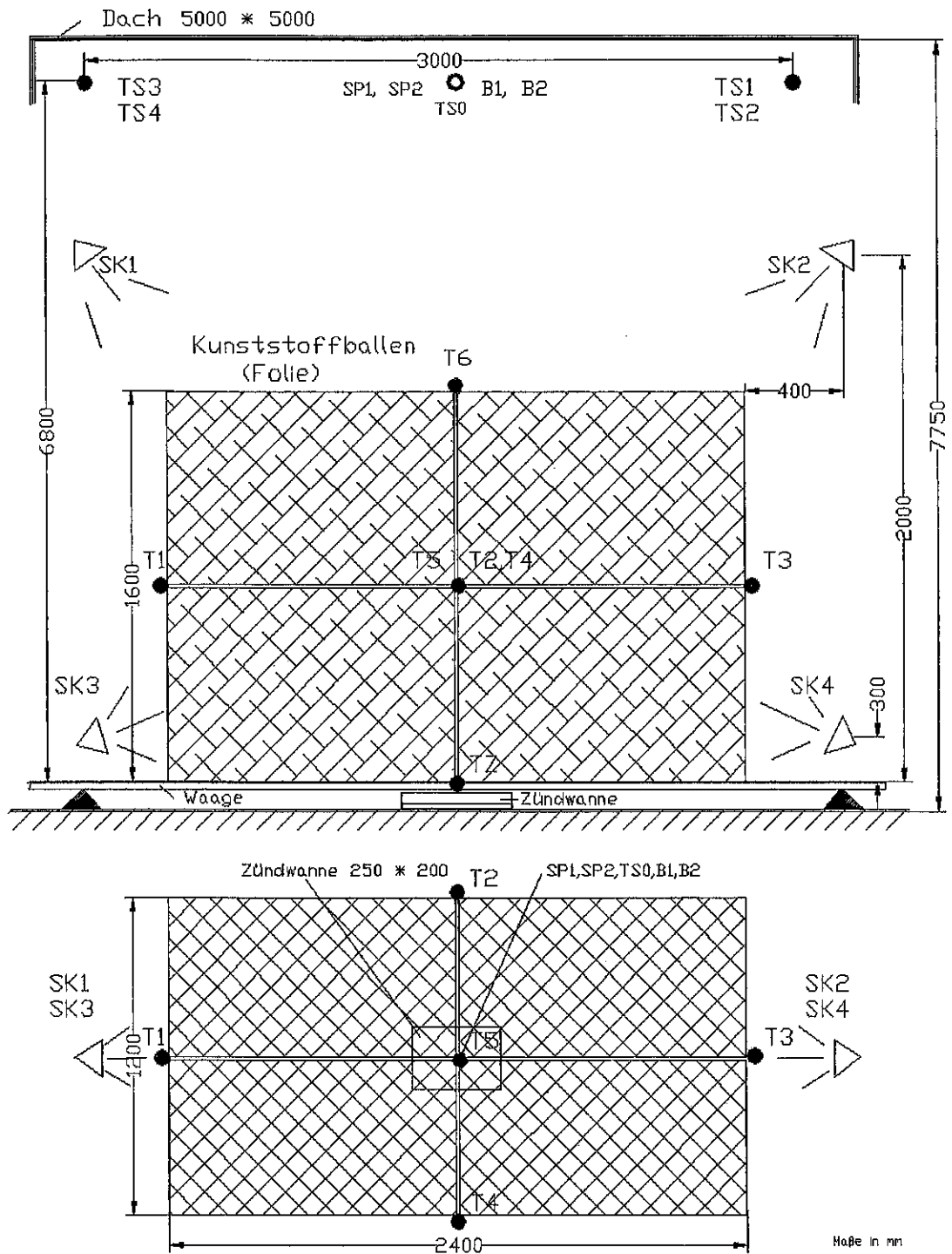


Bild 4. Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus mit 1 Kunststoffballen auf Holzpalette unter 1 zentralen Düse 0 oder diagonal zu Düse 1 und Düse 2, wie in Bild 3.



B1, B2 = Brandfelder SP1, SP2 = Indikatorsprinkler SK1 bis SK4 = Sprühkopf
 T1 bis T6, TZ = Thermoelemente TS0 bis TS4 = Thermoelemente unter der Decke

Bild 5. Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus mit 8 Kunststoffballen (V37)

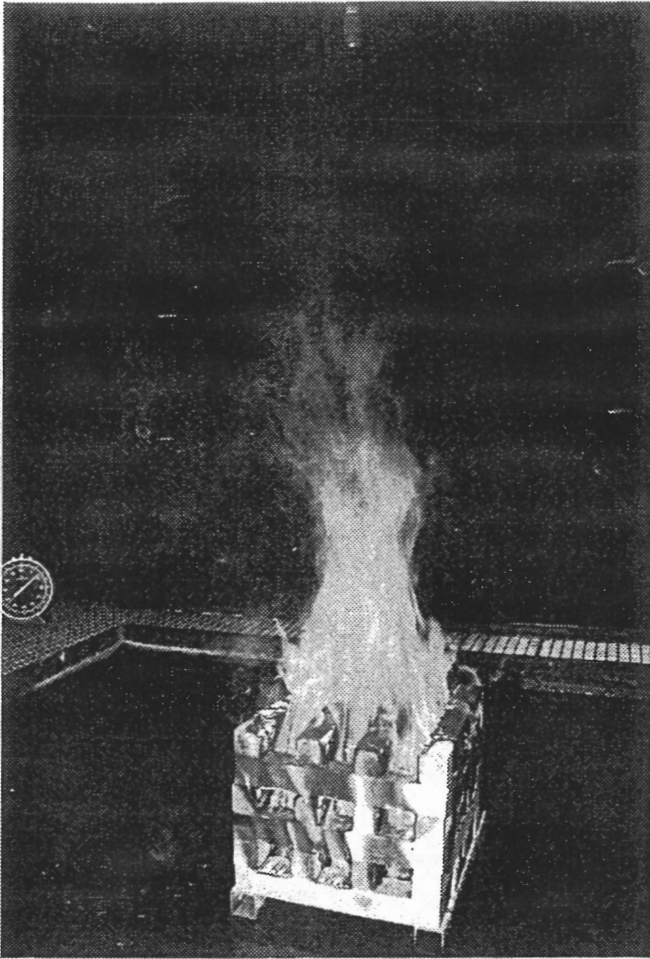


Bild 6a. Brandentwicklung,
Versuchszeit 8 min 38 s.

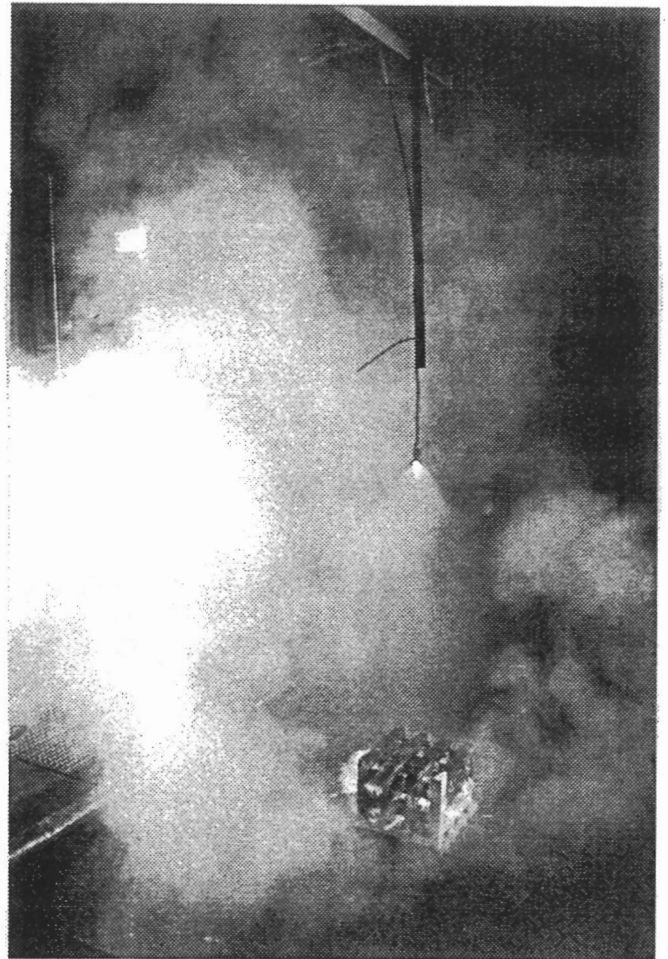


Bild 6b. Löscheinsatz mit Wasser,
Düse 60°.

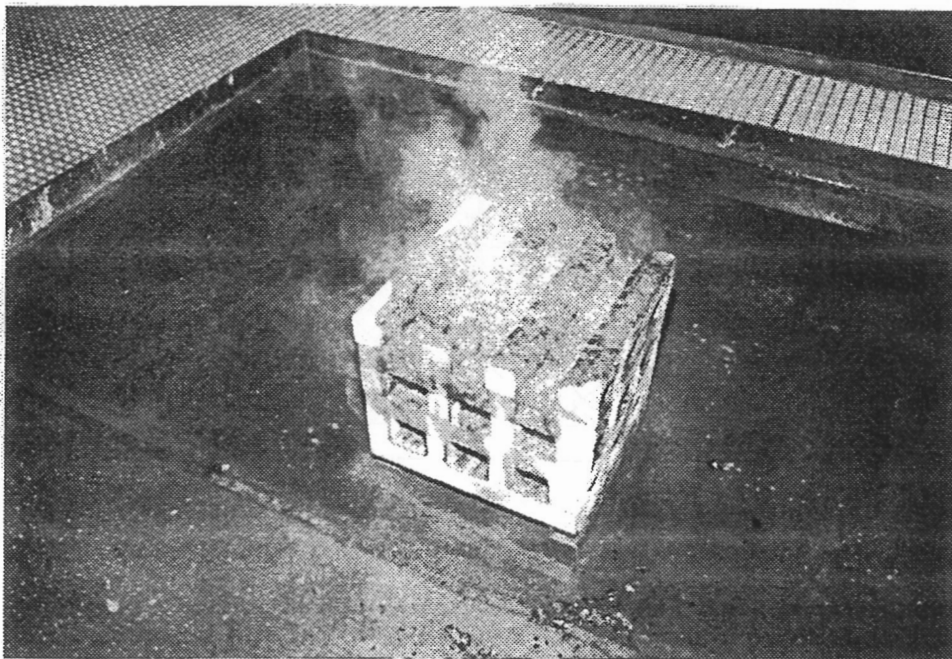


Bild 6c. Abgelöschte Holzkippe HK1.

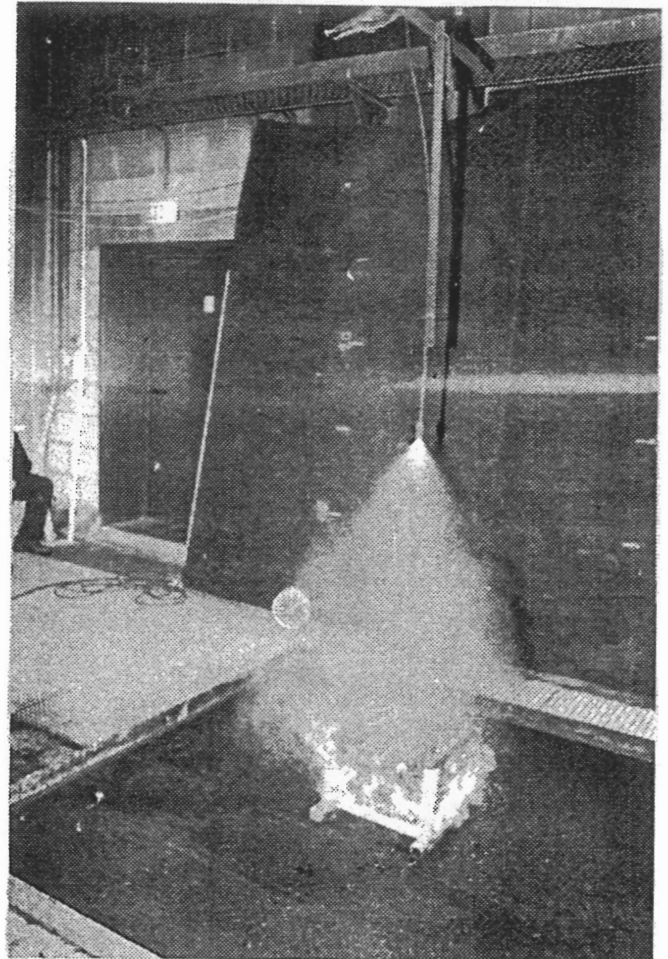
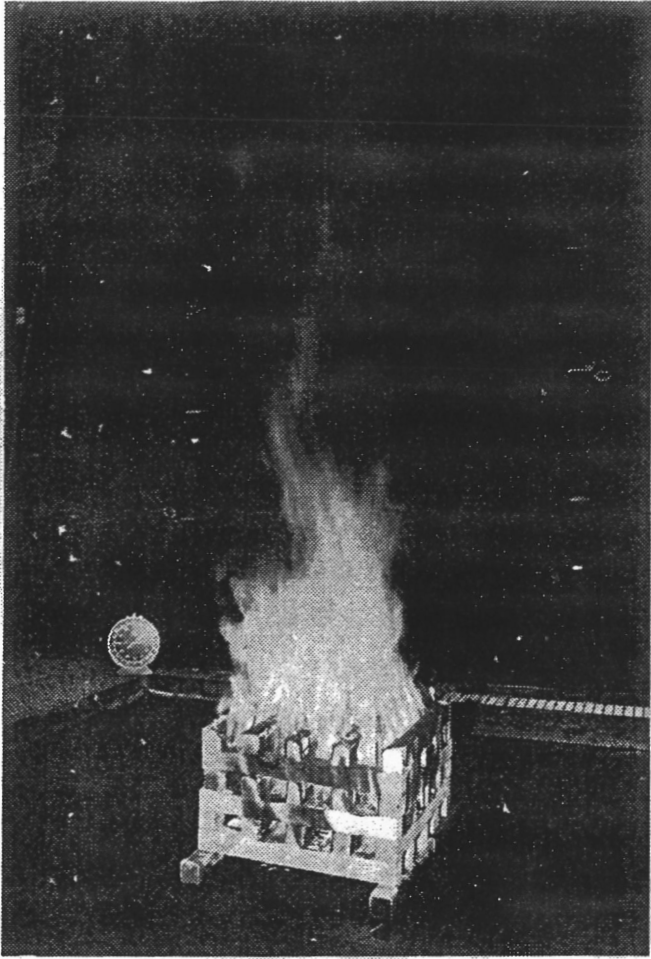


Bild 7a. Brandentwicklung HK2,
Versuchszeit 8 min 45 s.

Bild 7b. Löscheinsatz mit Düse 60°,
Löschmittel A (0,5%).

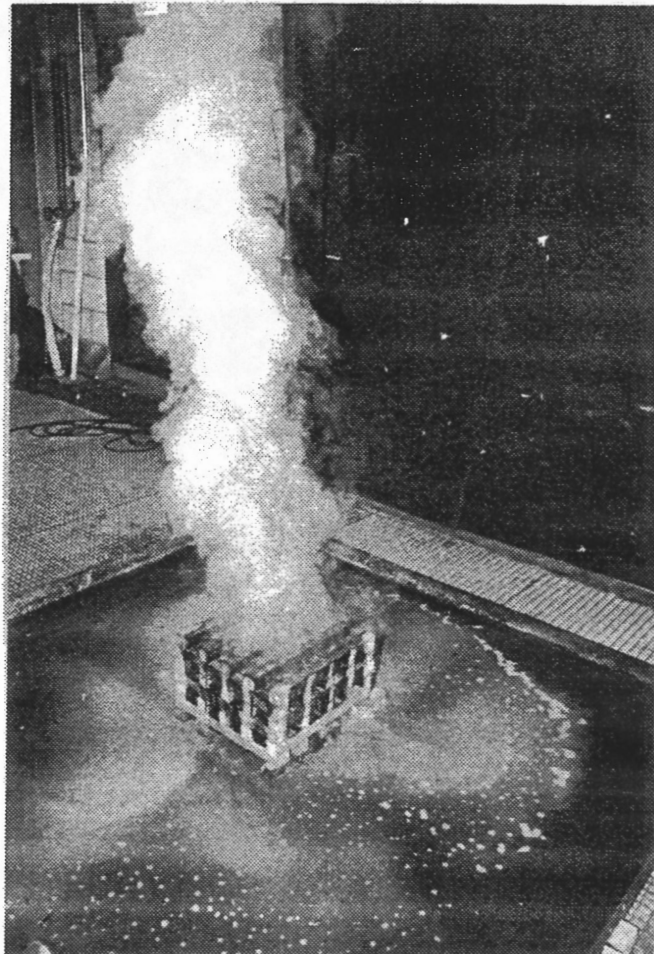


Bild 7c.
Abgelöschte Holzkippe.

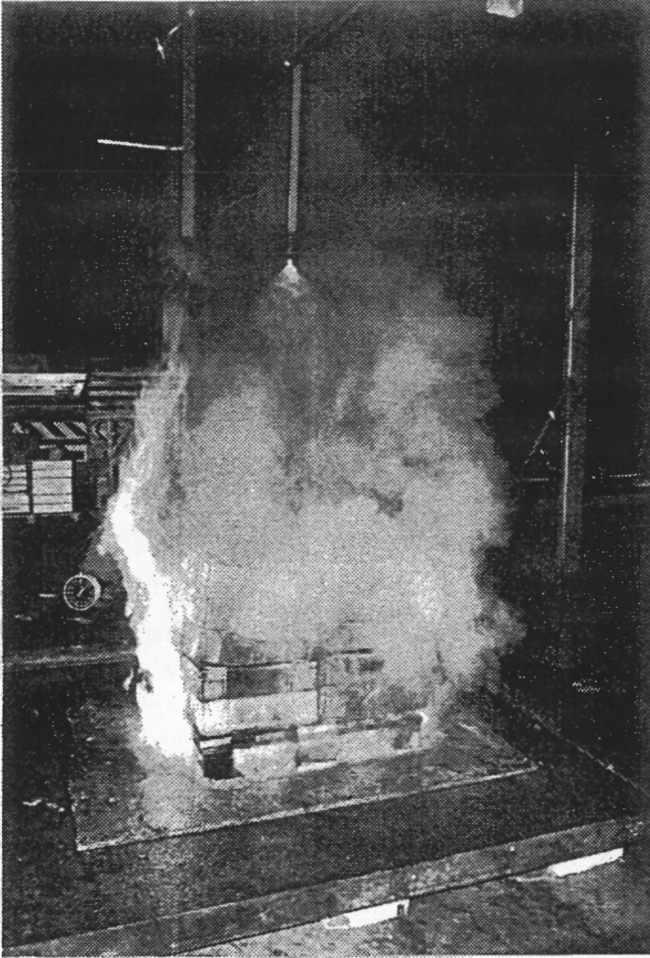


Bild 8a. Brandentwicklung 7 min 30 s,
Löschwasser, Düse 90°, (V18).

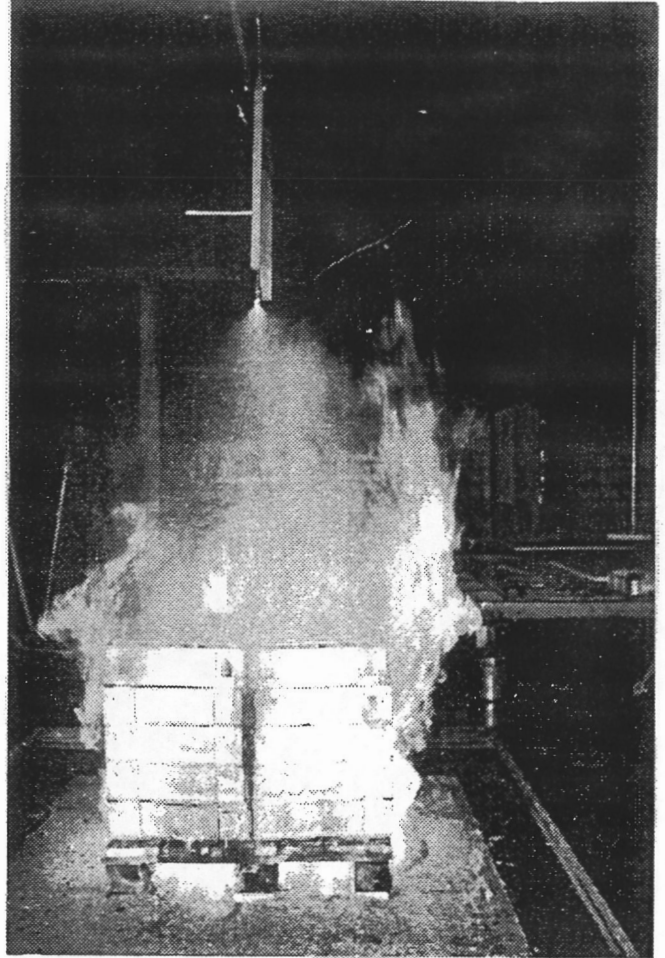


Bild 8b. Brandentwicklung 12 min 10 s,
Löschmittel A(0,5%), Düse 90°, (V19).

