

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Teil 3: Brand- und Löschversuche mit unterschied-
lichen Brandstoffen mit und ohne Windeinfluß und
Bestimmung von Schadstoffen

111

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreises V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten

Forschungsbericht 111

Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Teil 3. Brand- und Löschversuche mit unterschiedlichen Brandstoffen mit und ohne Windeinfluß und die Bestimmung von Schadstoffen

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
März 1998

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	2
2.1	Versuchsanlage und Meßeinrichtung	3
2.2	Versuch 1: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen Löscheinsatz mit Sprinkleranlage	5
2.2.1	Versuchsaufbau (Bild 1)	5
2.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	6
2.3	Versuch 2: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen Löscheinsatz mit Wassernebelanlage	10
2.3.1	Versuchsaufbau (Bild 2)	10
2.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	11
2.4	Versuch 3: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen Löscheinsatz mit Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse	13
2.4.1	Versuchsaufbau (Bild 2)	13
2.4.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	14
2.5	Versuch 4: Brandgut Pappkarton auf Paletten im Regal - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse	17
2.5.1	Versuchsaufbau (Bild 3)	17
2.5.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	17
2.6	Versuch 5: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten im Regal - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse	20
2.6.1	Versuchsaufbau (Bild 4)	20
2.6.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	21

3.	RAUCHGASANALYSE BEI BRÄNDEN MIT SEKUNDÄR-ROHSTOFFEN	23
3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	23
3.2	Probenahme	24
3.2.1	Programmierbare elektronische Probenahmepumpe	25
3.2.2	Handbetätigte Probenahmepumpe	25
3.2.3	Probenahme auf Adsorptionsmaterial	26
3.3	Analyse der Proben mit GC/MS-Technik	27
3.4	Quantitative Auswertung	27
4.	VERGLEICH VON MEßERGEBNISSEN	29
5.	ZUSAMMENFASSUNG	33
6.	LITERATURVERZEICHNIS	34
7.	TABELLEN UND BILDER	35

1. EINLEITUNG

In der Bundesrepublik Deutschland kommen, gemessen an der Zahl der Verkehrstoten, jährlich ca. 10 % der Personen durch Brandereignisse ums Leben. In mehr als 80 % dieser Fälle wurde Brandrauch als Todesursache festgestellt. Darüberhinaus entstehen bei Bränden mehr oder weniger hohe Sachschäden, die in den meisten Fällen durch Versicherungen gedeckt sind.

Um den Brandschutz gewährleisten zu können, müssen einerseits die Forschung weitergeführt werden und andererseits die Feuerwehren die notwendige Unterstützung erhalten, um bei Schadensfällen auf das Personal und das entsprechende Material zurückgreifen zu können.

Durch die unterschiedlichen vorhandenen und eingesetzten brennbaren Materialien können jedoch Brände nicht ganz ausgeschlossen werden. Sie können einerseits ihren Ursprung in natürlichen oder andererseits in von Menschen verursachten Ereignissen haben. In vielen Fällen treten die Ereignisse unvorhergesehen ein.

In einem Forschungsvorhaben an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik werden Brandversuche mit Sekundär-Rohstoffen durchgeführt. Dies sind Materialien, die einem Recyclingprozeß zugeführt werden können wie Papier (Holzwohle, Pappe, Karton) oder verschiedene auf dem Markt befindliche Kunststoffe. Bis zur weiteren Verarbeitung werden diese Stoffe in Hallen oder auch auf Freiflächen zwischengelagert, so daß Schutzmaßnahmen bezüglich des Brandschutzes notwendig sind. Brände in diesen Bereichen führen immer zu Großeinsätzen bei den Feuerwehren. Die Sachschäden gehen dabei oft in die Millionen.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt der Versuchsaufbau für diese Untersuchungen entweder als Blocklager oder in einem Ausschnitt eines vorhandenen Hochregallagers. Zusätzlich wird der Einfluß einer Windströmung auf die Zündquelle, auf die Brandausbreitung