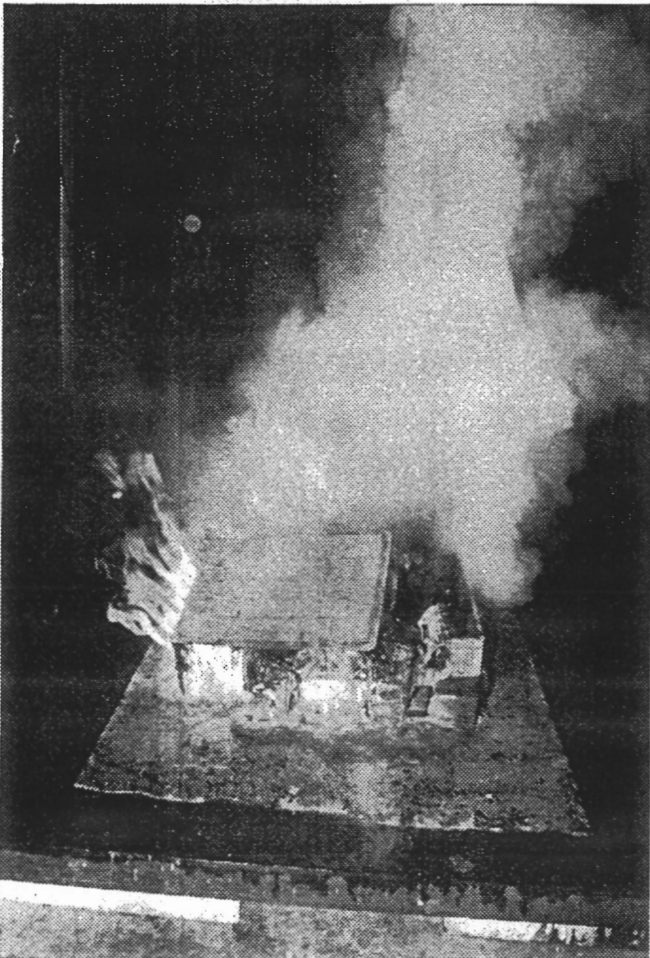


Bild 8c. Versuchszeit 10 min, (V18).

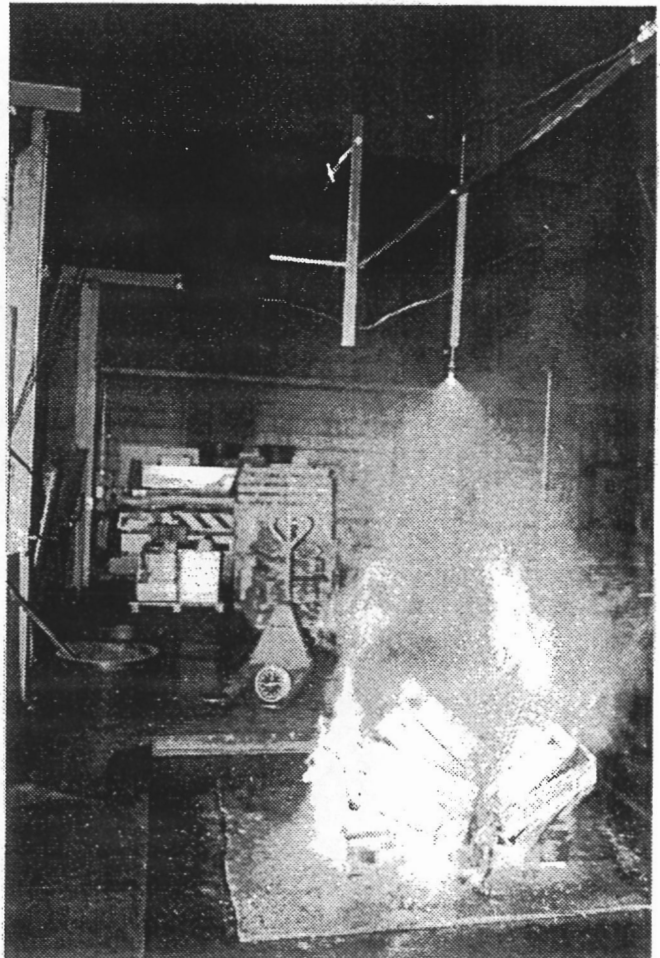


Bild 8d. Versuchszeit 14 min, (V19).

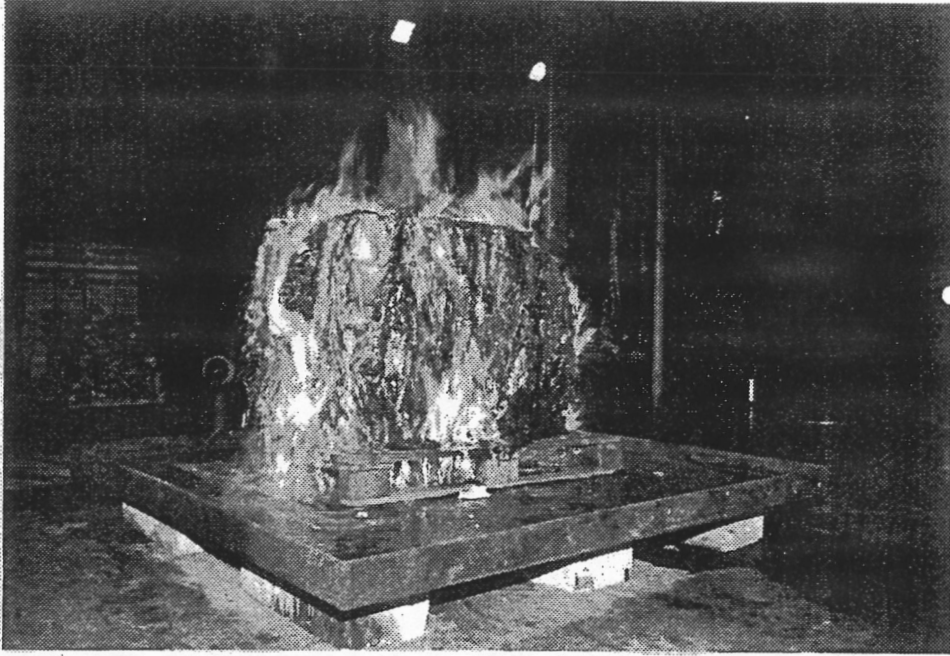


Bild 9a. Brandentwicklung, Versuchszeit 12 min (V20 - V23).

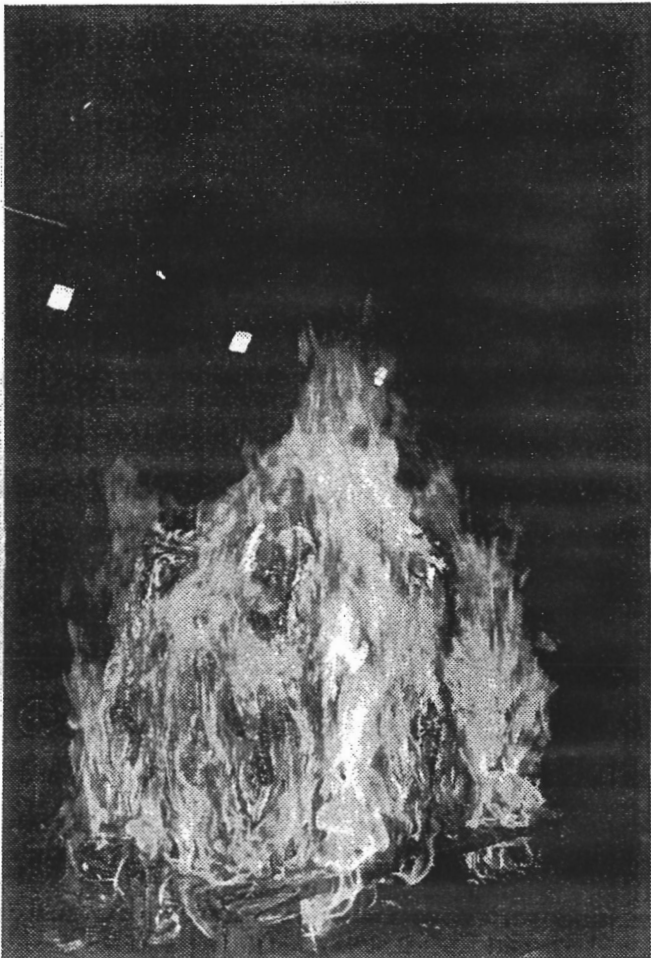


Bild 9b. Beginn des Vollbrandes
Kunststoffballen (V24 - V30).

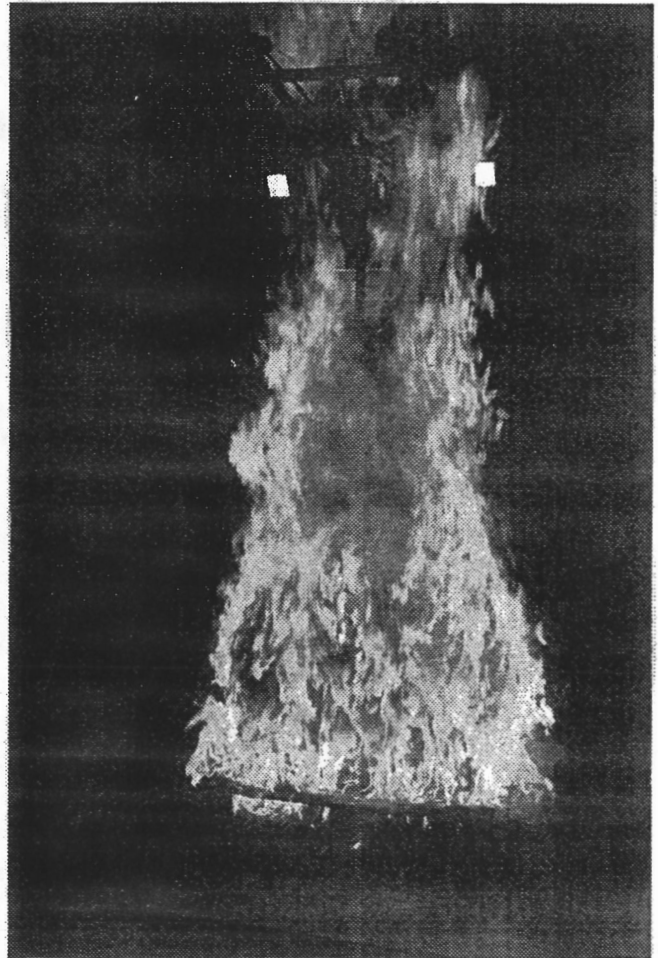


Bild 9c. Voll entwickelter Brand
Kunststoffballen (V24 - V30)

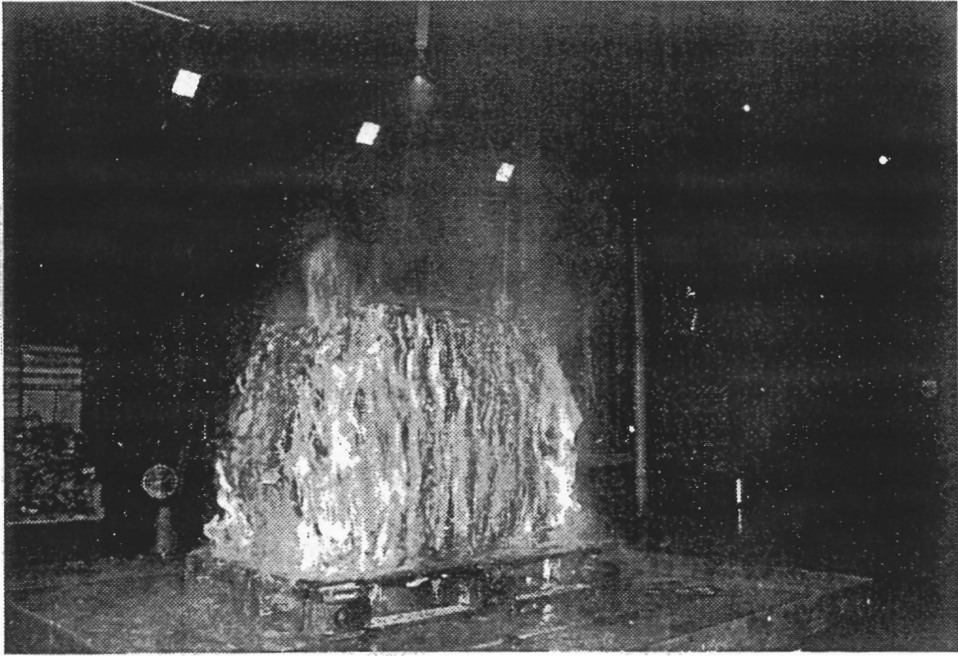


Bild 10a. Ecken des Kunststoffballens nicht gelöscht,
Löschmittel A (0,5%), Düse 90°.

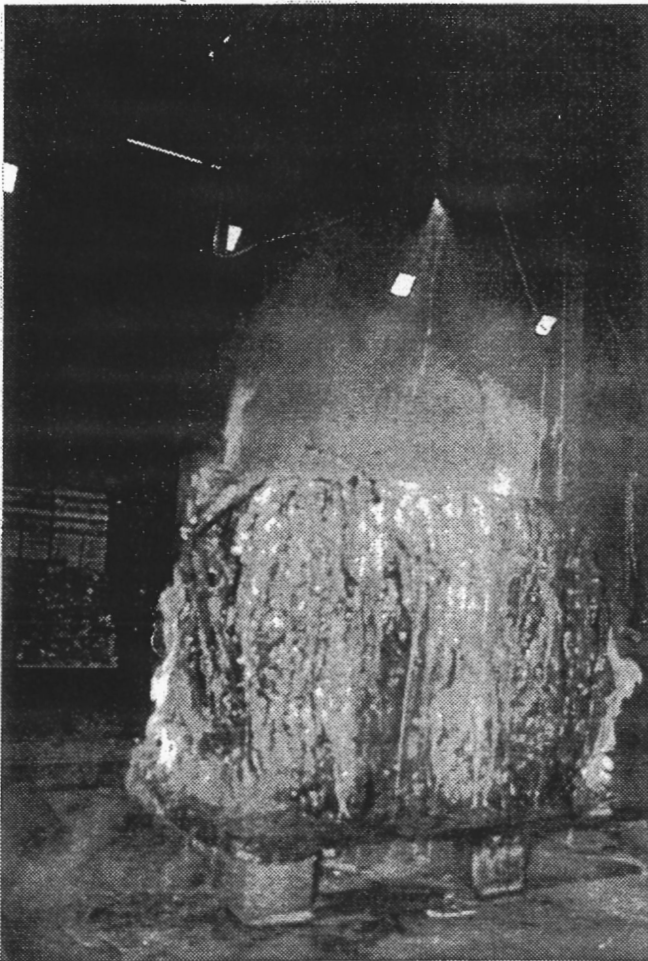


Bild 10b.
Ecken nicht gelöscht,
Löschmittel B (1%),
Düse 90° !!

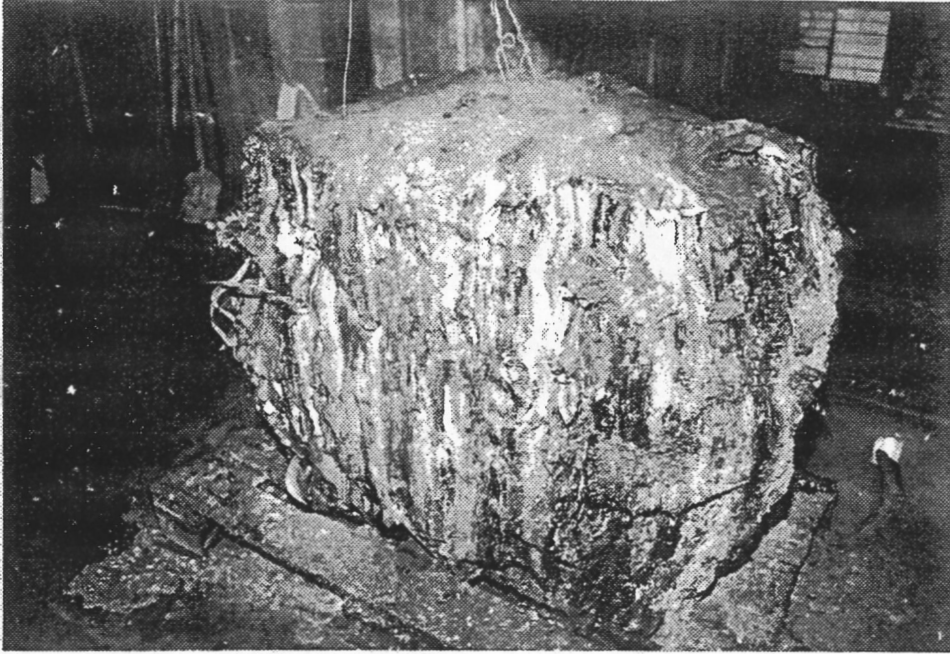


Bild 10c. Schichtenbildung auf der Oberfläche,
eines Kunststoffballens, Löschmittel A (0,5%).

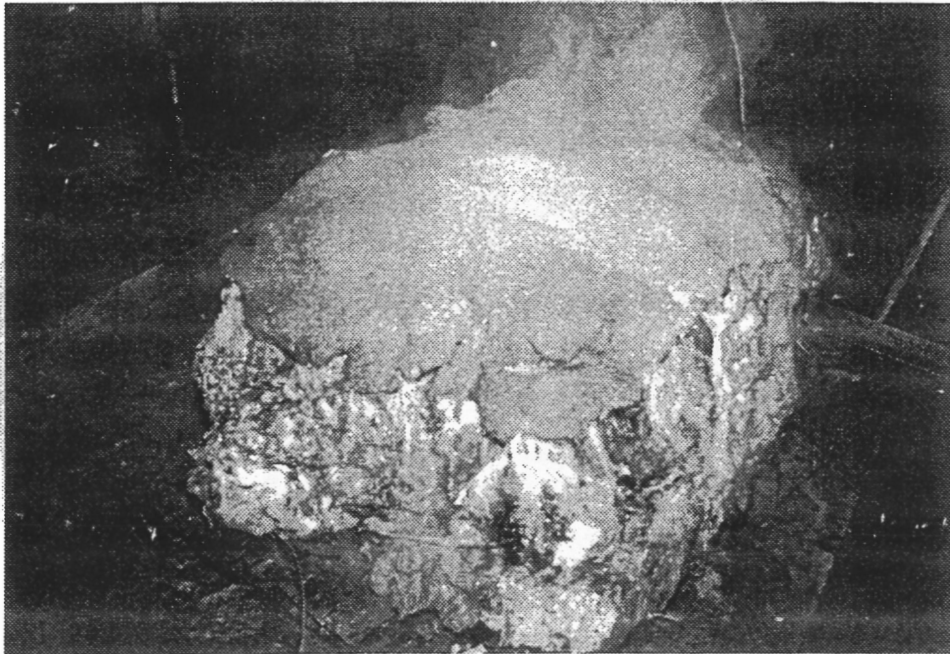


Bild 10d. Schichtenbildung auf der Oberfläche
eines Kunststoffballens, Löschmittel A (1%).



Bild 11a. Brandausbreitung HK3,
Versuchszeit 5 min.

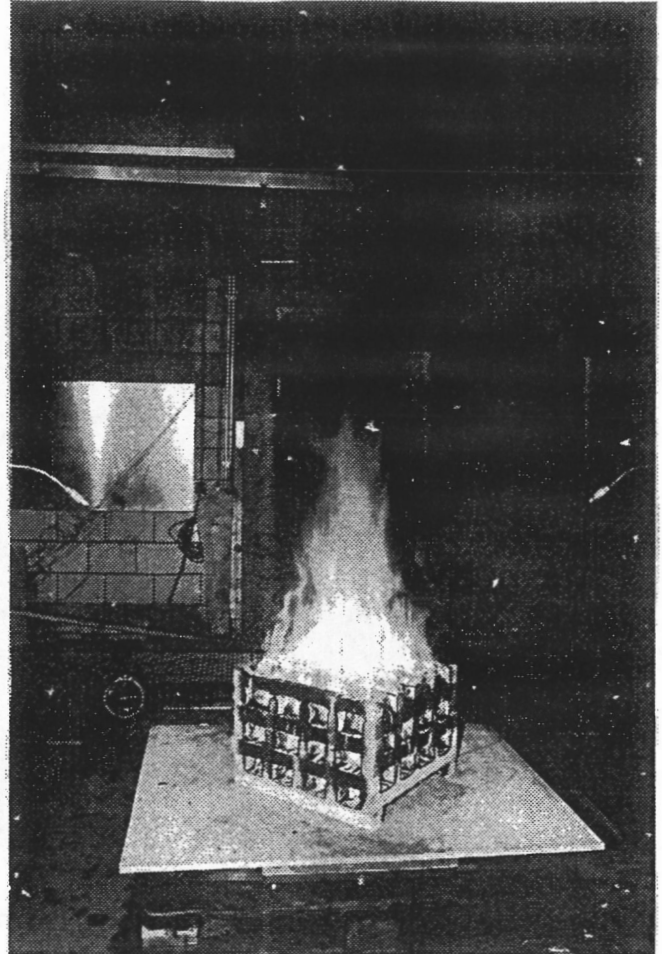


Bild 11b. Konstanter Abbrand HK3,
Versuchszeit 15 min.