des zu untersuchenden Materials und auf das zum Löschen aufgebrauchte fein verteilte Wasser mit Hilfe eines Gebläses¹ simuliert. Der Löscheinsatz wird sowohl mit Sprinklern als auch mit Löschdüsen durchgeführt. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse reichen von der Brandentstehung über die Brandausbreitung bis hin zum Löscheinsatz. Dadurch werden wertvolle Hinweise gewonnen, um einen Brand möglichst schnell löschen zu können bzw. den Brandschutz für die Lagerung dieser Materialien wesentlich zu verbessern.

2. BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

In der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) wurden in Fortführung der bereits durchgeführten Untersuchungen an Sekundär-Rohstoffen, Kunststoffballen und Schüttgut in Säcken /1, 2/, Brand- und Löschversuche mit weiteren Materialien wie Holzwolle, Karton und Kunststoff durchgeführt. Für den Löscheinsatz wurde wie bereits in /2/ eine Sprinkleranlage und eine Wasserfeinsprühanlage, auch Wassernebelanlage genannt, eingesetzt. Zusätzlich wurde ein Gebläse verwendet, um den Windeinfluß sowohl auf das brennende Material als auch auf das in Tropfenform aus den Sprinklern bzw. Düsen austretende Löschmittel Wasser zu simulieren.

Die Analyse der bei den Brandversuchen mit Sekundär-Rohstoffen auftretenden Schadstoffe wurde mittels der an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhandenen Meßtechnik durchgeführt. Es handelt sich hierbei um die sehr komplexe GC/MS Analyse. Der Aufbau sowohl des Meßplatzes als auch Ergebnisse von Brandrauchanalysen wurden bereits in /3, 4/ ausführlich dokumentiert. Das in den aufgeführten Forschungsvorhaben beschriebene Verfahren der GC/MS-Analyse wurde bezüglich der Probenahme, der Qualitätssicherung und des Einsatzes eines Thermode-

¹Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) bedankt sich für die freundliche Unterstützung bei der Berufsfeuerwehr Karlsruhe

sorbers so optimiert, daß quantitative Analysen von Brandrauch reproduzierbar möglich sind.

2.1 Versuchsanlage und Meßeinrichtung

Die Brandversuchshalle hat die Abmessungen 30 m * 15 m * 12 m (L*B*H). Mit einer in der Versuchshalle installierten Rauchgasreinigungsanlage können die Brandgase mit bis zu 35.000 m³/h abgesaugt werden. In dieser Halle wurde das Brandgut einerseits auf einer installierten Waageplattform als Block und andererseits in einem Teilabschnitt eines bestehenden zweireihigen Hochregallagers auf einzelnen Paletten-Stellplätzen angeordnet. Zur Messung der Schadstoffe wurden wegen der dafür erforderlichen längeren Branddauer zusätzliche Brandversuche durchgeführt.

Auf der Waageplattform mit einer Fläche von 5 m * 5 m wurden zunächst Gitterboxen mit einer Kantenlänge von 1,20 m * 0,80 m * 0,97 m (L*B*H) aufgebaut, so daß während des Brandes der Gewichtsverlust des in den Gitterboxen befindlichen Gutes aufgezeichnet werden konnte. Die Tragkraft der Waage beträgt insgesamt ca. 80 kN.

Die Abmessungen des zur Verfügung stehenden zweireihigen Hochregallagers betragen 6,14 m * 2,54 m * 9,5 m (L*B*H). Ein Teil dieses Regales wurde dazu verwendet, das jeweilige Brandgut für die in diesem Bericht beschriebenen Versuche einzulagern, da in diesem Ausschnitt des Lagers die Wassernebelanlage bereits installiert war. Die entstehenden Brandgase wurden mit einem konstant eingestellten Volumenstrom von ca. 7.000 m³/h aus der Versuchshalle abgesaugt und der Rauchgasreinigungsanlage zugeführt. Die geringen Strömungen innerhalb des Gebäudes können dabei vernachlässigt werden.