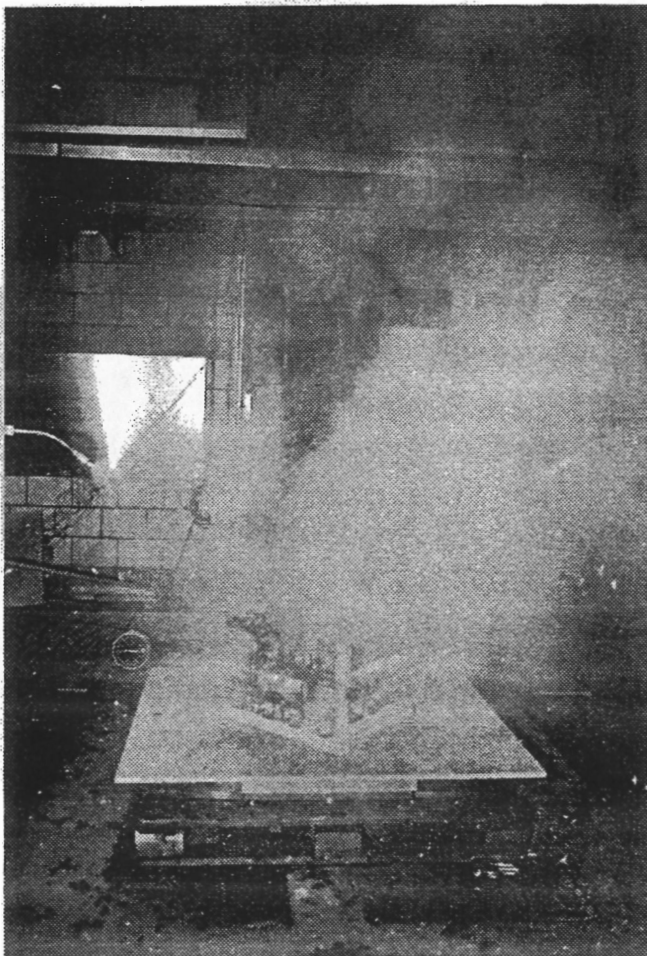


Bild 11c.
Löscheinsatz mit
2 Düsen 120°.

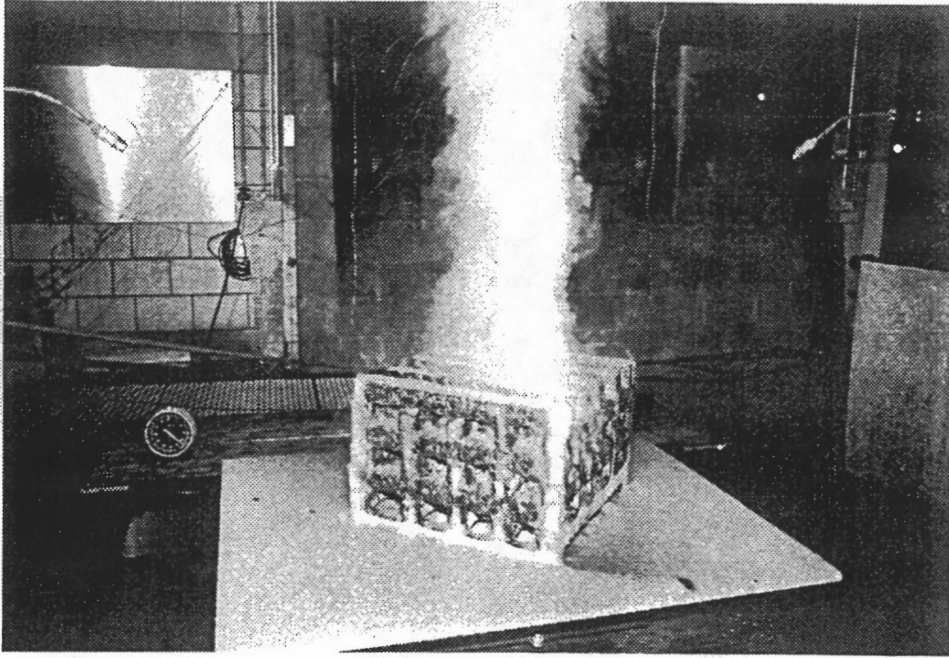


Bild 11d. Abgelöschte Holzkippe, Löschmittel A (1%).
2 Düsen 120°, Versuchszeit 22 min.

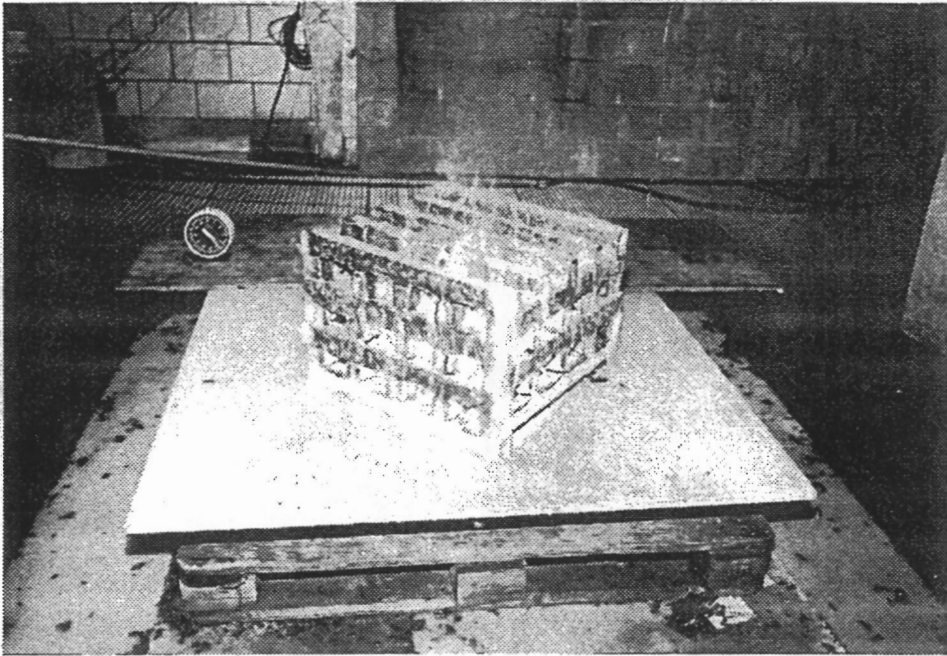


Bild 11e. Erneute Flammenbildung, Löschmittel A(1,25%).
2 Düsen 120°, Versuchszeit 23 min 22 s.

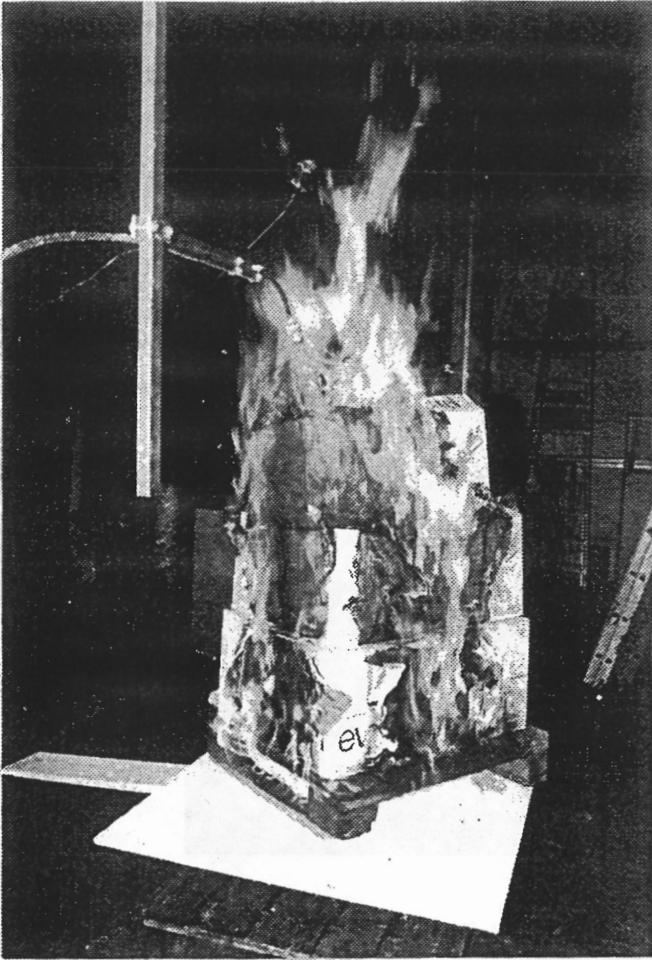


Bild 12a. Brandausbreitung bei Kartons mit Flaschen, Versuchszeit 3 min.

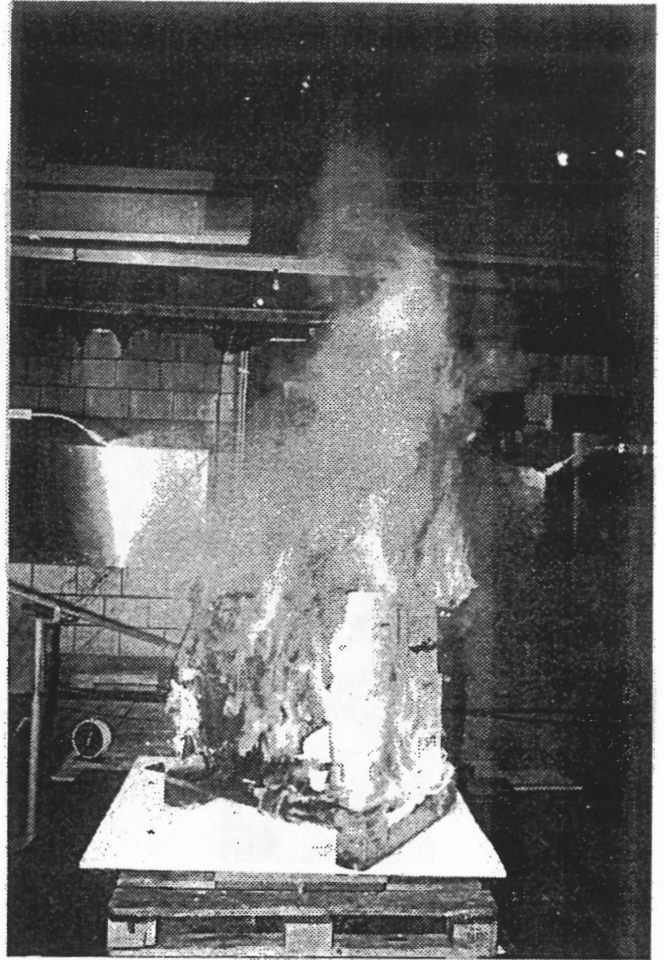


Bild 12b. Löschbeginn mit Wasser, Versuchszeit 2 min 55 s, 2 Düsen.

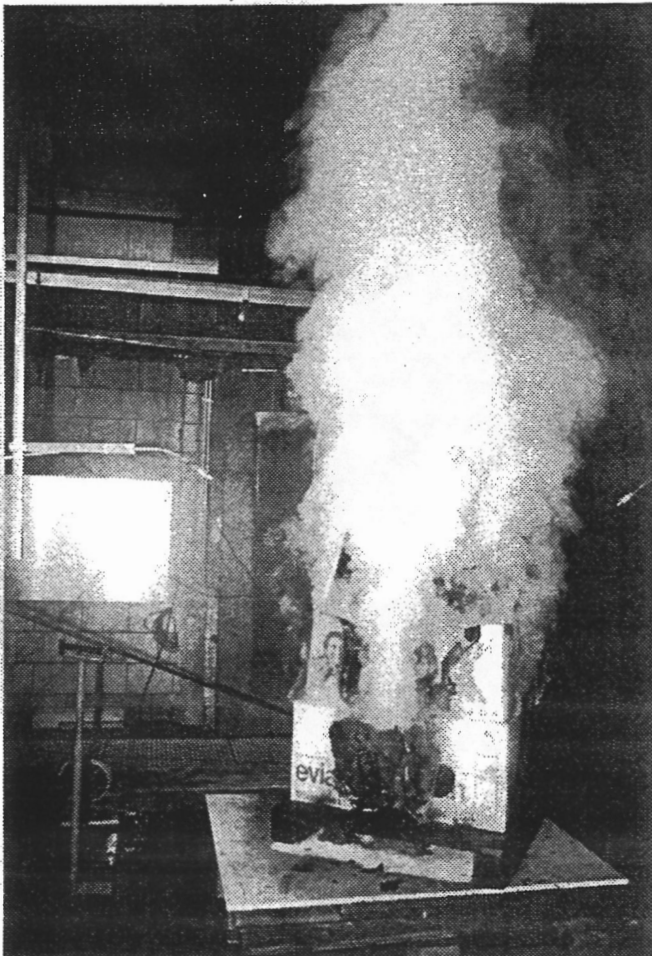


Bild 12c. Brand gelöscht, Löschmittel B (1,5%).

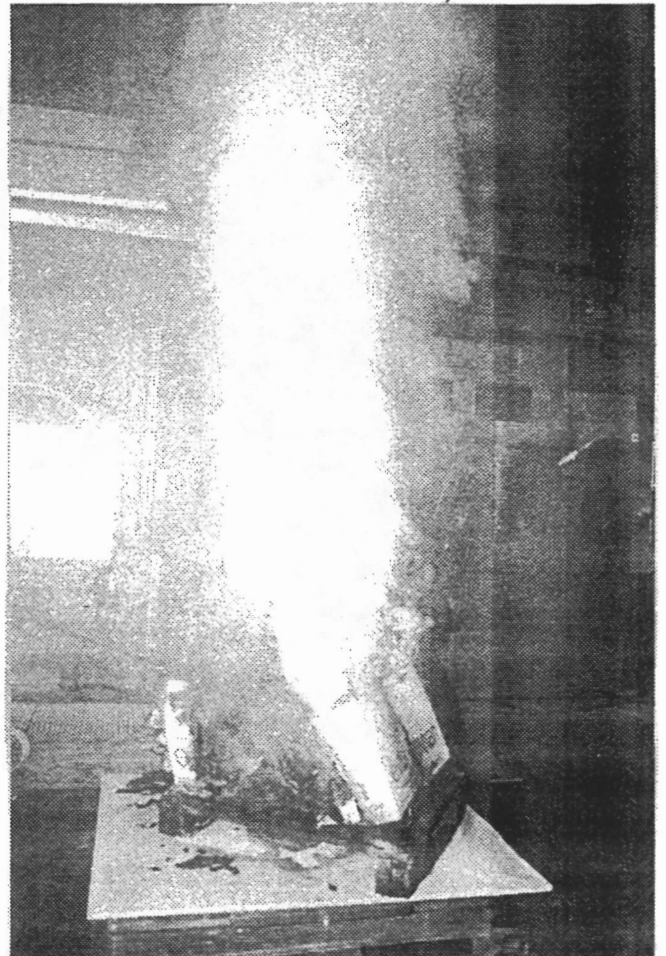


Bild 12d. Brand gelöscht, Löschmittel Wasser.



Bild 13a. Vollbrand,
Flammen umhüllen den Ballen

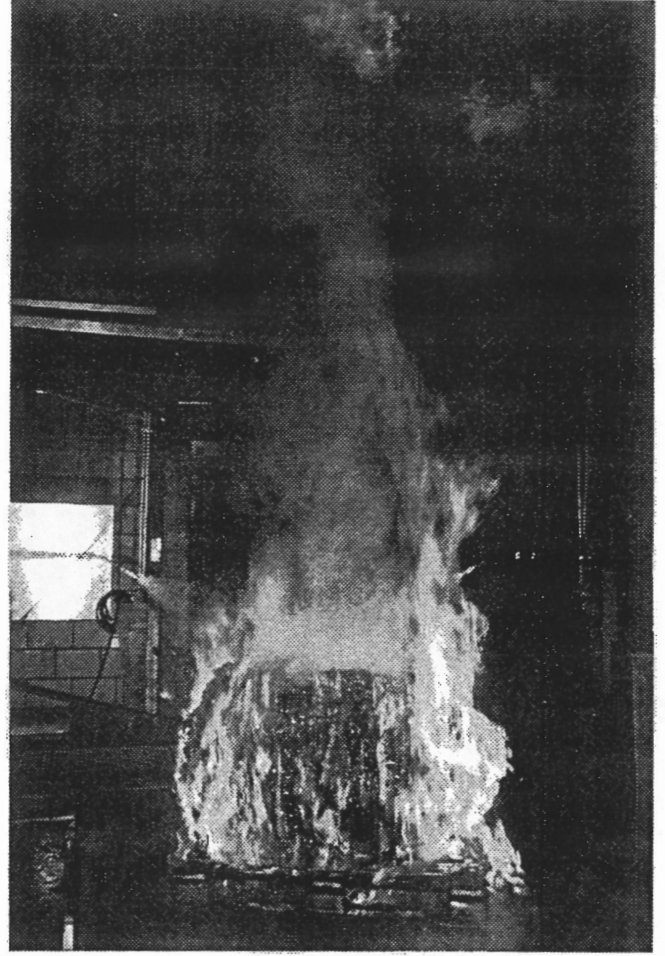


Bild 13b. Löschbeginn,
Löschmittel B (1,5%), 2 Düsen 120°.

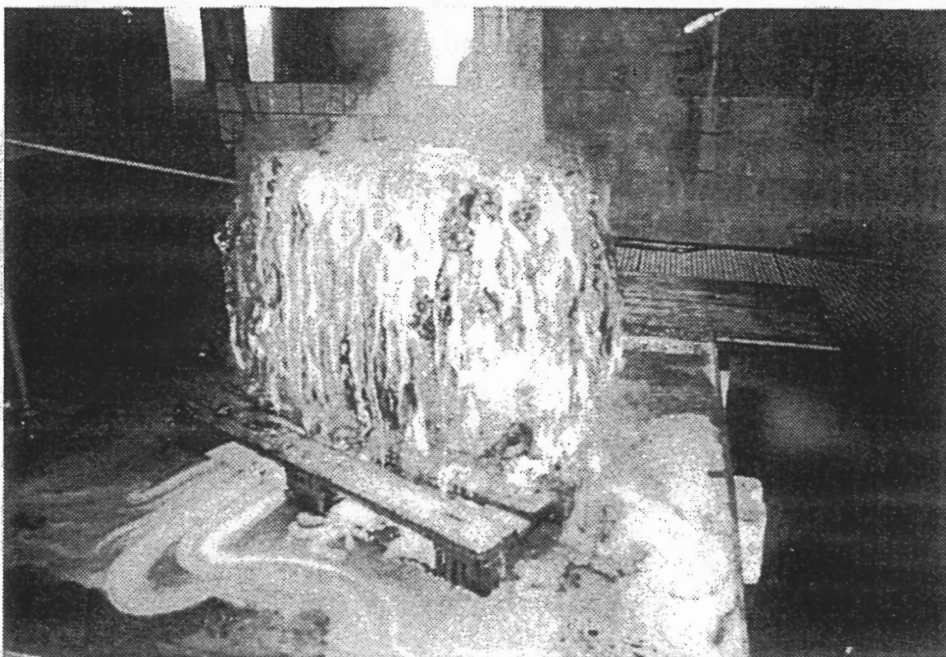


Bild 13c. Schichtenbildung und Abfließen des
Löschmittels B (1,5%), Restflammen an den Seiten.

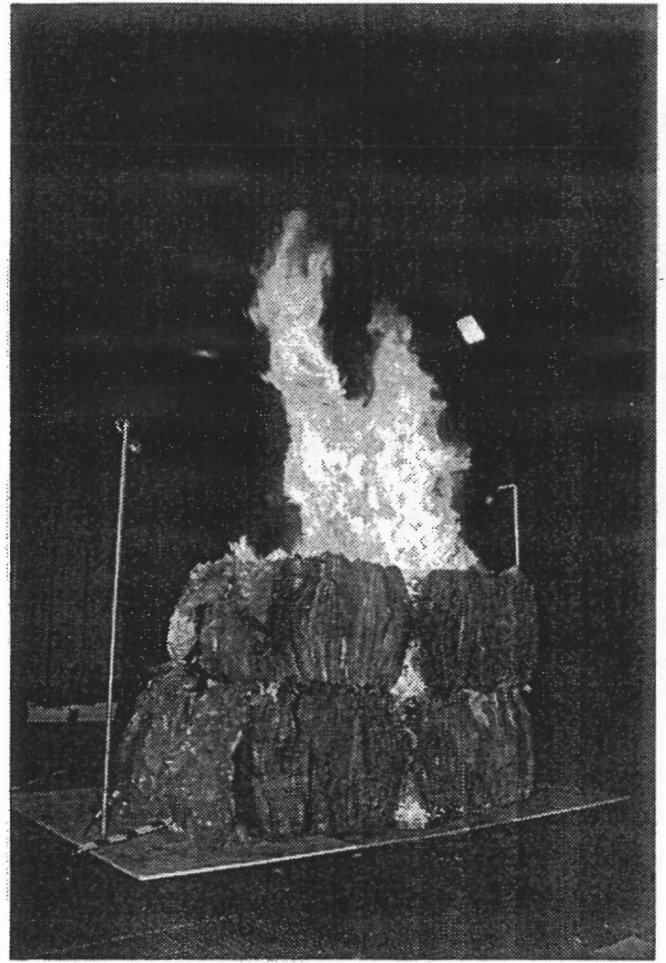
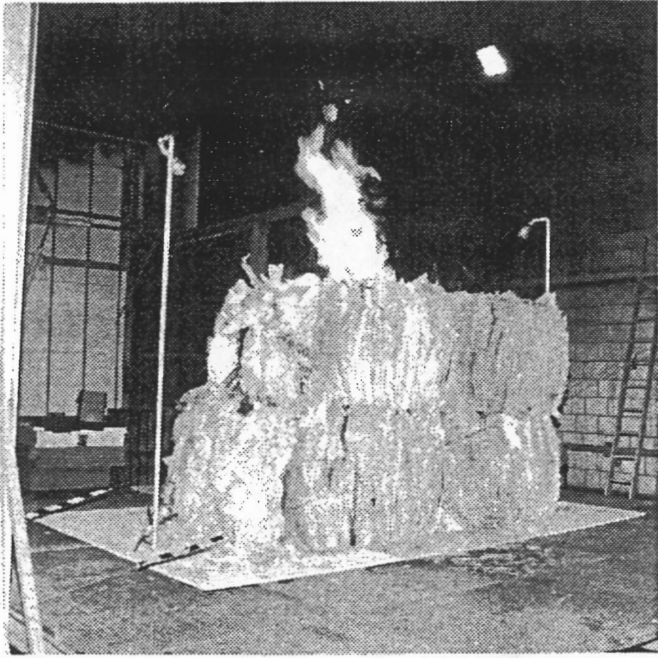


Bild 14a. Brandverlauf nach 1 min, Bild 14b. Brandverlauf nach 4 min,
In 2 Lagen wurden je 4 halbe Kunststoffballen gestapelt.

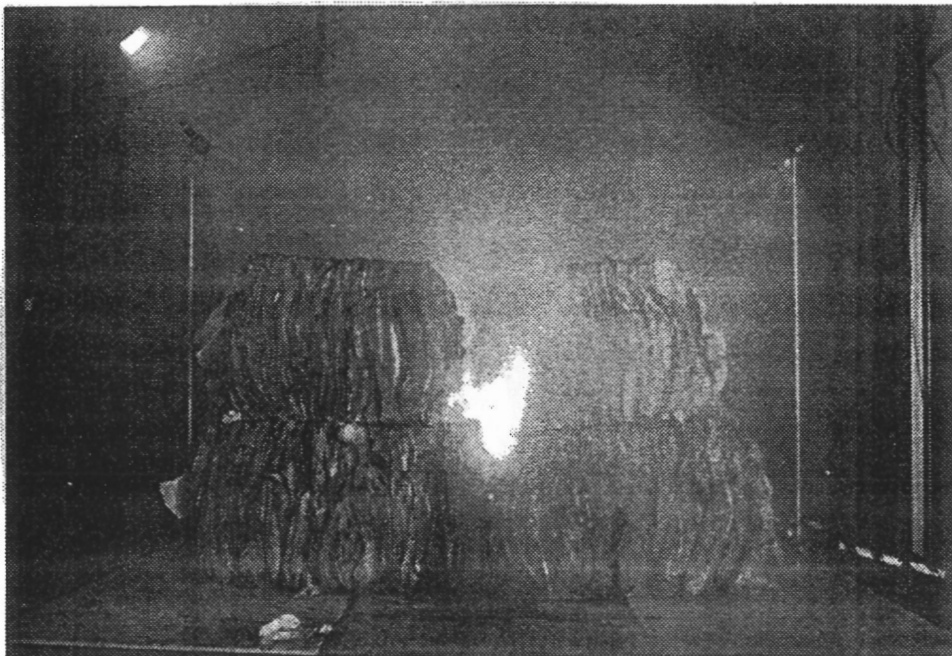


Bild 14c. Löscheinsatz mit 2 der 4 Sprühköpfen
und seitlich herausschlagenden Flammen.

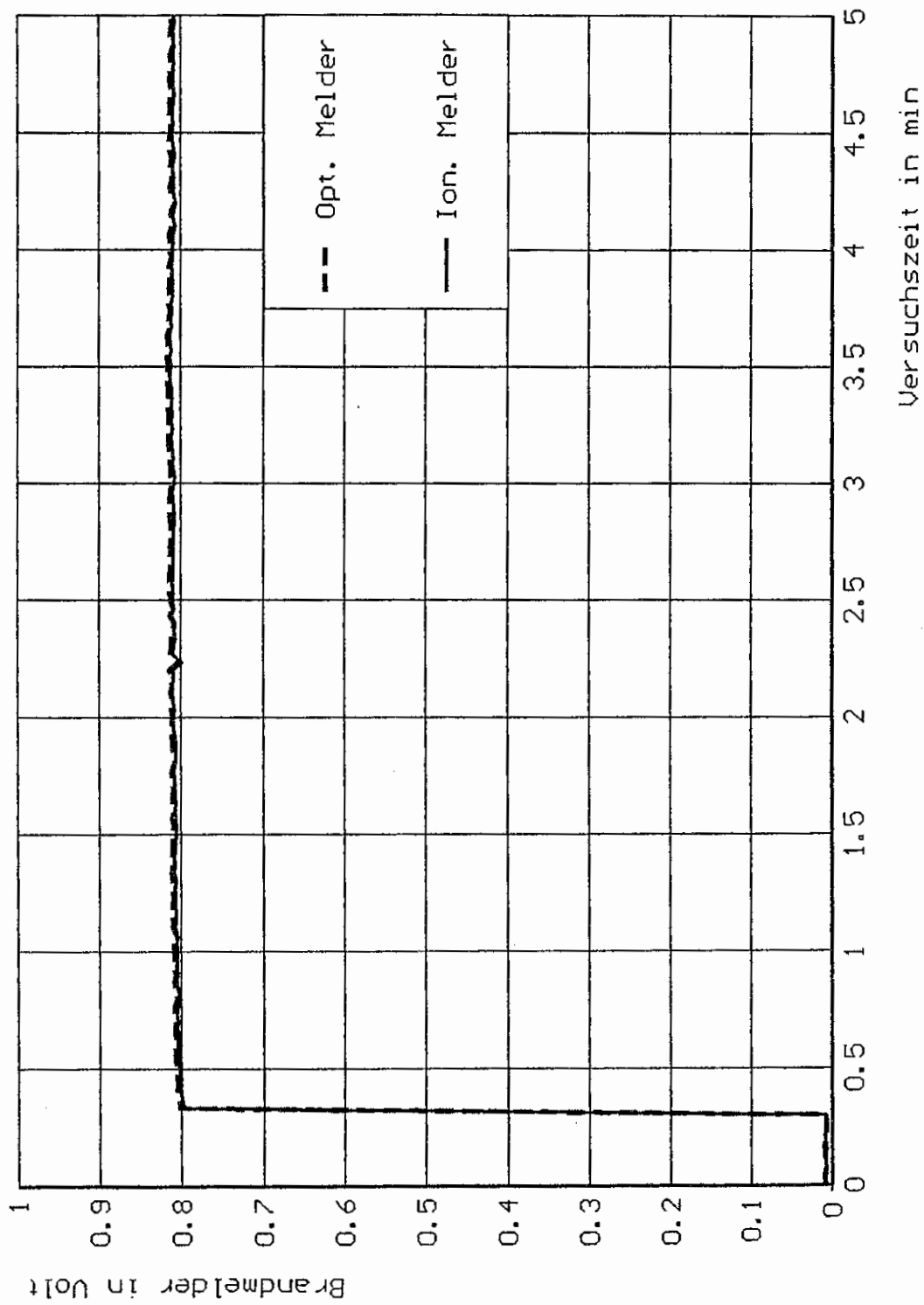


Bild 15. Auslösen der zentralen Brandmelder

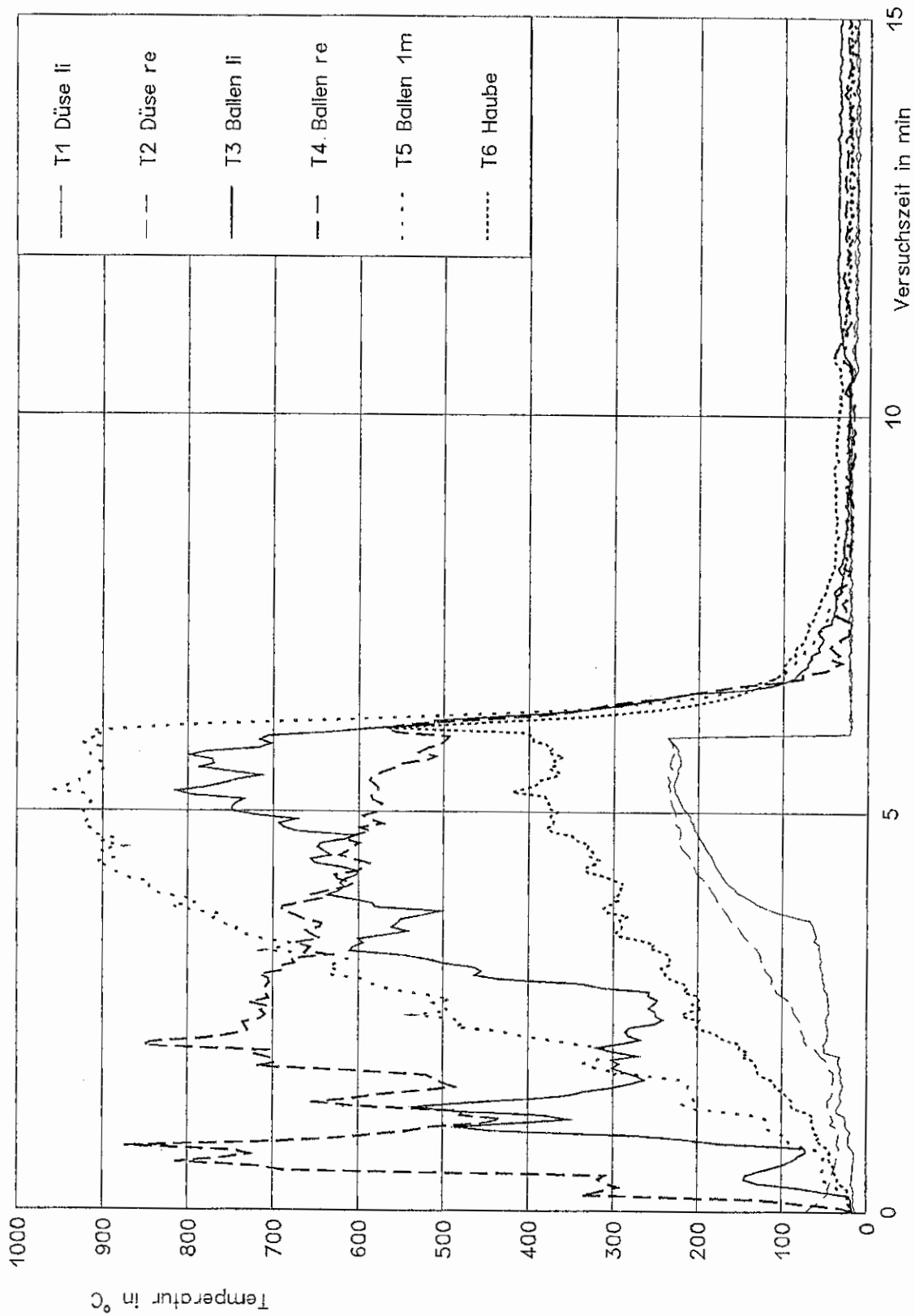


Bild 16. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6.
(Versuch V24)

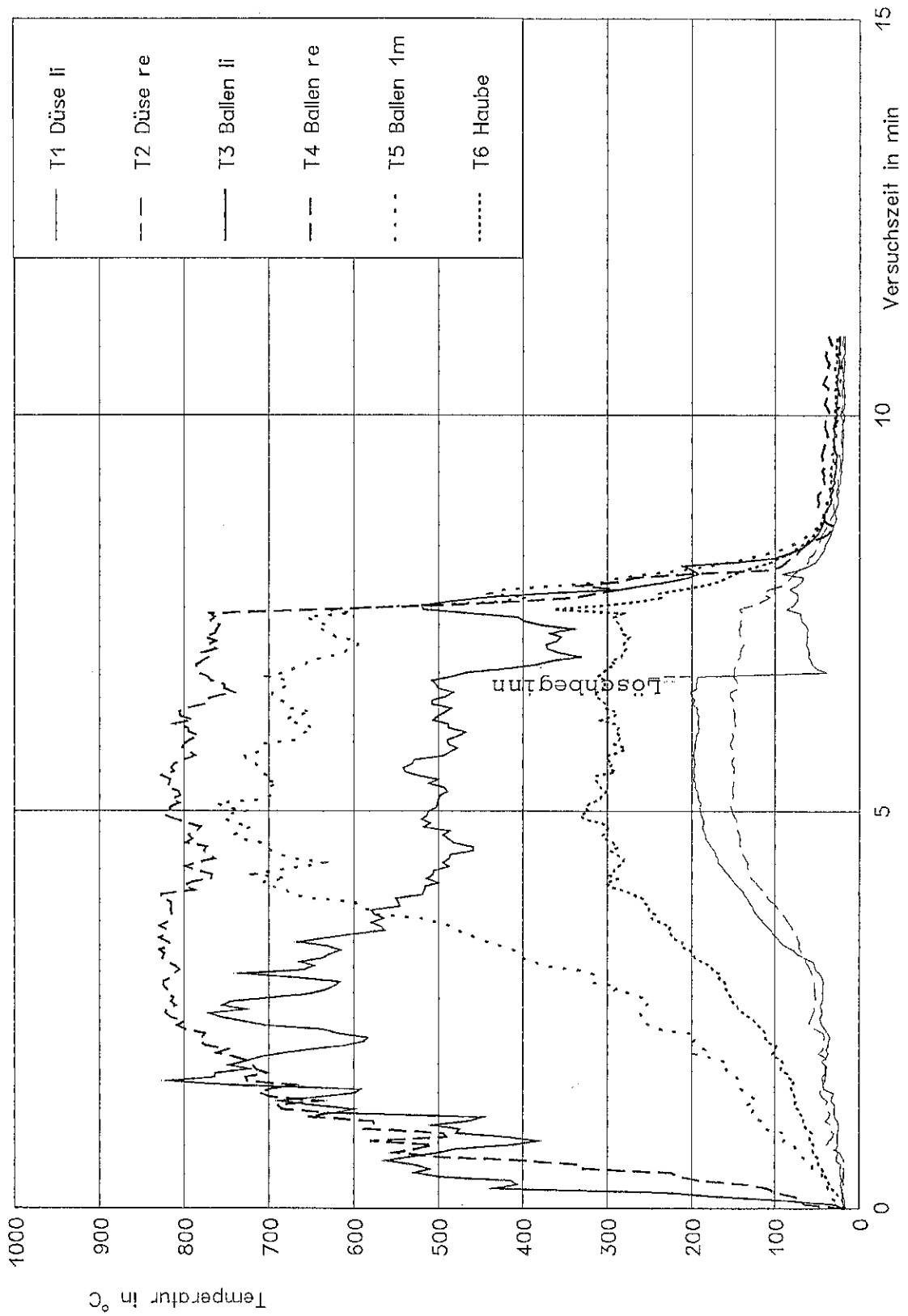


Bild 17. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V25).



Bild 18. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V26).

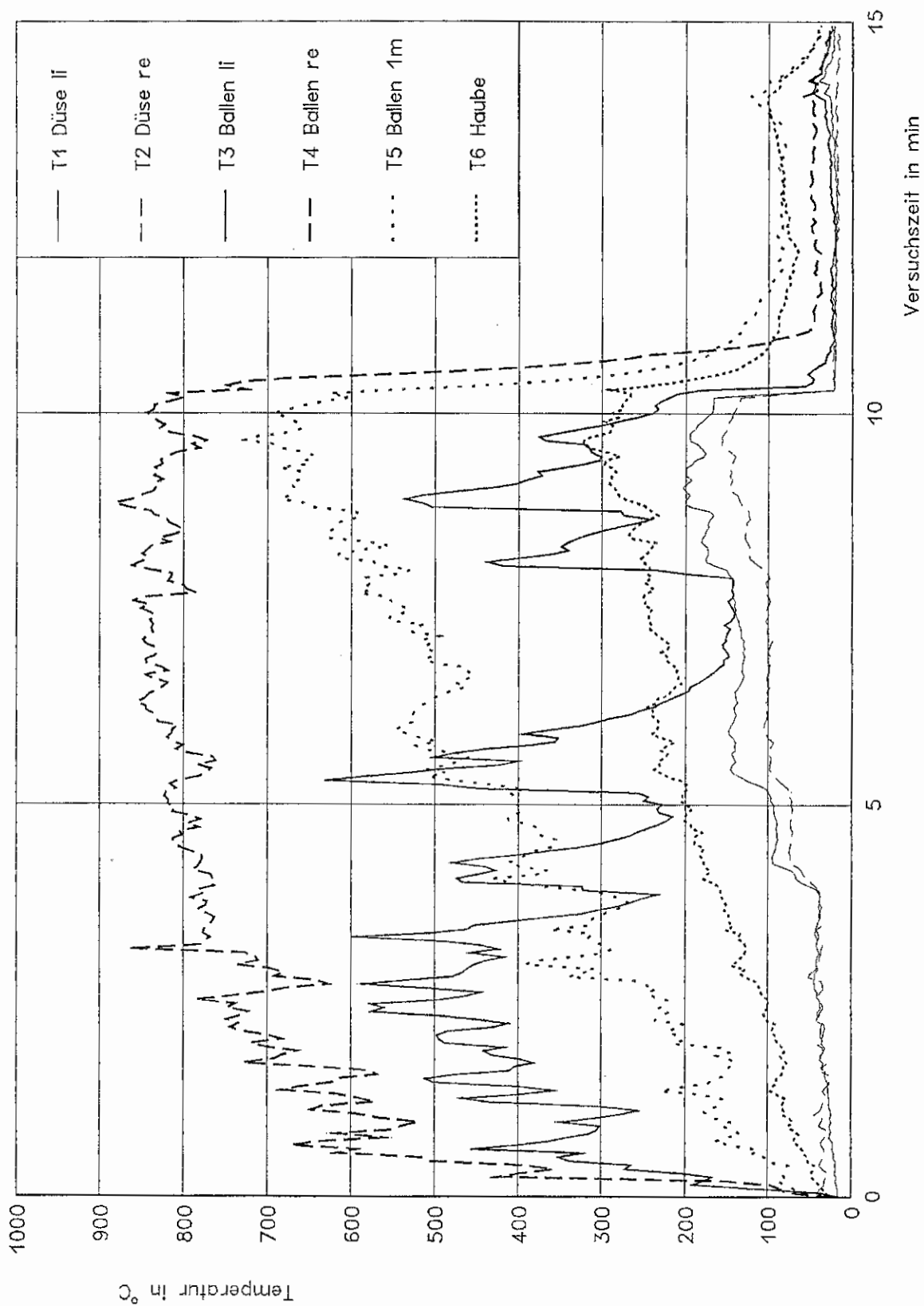


Bild 19. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V27).

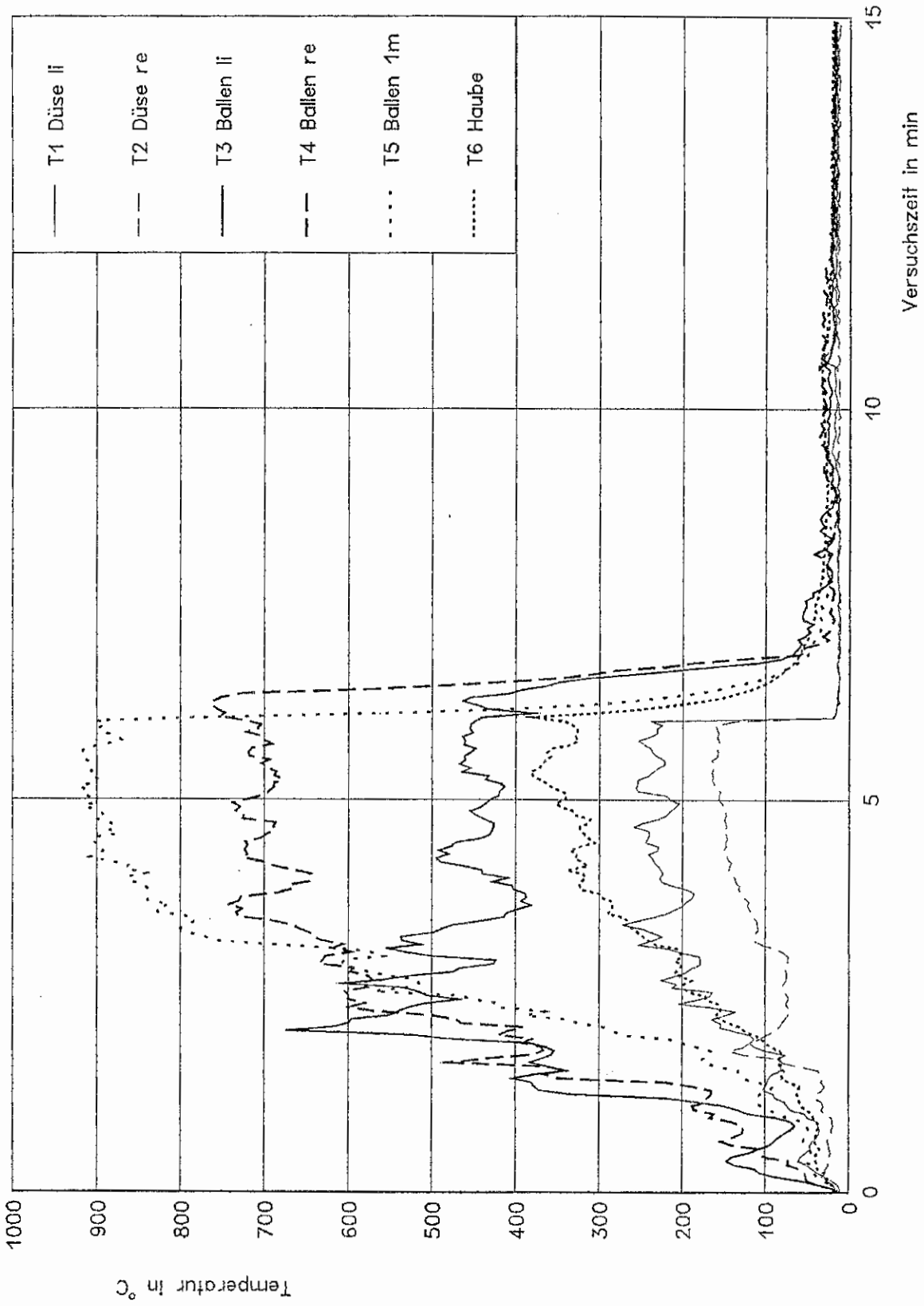


Bild 20. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V28).