Als Brandgut wurde bei den ersten drei Versuchen jeweils lose Holzwohle per Hand in die Gitterboxen gestopft. Die Bilder 1

und 2 zeigen die jeweilige Versuchsanordnung. Beim vierten Versuch wurden sowohl gefaltete und mit Bändern zusammengehaltene Pappkartons als auch Wellpappkartons in einem Umkarton verwendet, auf Euro-Holzpaletten angeordnet und in das Regal gestellt. Bild 3 zeigt den entsprechenden Aufbau. Beim fünften Versuch wurden an gleicher Stelle einwandige Kunststoffkästen auf Euro-Holzpaletten im Regal eingelagert, wie in Bild 4 zu erkennen ist.

Als Löschmittel wurde bei allen fünf Versuchen Wasser ohne Zusätze eingesetzt. Während bei einem Versuch der Löscheintritt mit einer Sprinkleranlage (s. Bild 1) erfolgte, wurde bei den anderen mit den zu beiden Seiten des Regals (s. Bild 2) installierten Wassernebeldüsen gelöscht. Die geometrische Anordnung der Anlage ist für diese Untersuchungen nicht notwendigerweise als optimal anzusehen.

Die Wasserversorgung der Löschanlage erfolgte mit einer Kreiselpumpe mit einer max. möglichen Förderleistung von $125 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von $8,1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$. Das Löschwasser gelangte entweder zu den Sprinklern S1 bis S4 (Bild 1) oder in die Sprührohrreinheiten SR1 und SR2 zu den 8 Sprühhöpfen SK mit den Düsen (Bilder 2,3,4). Das Auslösen der Wasserzufuhr wurde nach festgelegten Kriterien manuell gesteuert.

Bei allen Versuchen wurde zur Bestimmung des Löschwasservolumenstromes ein magnetisch induktiver Durchflußmesser sowie zur Kontrolle des anstehenden Wasserdruckes unmittelbar hinter der Kreiselpumpe ein Manometer mit elektrischem Ausgang verwendet.

Bei den Untersuchungen wurde ein Gebläse mit einer Leistung von $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ eingesetzt, um den Windeinfluß bei einem Brand zu simulieren und die Auswirkung auf den Löscheintritt festzustellen. Auf der Achse des Gebläses werden in einer Entfernung von 1 m Windgeschwindigkeiten von ca. 10 m/s erreicht.

Die Zündung des Brandgutes erfolgte jeweils mit 1 l n-Heptan in

einer Zündwanne mit den Abmessungen 500 mm * 300 mm, die zentral unterhalb des Brandgutes an den in den Bildern 1 bis 4 gekennzeichneten Stellen angeordnet war.

2.2 Versuch 1: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen - Löscheinsatz mit Sprinkleranlage

2.2.1 Versuchsaufbau (Bild 1)

Bei Versuch 1 wurde das Brandgut Holzwolle in Gitterboxen auf der Waagekonstruktion so angeordnet, daß jeweils 2 Gitterboxen mit der Breitseite direkt aneinander gestellt wurden. Zwischen den Längsseiten wurde ein Abstand von 10 cm gewählt. In jeder der 3 Ebenen befanden sich 4 gefüllte Gitterboxen. Das Gewicht einer Gitterbox betrug ca. 85 kg und das Gewicht der in eine Gitterbox gestopften Holzwolle ca. 26 kg. Durch die Anordnung auf der Waage konnte während des Versuchsablaufes die sich jeweils darauf befindliche Masse des Brandgutes bestimmt werden. Die Zündung erfolgte mit 1 l n-Heptan zentral unterhalb des Stapels an der im Bild angedeuteten Stelle.