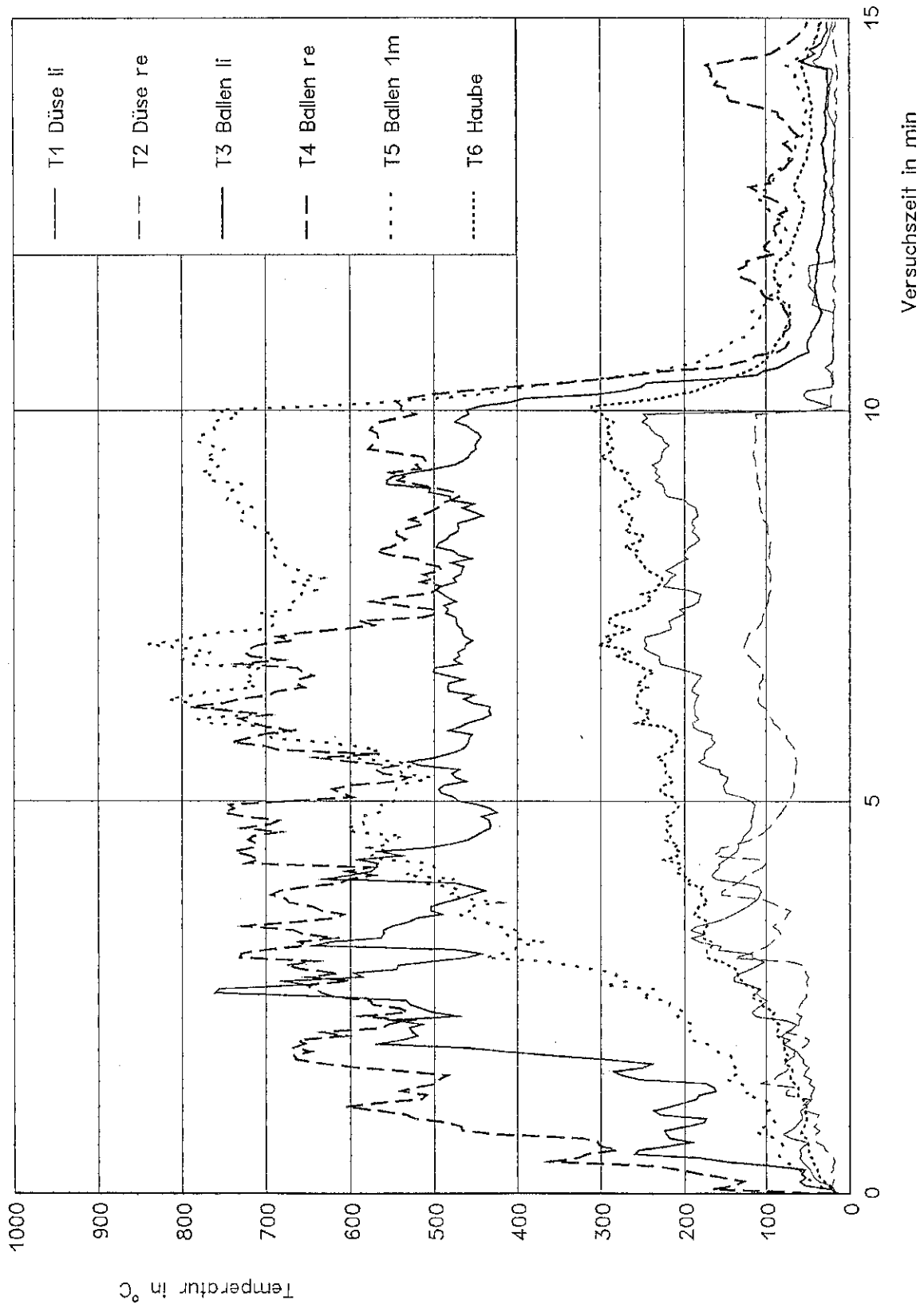


Bild 21. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V29).

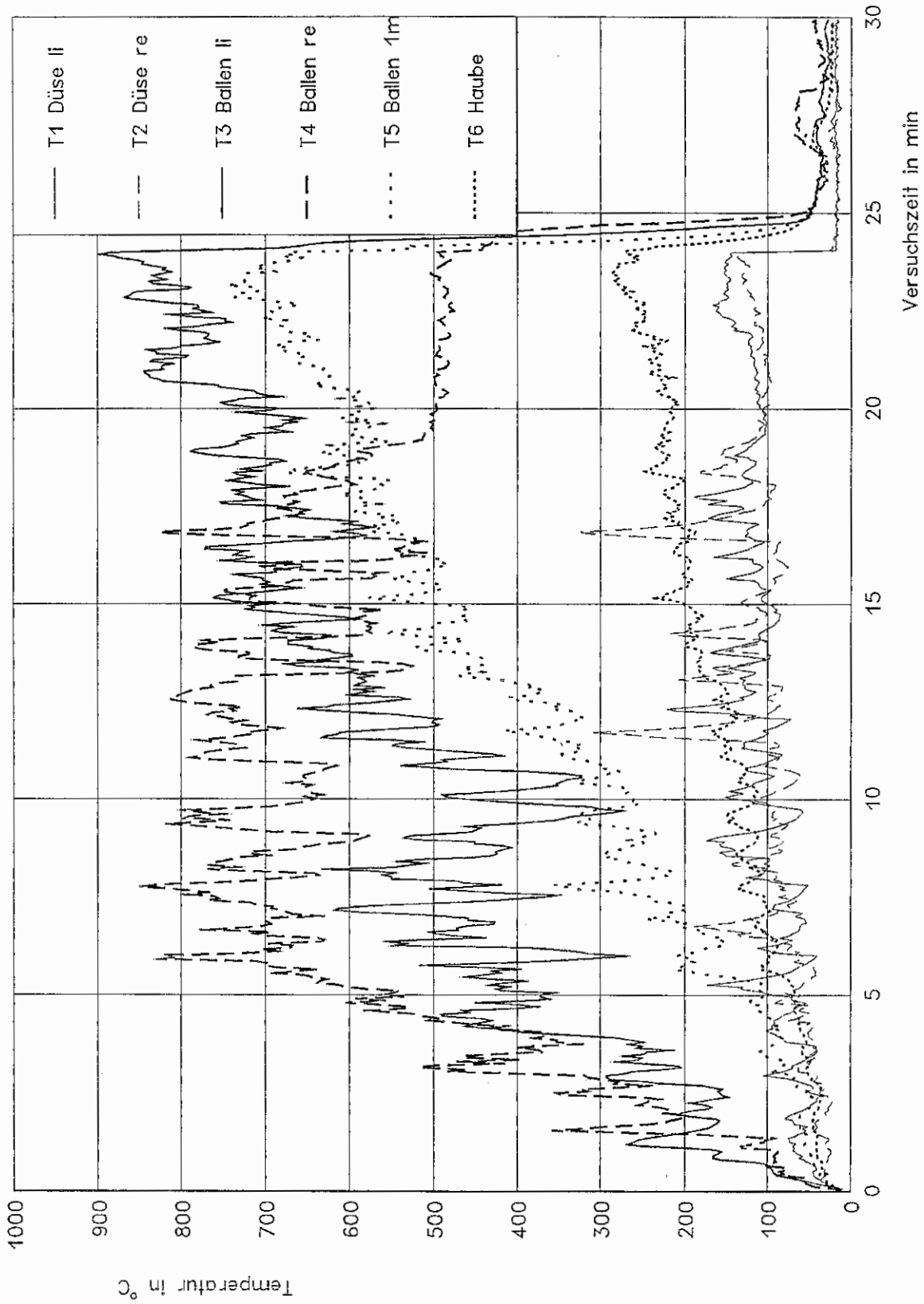


Bild 22. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V30).

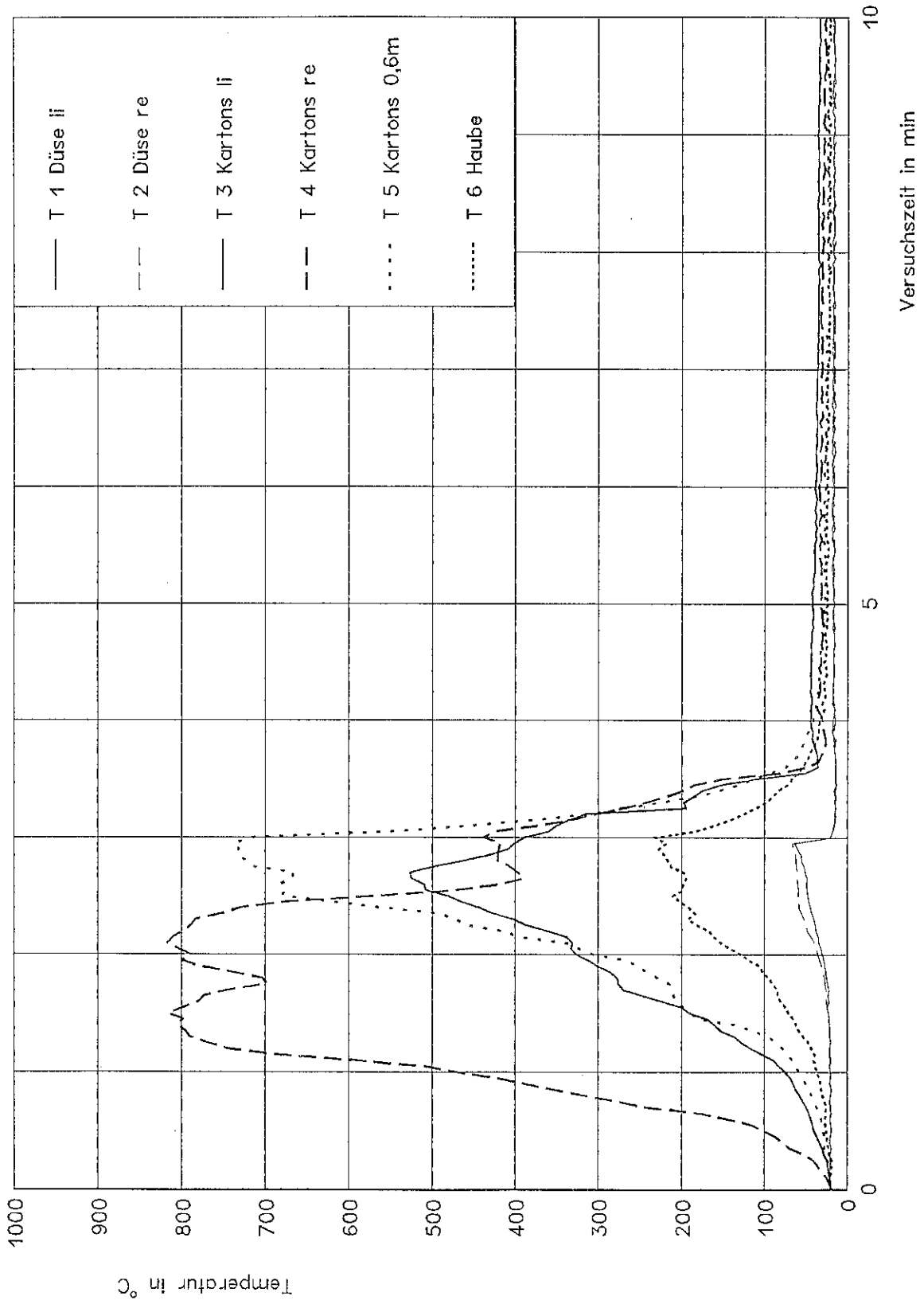


Bild 23. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V31).

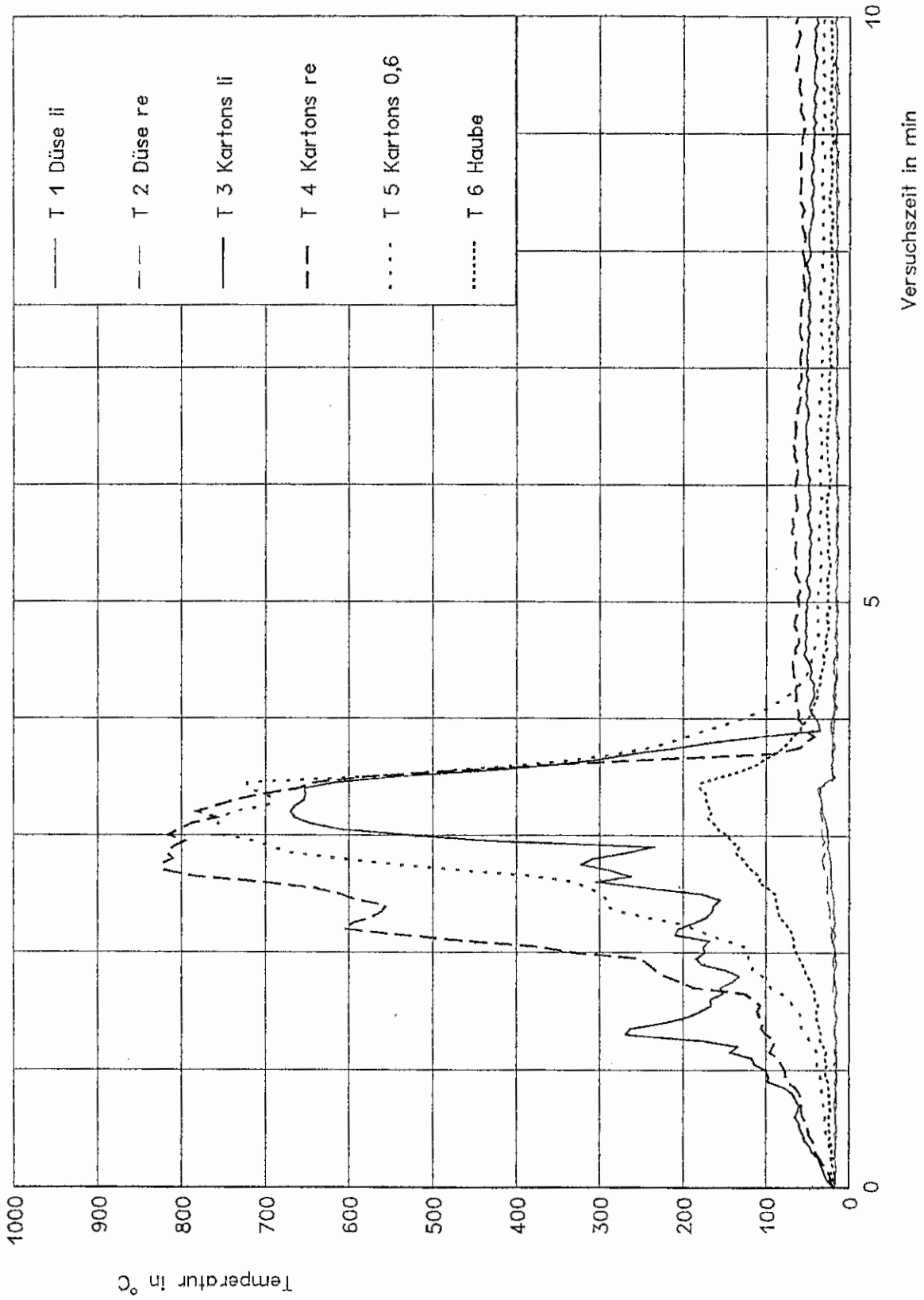


Bild 24. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V32).

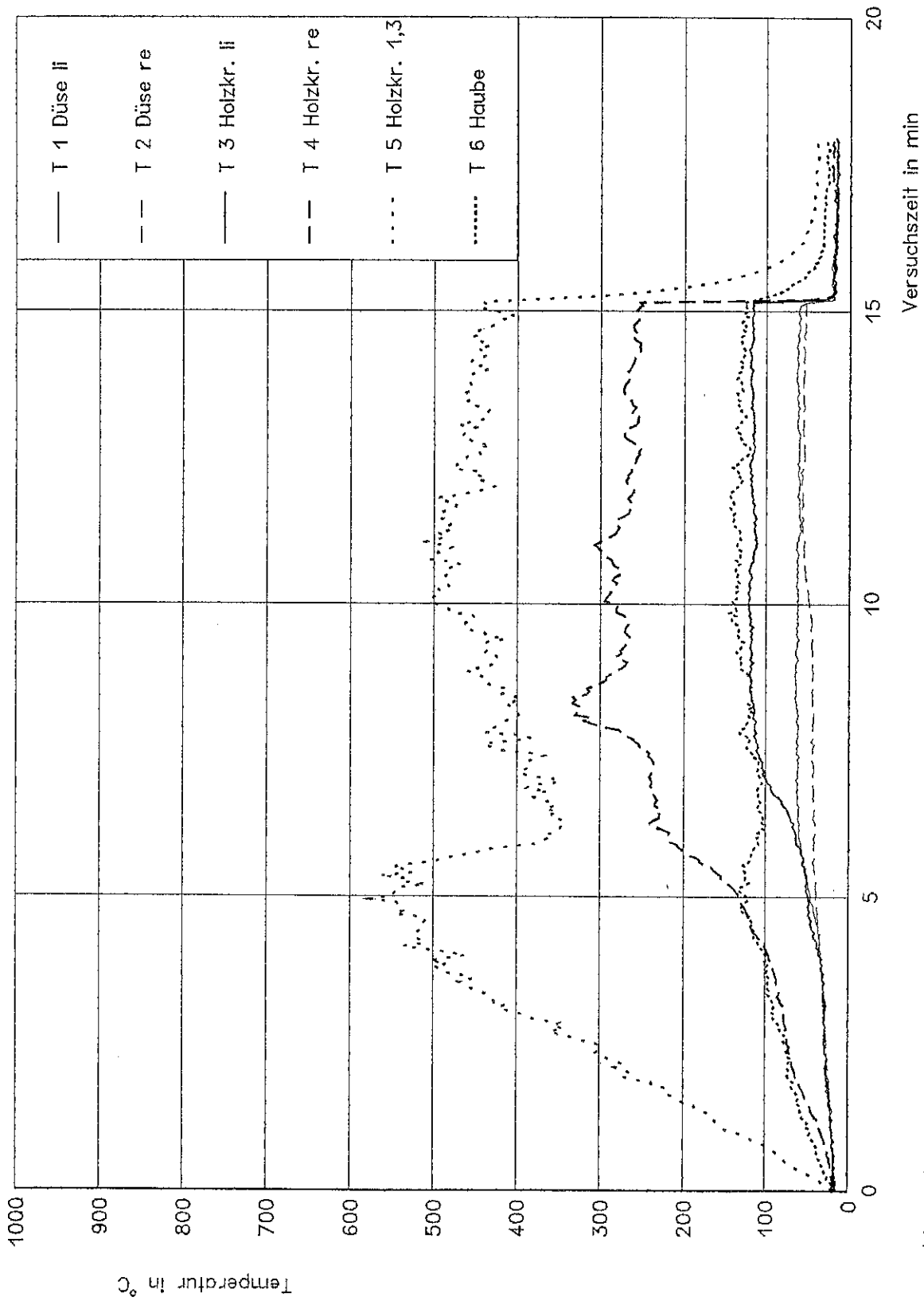


Bild 25. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V33).

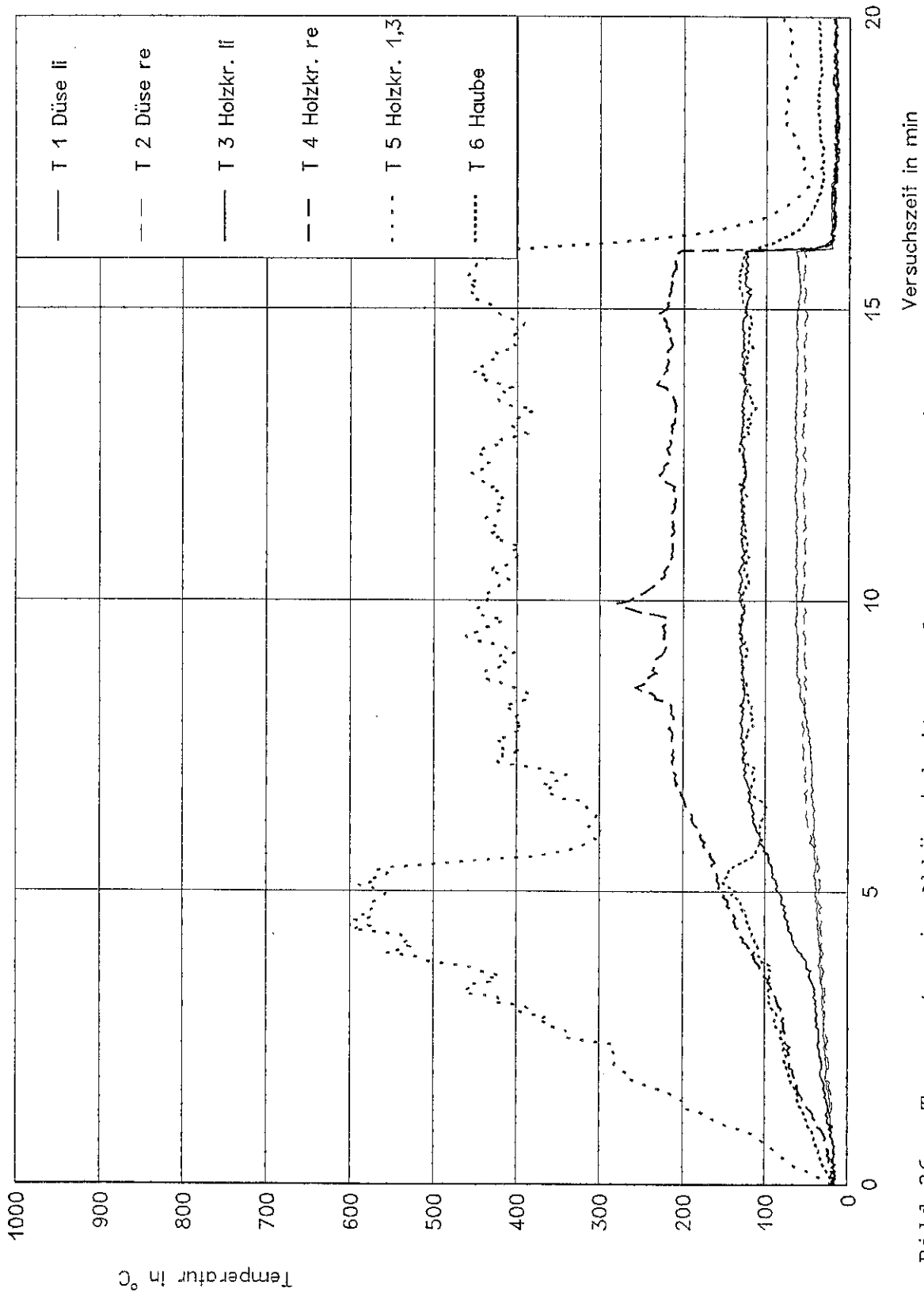


Bild 26. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V34).

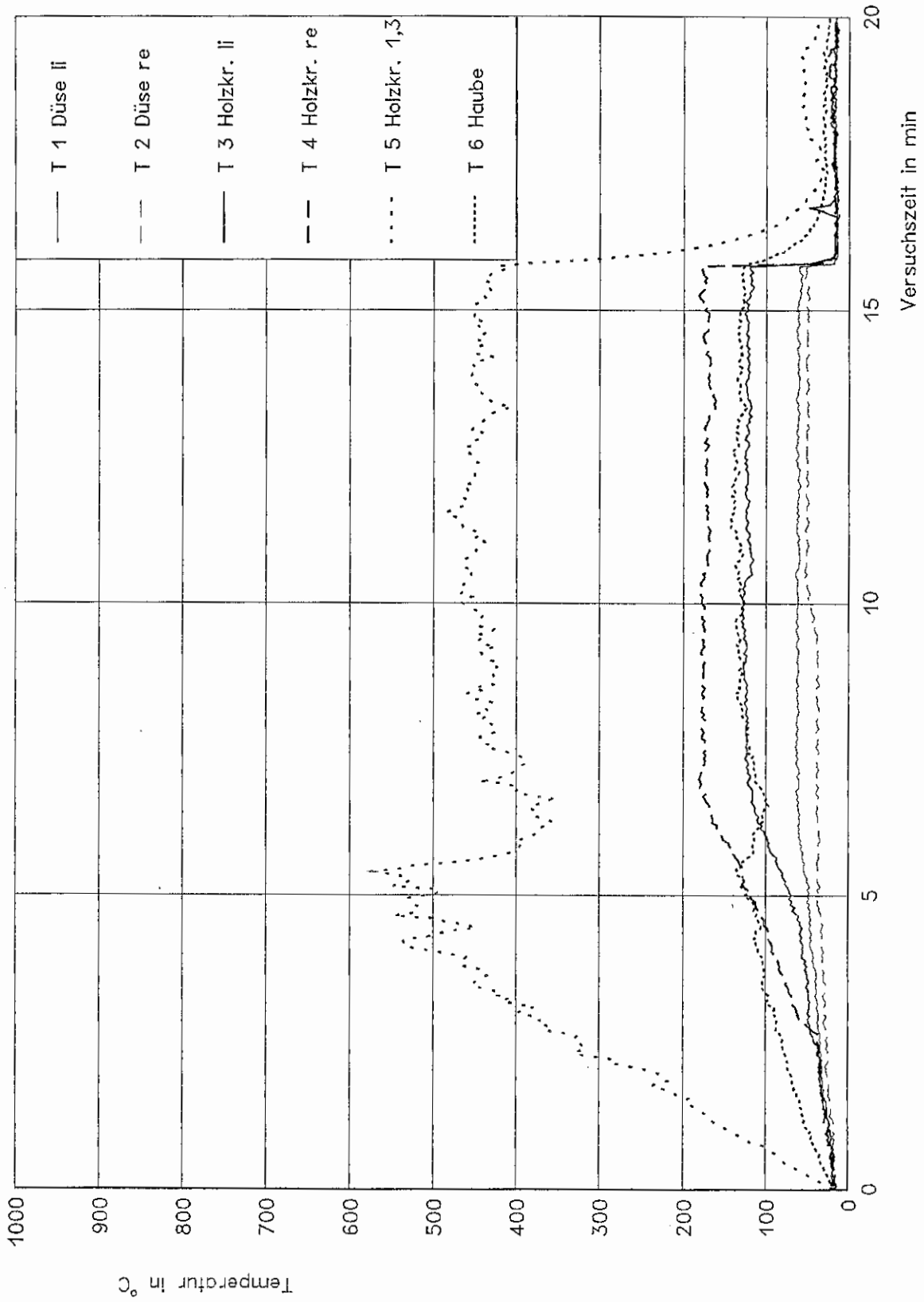


Bild 27. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V35).

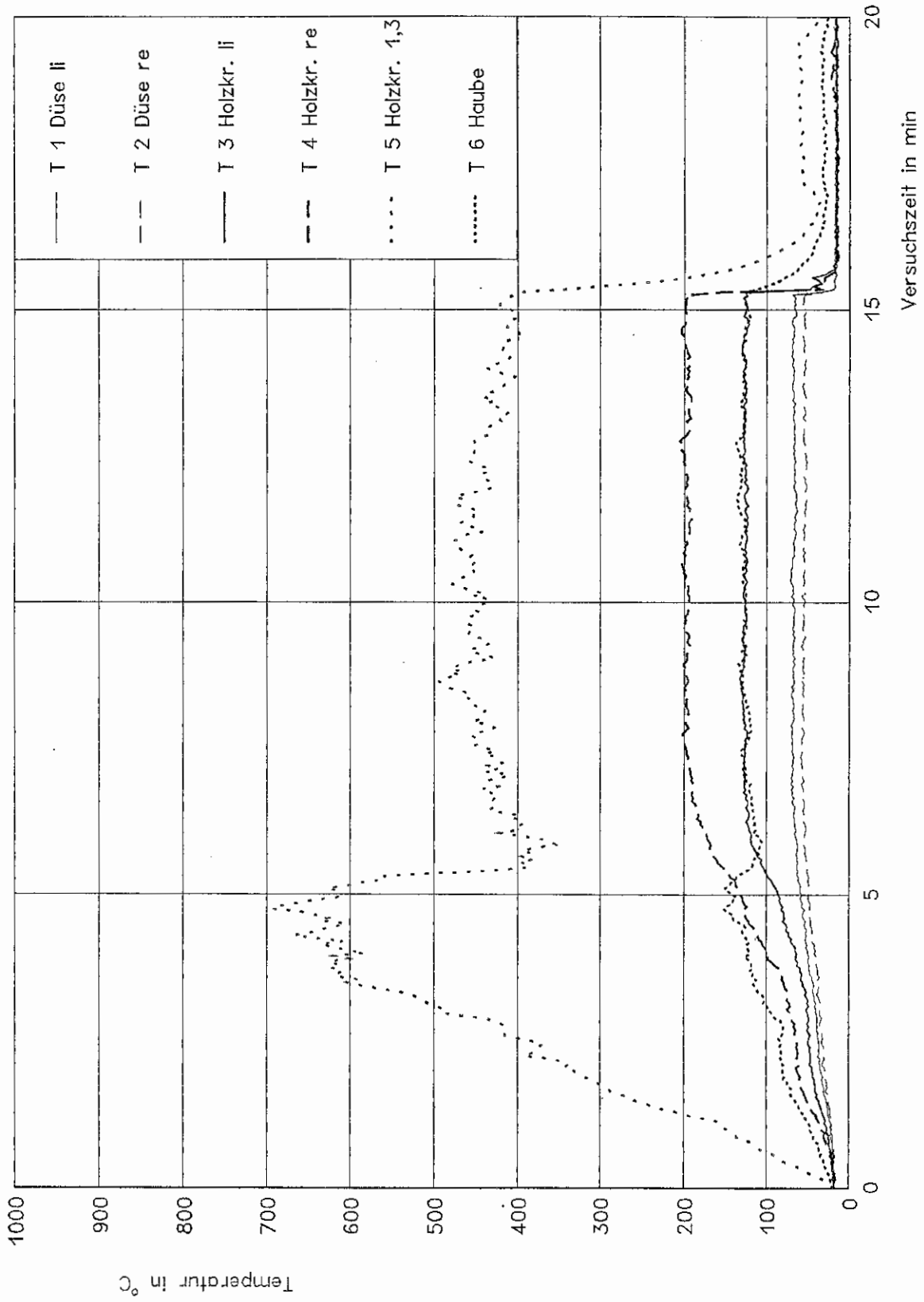


Bild 28. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6 (Versuch V36).

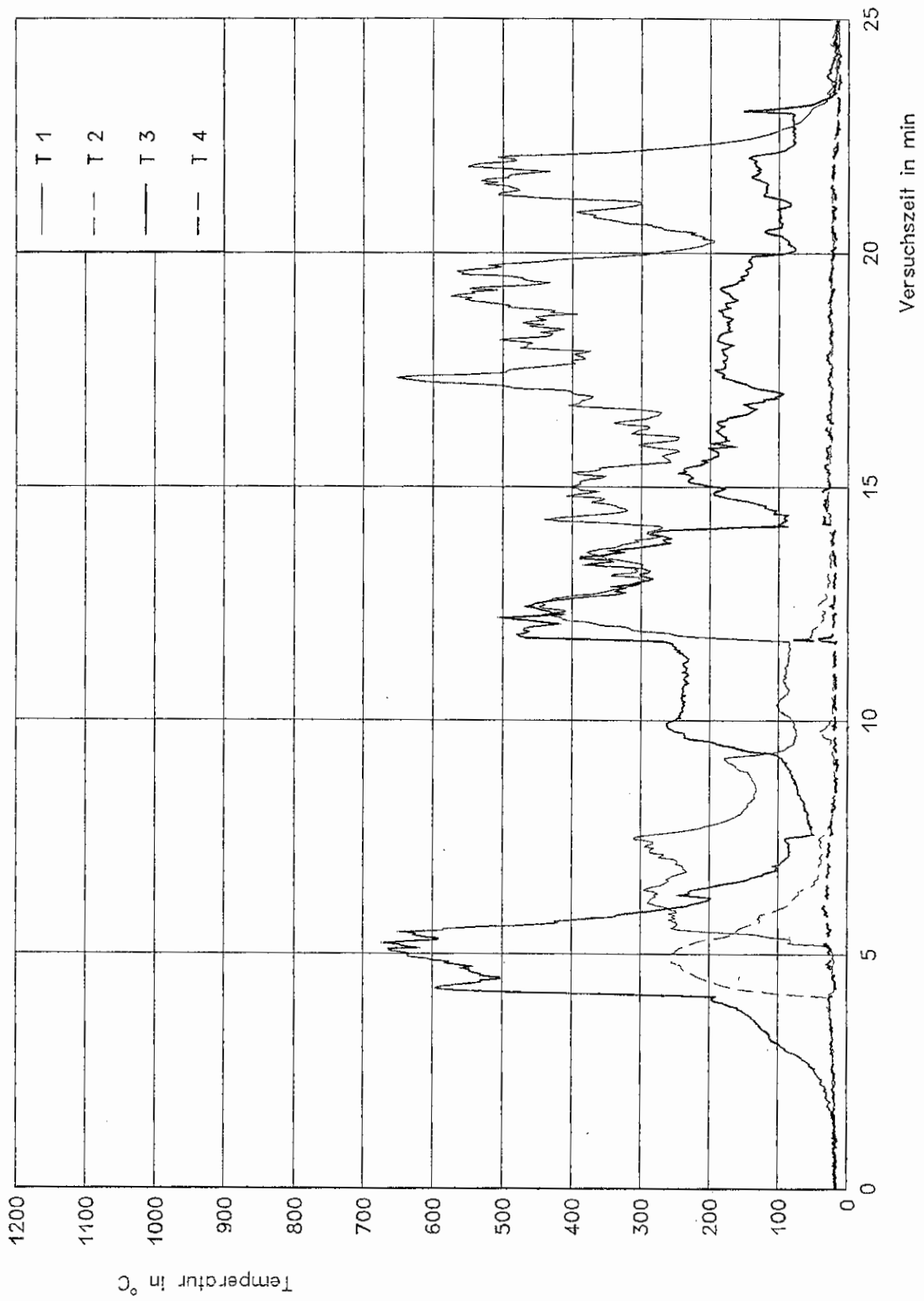


Bild 29. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T4 (Versuch V37).

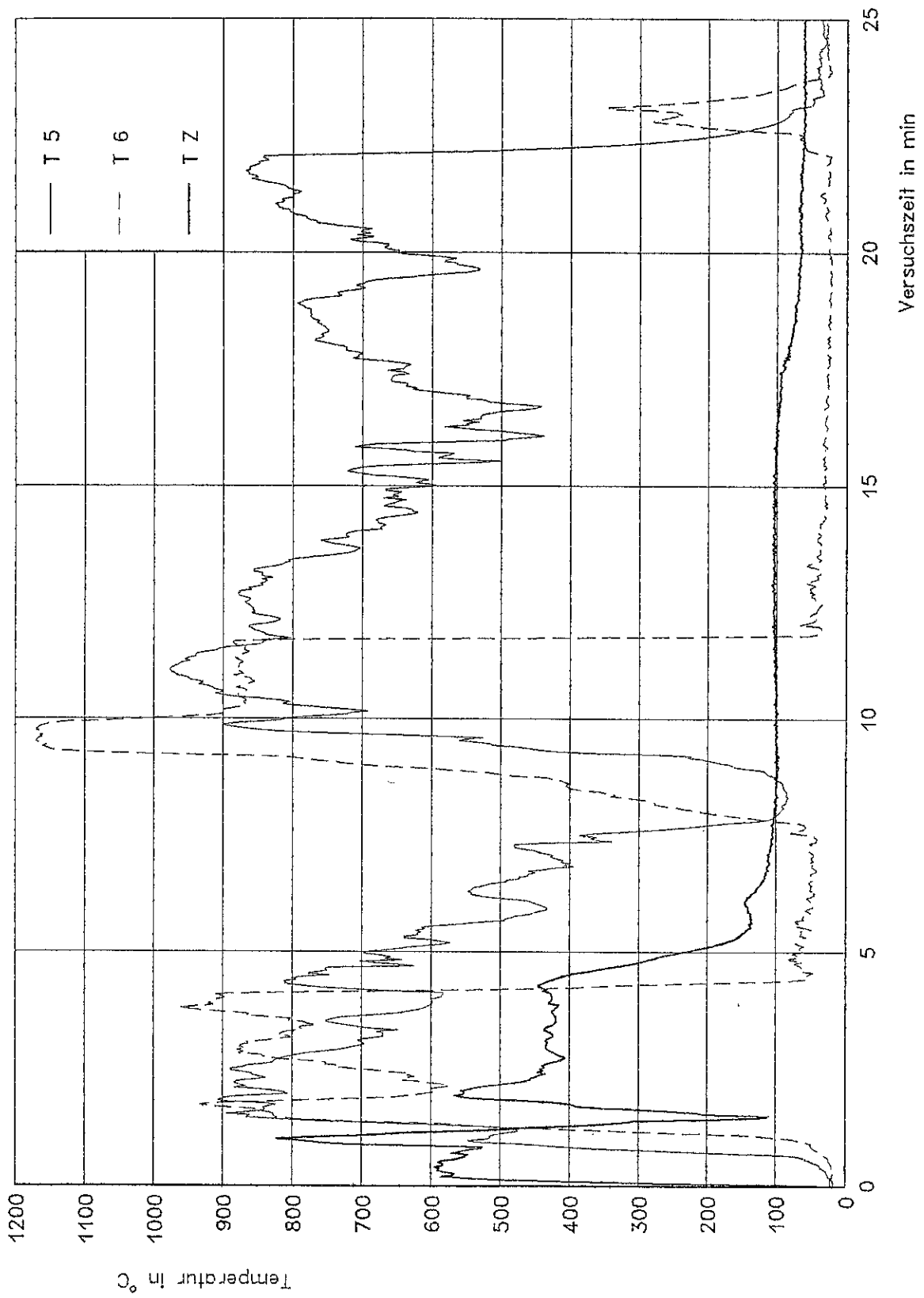


Bild 30. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T5, T6, TZ (Versuch V37).

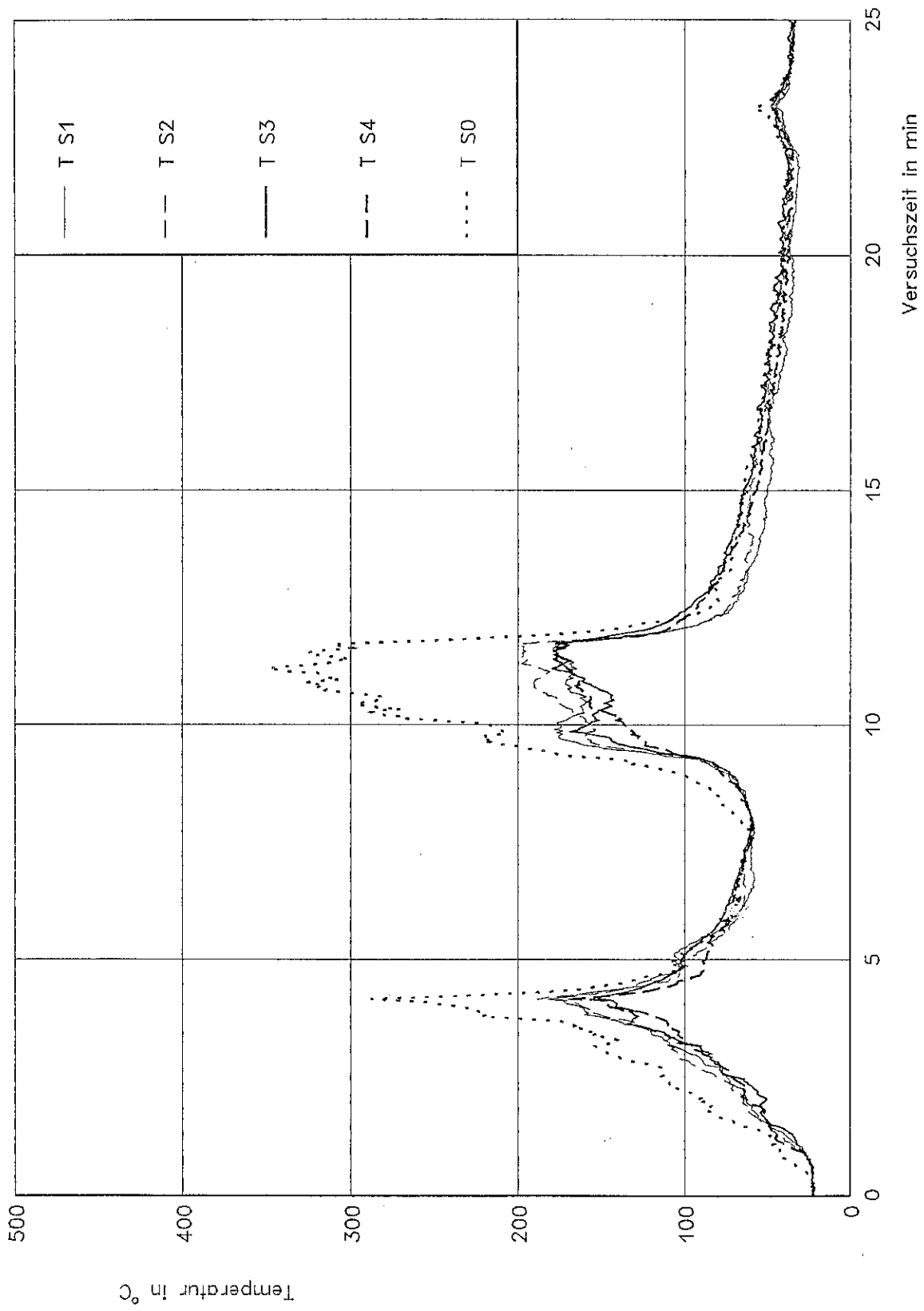


Bild 31. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T S0 bis T S4 (Versuch V37).