Der Löscheinsatz erfolgte mit 4 offenen Sprinklern (S1 bis S4) die in einem Abstand von 6,8 m über der Waageplattform installiert wurden. In der gleichen Höhe sind an der Stellen S0 und S02 jeweils ein Glasfaßsprinkler ohne Wasseranschluß, die sogenannten "Indikatorsprinkler", mit einer Auslösetemperatur von 68 °C und einem RTI-Wert von 50 bis 80 angeordnet.

Über den Sprinklern befindet sich eine Dachkonstruktion mit den Abmessungen 5 m * 5 m mit seitlich herabhängenden Rauchschränzen von 0,4 m. Für die Versuche wurde festgelegt, daß nach dem Auslösen der beiden Indikatorsprinkler und einer zusätzlichen Zeit von weiteren 30 s die Sprinkleranlage manuell in Betrieb genommen werden sollte, um den Löscheinsatz auf jeden Fall deutlich später zu beginnen, als dies im Realfall geschehen würde. Die Wasserbeaufschlagung wurde bereits vor dem Versuch wie bereits

in /2/ auf den Wert von 12,5 mm/min einreguliert. Sie wurde je nach Versuchsablauf unterbrochen oder auch bedarfsweise erhöht.

Unmittelbar neben dem zentralen Indikatorsprinkler S0 wurden jeweils ein optischer Rauchmelder und ein Ionisationsmelder angeordnet und die Zeit bis zum Auslösen aufgezeichnet. Um eine Zerstörung durch den fortschreitenden Brand zu vermeiden, wurde beide nach dem Auslösen entfernt.

Wie bereits bei früheren Untersuchungen /2/ wurden 11 Thermo-elemente an den in Bild 1 angegebenen Meßstellen direkt am Brandgut und darüber (T1 bis T6) sowie an den Sprinklern (TS1 bis TS4) und den Indikatorsprinklern (TS01=TS0 und TS02=TS2) installiert, um den Temperaturverlauf und damit den Brand besser beurteilen zu können.

2.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung, der weitere Brandverlauf und der Löschvorgang werden nachstehend anhand von direkten Beobachtungen und von Videoaufzeichnungen in zeitlicher Abfolge kurz beschrieben. Die Bilder 5 bis 7 zeigen den Versuchsaufbau mit den Gitterboxen und geben einen Eindruck vom Brandgeschehen sowie den Ablauf direkt nach dem Löscheinsatz mit 4 Sprinklern wieder.

Versuch 1: Brandgut Holzwole in Gitterboxen Löscheinsatz mit Sprinkleranlage (Bild 1)

Zeit	
0:00	Zündung zentral, schwache Rauchbildung
0:14	Optischer Rauchmelder ausgelöst
0:22	Ionisationsmelder ausgelöst
0:27	Flammenhöhe bis Oberkante 2. Gitterbox, Rauch auf Frontseite sichtbar
0:40	Flammenhöhe bis Oberkante 3. Gitterbox, weitere Rauchbildung, Flammen gut sichtbar

- 0:42 Indikatorsprinkler S0 ausgelöst
- 0:50 Flammen auf linker Seite zu erkennen
- 1:00 Flammenhöhe ca. 1 m über Oberkante des Stapels
- 1:15 Flammenausdehnung auf gesamter oberer Fläche

- 1:25 Flammenhöhe ca. 2 m über Oberkante des Stapels,
weitere Rauchbildung auf den Seitenflächen
- 1:45 Flammen schlagen bis unter das Dach (ca. 6 m),
gesamter Stapel gut sichtbar
- 2:00 Flammen auf der Frontseite des Stapels
- 2:10 Indikatorsprinkler S02 ausgelöst
- 2:42 Löscheinsatz mit 4 offenen Sprinklern,
Wasserbeaufschlagung 12,5 mm/min, Rauchbildung unter
halb des Daches nimmt zu, Stapel ist noch zu erkennen
- 3:00 Versuchshalle im oberen Bereich verqualmt
- 3:30 Rauch fällt bis auf 5 m Höhe ab
- 4:00 Frontseite brennt, Sprinkler zeigen keine Wirkung
- 4:30 Rauch fällt bis auf 3 m Höhe ab (Stapelhöhe)
- 5:08 Wasserbeaufschlagung auf ca. 30 mm/min erhöht
- 5:15 Keine Sicht mehr, Rauch sofort auf den Boden gedrückt
- 6:00 Wasserbeaufschlagung auf ca. 20 mm/min reduziert
- 7:48 Sprinkler aus
- 8:28 Sprinkler ein, da Feuerschein durch den Rauch sichtbar
- 10:54 Sprinkler aus, starke Verrauchung in der Versuchshalle
- 16:00 Kleine Restflammen manuell abgelöscht

Bild 5 zeigt die Front- und die rechte Seite der 12 Gitterboxen mit Holzwolle auf der Waageplattform. In Bild 6 ist nach einer Versuchszeit von 1 min 50 s die Brandentwicklung im Spalt zwischen den Gitterboxen und die Ausbreitung der Flammen auf der Oberseite des Stapels zu erkennen. Es findet nur eine schwache Rauchentwicklung statt. Bild 7 zeigt den Gitterboxenstapel nach einer Versuchszeit von 3 min 12 s, 30 s nach dem manuellen Einschalten der 4 offenen Sprinkler. Deutlich ist die verstärkte Rauch- und Wasserdampfbildung im oberen Bereich zu erkennen. Zu diesem Zeitpunkt schlagen die Flammen ebenfalls an den Seitenflächen des Stapels heraus. Die Sprinkleranlage zeigt keine

Wirkung auf das Brandgeschehen.

Da durch die gestopfte Holzwolle in den Gitterboxen Sauerstoff zur Verbrennung oder zur Glutbildung eindringen konnte und zusätzlich das von oben auftreffende Löschwasser nicht immer diese Stellen erreichte, war nach dem Abschalten der Löschanlage ein Nachlöschen in geringem Maße erforderlich. Eine etwas längere Löschzeit der Sprinkler hätte sicherlich zum vollständigen Ablöschen ebenso ausgereicht, da nach einer Versuchszeit von etwa 10 min bereits die Hälfte der Holzwolle verbrannt war.

Das Ansprechen des zentral installierten optischen Rauchmelders erfolgte bereits nach einer Versuchszeit von 14 s und des Ionisationsmelders nach 22 s. Bild 8 zeigt die Auslösekurven beider Brandmelder.

Bild 9 zeigt die während des Versuchsablaufes auf der Waageplattform vorhandene Masse in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Nach dem Zünden des Brandgutes erfolgt eine Massenabnahme bis zum Löschzeitpunkt nach 2 min 42 s. Durch das Aufbringen des Löschwassers nimmt jedoch die Masse wieder etwas zu. Die weitere Abnahme des Brandgutes wird dadurch überlagert. Nach diesem kleinen Anstieg überwiegt jedoch der Abbrand. Dies bedeutet, daß die Löschwassermenge des manuell gesteuerten Löscheinsatzes mit einer Wasserbeaufschlagung von 12,5 mm/min zu gering war, um den Brand unter Kontrolle zu bringen. Mit fortschreitender Versuchsdauer ist zu erkennen, daß die Masse durch das Aufbringen des Löschwassers nach einer Versuchszeit von 5 min 8 s und 8 min 28 s deutlich zunahm. Nach ca. 8 min wurde der Löschvorgang kurzzeitig unterbrochen, so daß der Brand erneut eine Massenabnahme des Brandgutes bewirken konnte. Nach einer Versuchszeit von ca. 11 min war der Brand unter Kontrolle. Wegen des abtropfenden Löschwassers und des Abbrennens von Brandgutresten fiel die Kurve wieder ab. Der Anstieg der Kurve nach ca. 16 min kann durch das Aufbringen von Löschwasser mit dem Strahlrohr erklärt werden.