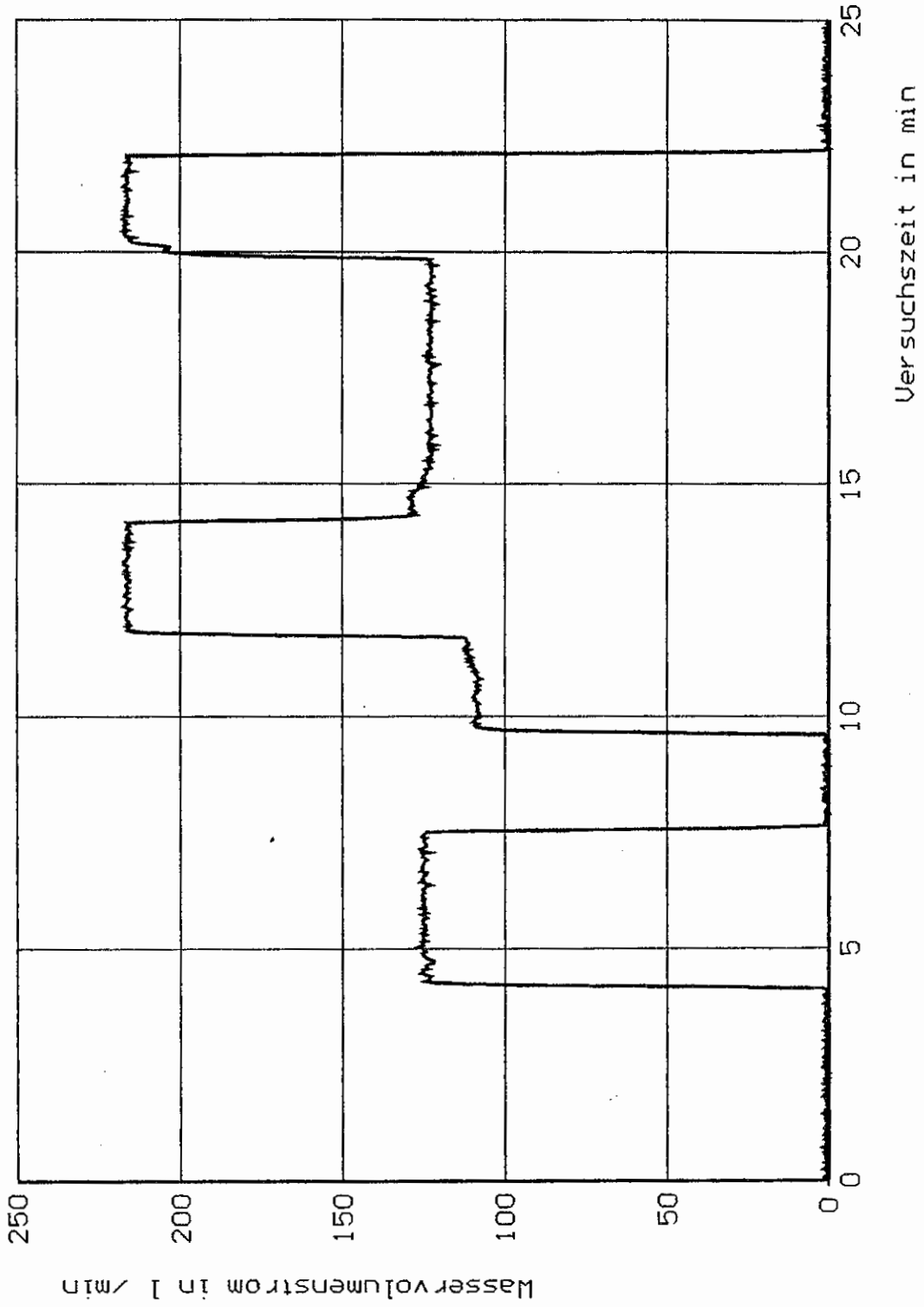


Bild 32. Wasservolumenstrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuch 37).

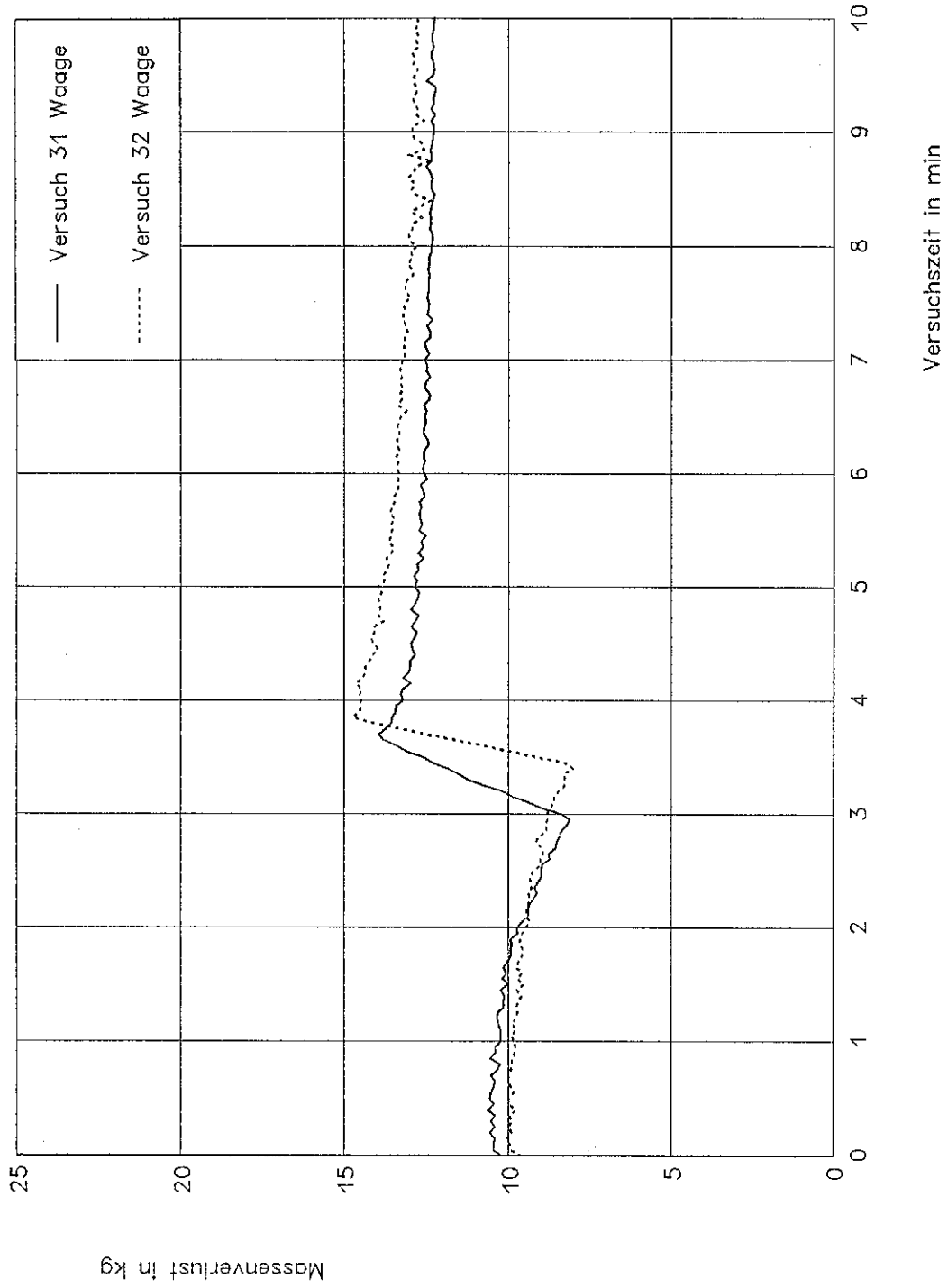


Bild 33. Massenverlust in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuch 31, Versuch 32).

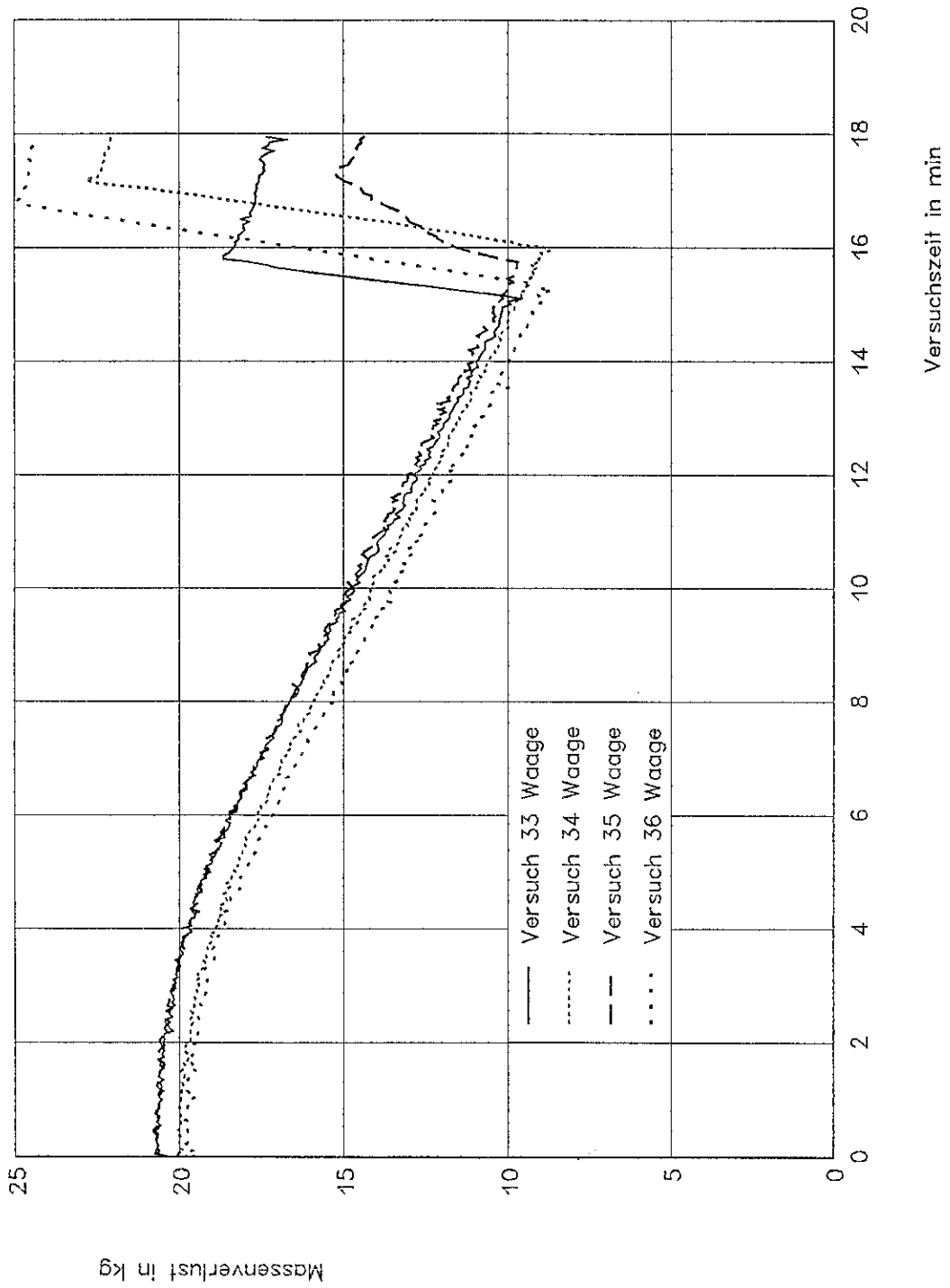


Bild 34. Massenverlust in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuch 33, Versuch 34, Versuch 35, Versuch 36).

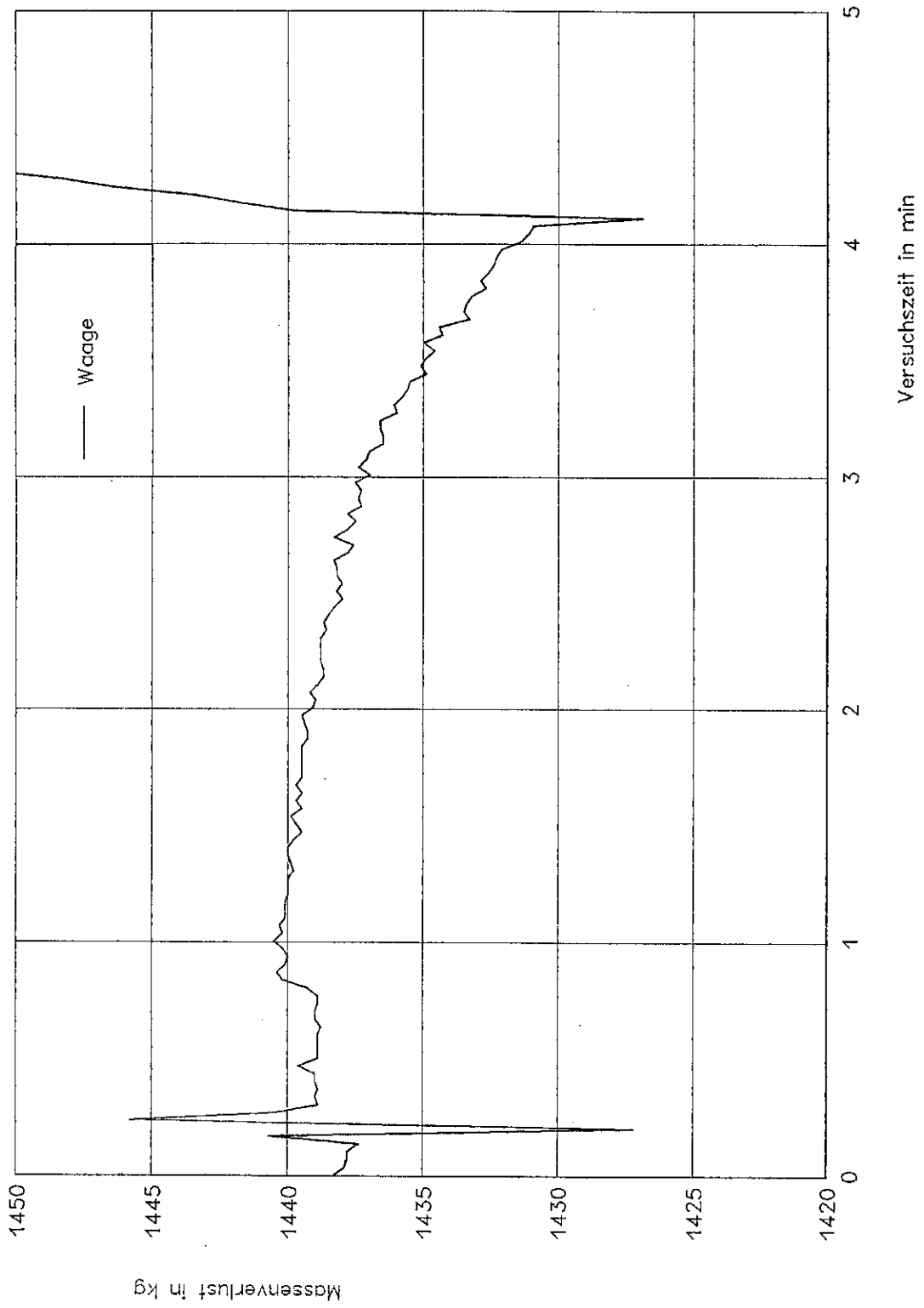


Bild 35. Massenverlust in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuch 37).

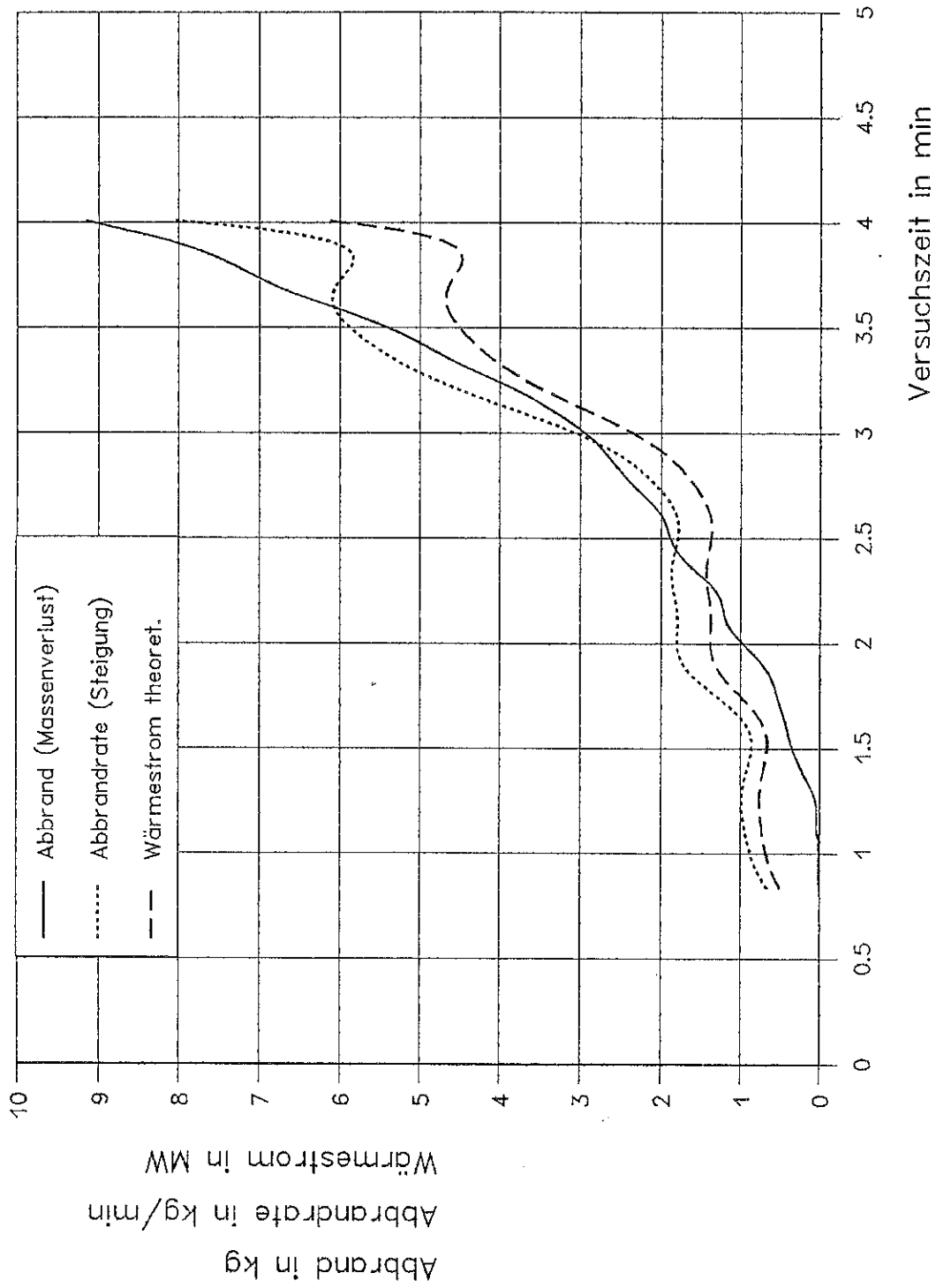


Bild 36. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Versuch 37).

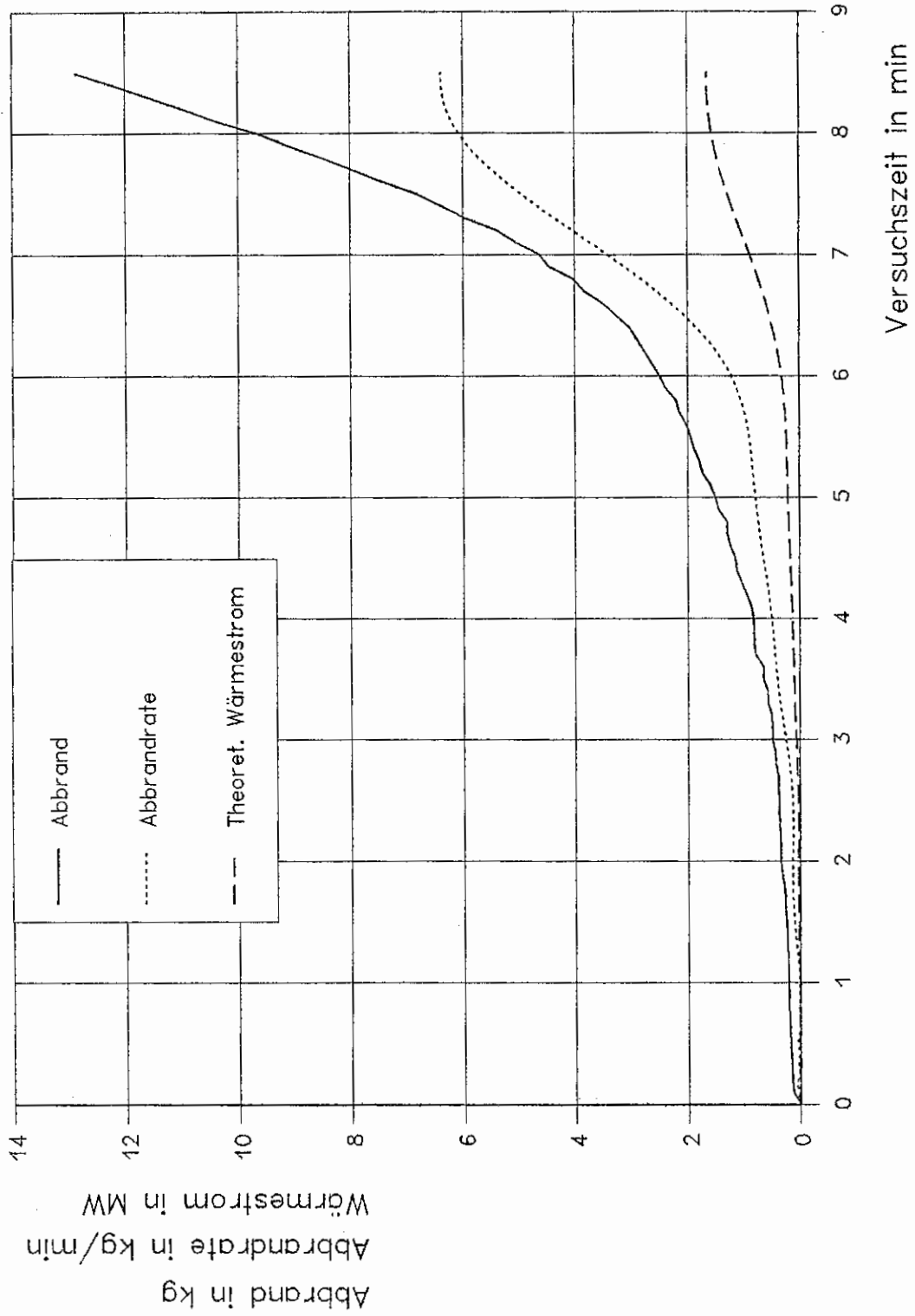


Bild 37. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von je 3 Kartons mit Holzwole in Gitterboxen /3/.

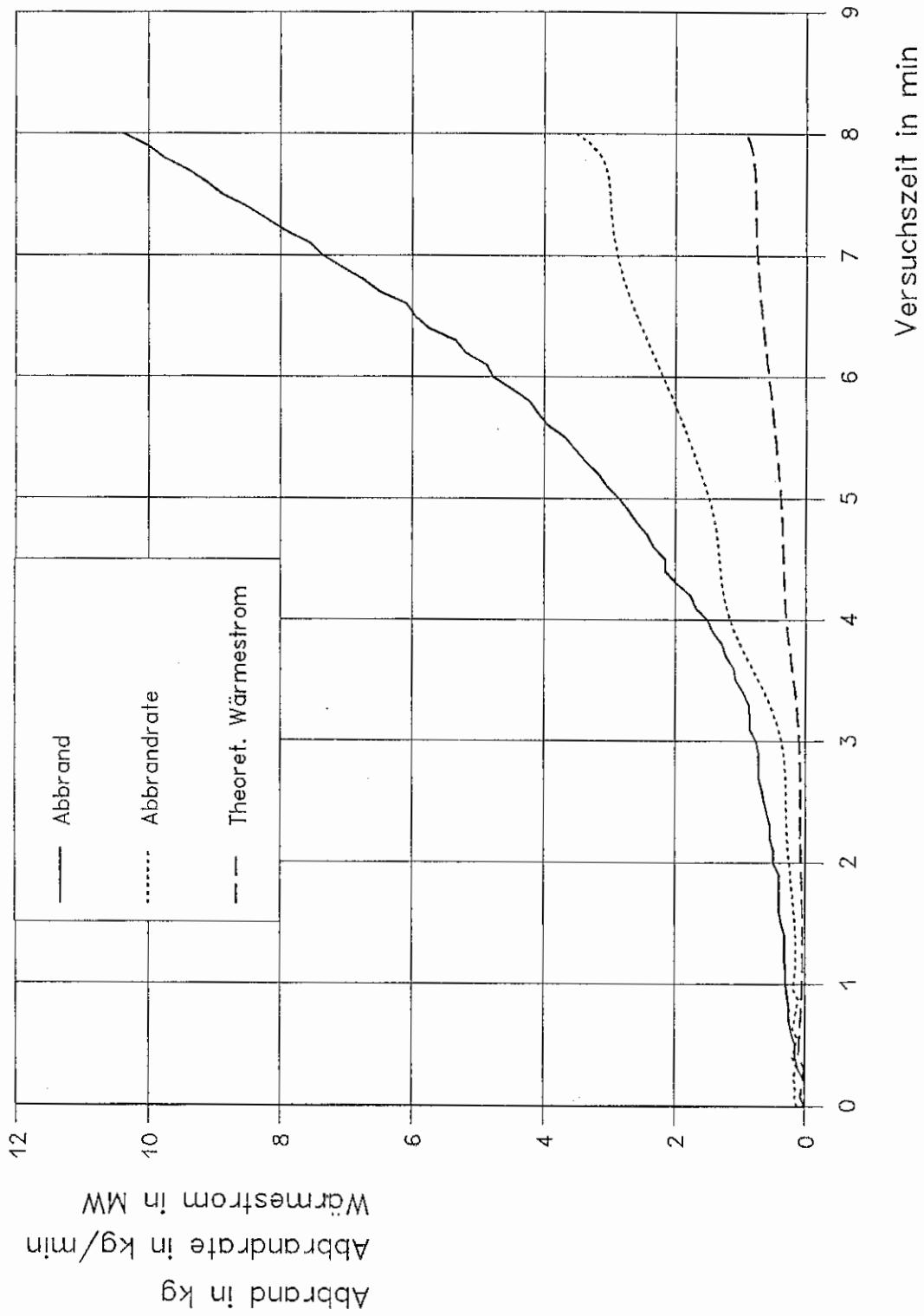


Bild 38. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von je 5 Kartons mit Holzwole in Gitterboxen /3/.

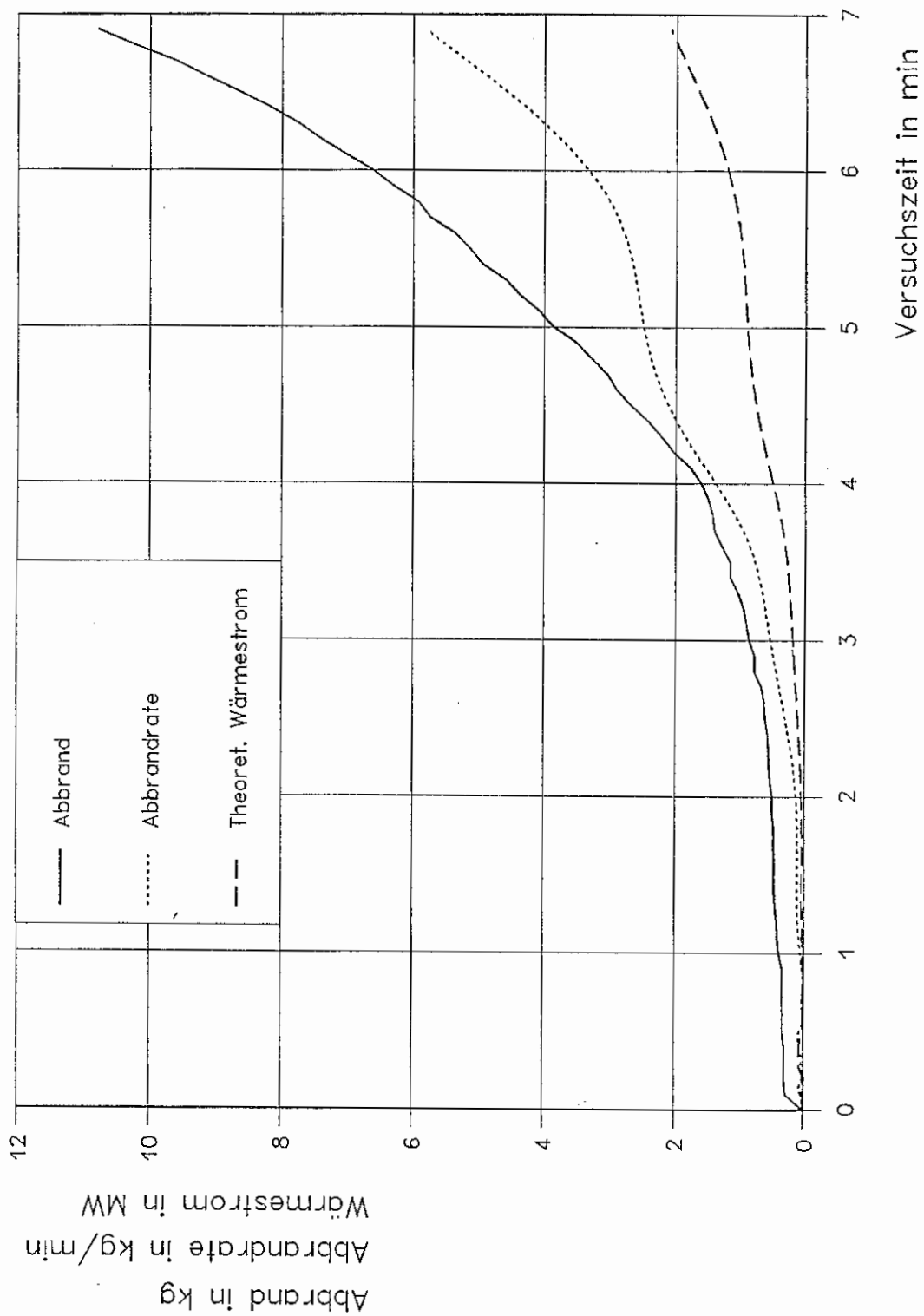


Bild 39. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von je 5 Kartons mit Polystyrol-Chips in Gitterboxen /3/.

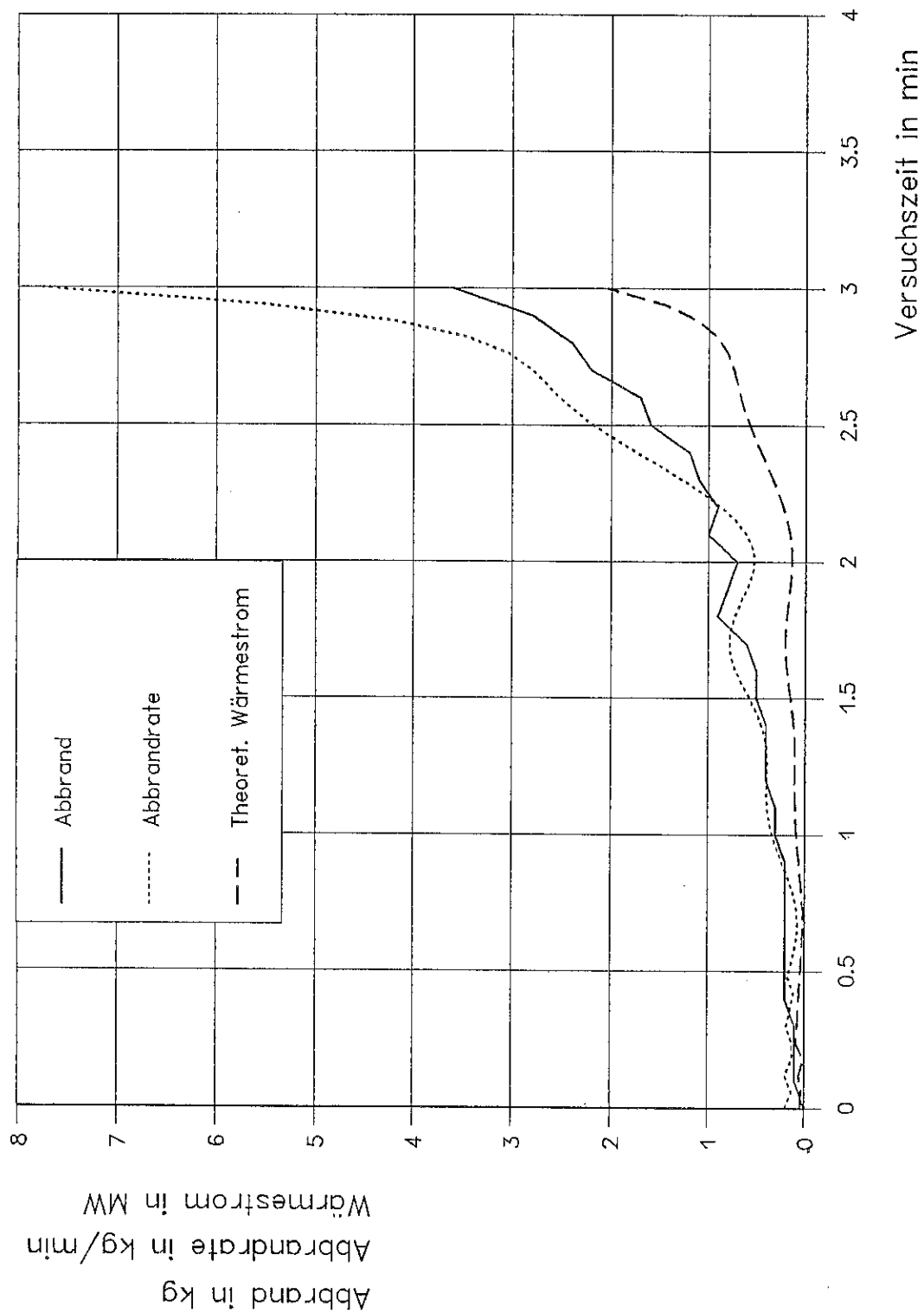


Bild 40. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von Kartons mit Holzwole auf 8 Paletten /4/.

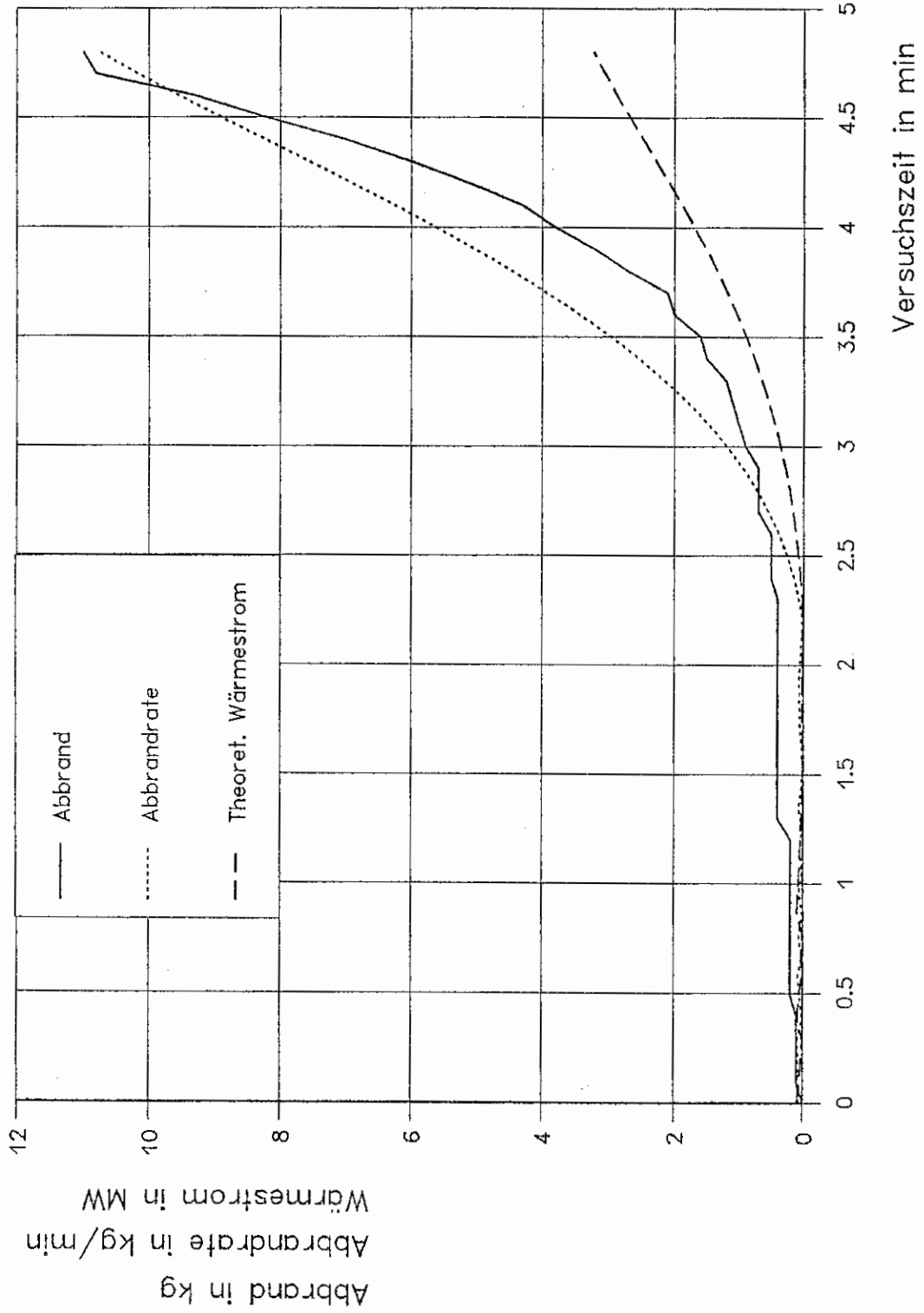


Bild 41. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von Kartons mit Polystyrol-Chips auf 8 Paletten /4/.

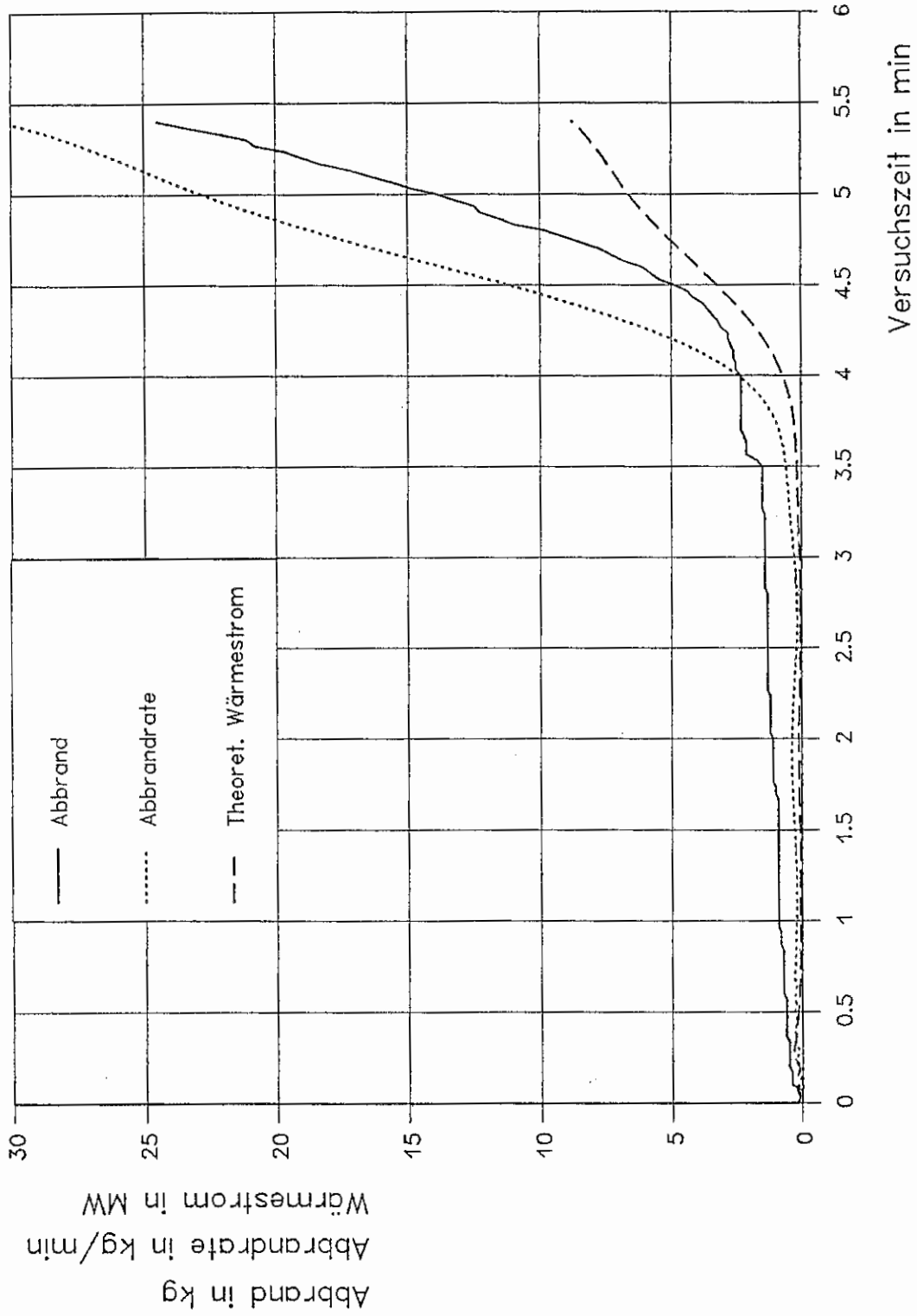


Bild 42. Abbrand, Abbrandrate und Wärmestrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Lagerung von Kartons mit Polystyrol-Chips im Regal auf 36 Paletten /5/.