Bild 10 zeigt den bei Löschbeginn für alle 4 Sprinkler eingestellten Wasservolumenstrom von 460 l/min. Da der Stapel wie bereits erwähnt trotz Sprinklerung ungestört weiterbrannte, wurde der Wasservolumenstrom zunächst auf nahezu 1100 l/min und anschließend auf ca. 700 l/min eingeregelt. Das Abschalten der Wasserzufuhr nach einer Versuchszeit von 7 min 48 s, die Löschzeit betrug ca. 5 min, ließ das Brandgut wieder aufflackern. Die Wasserzufuhr wurde erneut eingeschaltet bis nur noch kleine Brandnester vorhanden waren, die später mit dem Strahlrohr abgelöscht wurden.

Die Bilder 11 und 12 zeigen die Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit sowohl an den Meßstellen am Stapel und darüber (T1 bis T6) als auch an den Meßstellen neben den Sprinklern (TS0 bis TS4). Nach der Zündung stiegen die Temperaturen T5 und T6 steil an und erreichten nach einer Versuchszeit von 1 min Werte von etwa 850 °C. Die aufsteigenden heißen Brandgase ließen die Temperatur unterhalb des Daches an der Meßstelle TS0 auf nahezu 800 °C und an den Meßstellen TS1 bis TS4 auf ca. 250 °C ansteigen. Die Temperaturen erreichten an den Meßstellen an den Außenseiten des Stapels (T1 bis T4) Werte zwischen 80 °C und 280 °C.

Der manuell eingeleitete Löscheinsatz ca. 30 s nach dem Auslösen des 2. Indikatorsprinklers bewirkte ein Abfallen der Temperatur an den Meßstellen unterhalb des Daches und an den Außenseiten des Lagergutes, während an den zentralen Meßstellen (T5 und T6) die Temperaturen auf höherem Niveau blieben. Hier brannte es unvermindert weiter. Erst durch die höhere Wasserbeaufschlagung nach einer Versuchszeit von 5 min 8 s fielen auch diese Temperaturen unter 100 °C ab. Die folgenden Temperaturerhöhungen sind durch kleinere Brandnester in der Nähe des jeweiligen Thermoelementes zu erklären. Die etwas höheren Temperaturen nach einer Versuchszeit von ca. 11 min wurden durch das anschließende kontrollierte Abbrennen verursacht.

2.3 Versuch 2: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen- Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

2.3.1 Versuchsaufbau (Bild 2)

Bei Versuch 2 wurde das Brandgut Holzwolle in Gitterboxen in einem modifizierten Ausschnitt eines bestehenden Hochregallagers mit installierter Wassernebelanlage angeordnet. Bild 2 zeigt eine Seitenansicht und einen Grundriß des entsprechenden Versuchsaufbaus. Es wurde der bereits unter Abschnitt 2.2.1 beschriebene Versuchsaufbau mit 12 Gitterboxen verwendet. Aufgrund der Anordnung auf Regalebene betrug der Abstand 20 cm zwischen den beiden Regalreihen in der Vertikalebene der Wassernebeldüsen. Die Zündung erfolgte mit 1 l n-Heptan zentral unterhalb des Stapels. Das eingezeichnete Gebläse (s. Bild 2) wurde bei diesem Versuch noch nicht eingesetzt.

Der Löscheinsatz erfolgte mit einer bereits in /2/ verwendeten Wassernebelanlage mit seitlich an den Sprührohrenheiten installierten Sprühköpfen mit den Düsen. Wie bei Versuch 1 wurden in einer Höhe von ca. 7 m an den Stellen SWN0 und SWN2 jeweils ein Indikatorsprinkler, d. h. Glasfaßsprinkler ohne Wasseranschluß, mit einer Auslösetemperatur von 68 °C und einem RTI-Wert von 50 bis 80 angeordnet. Darüber befand sich wegen des bestehenden Hochregals anstelle des Daches wie bei Versuch 1 jeweils nur ein Dachteil mit einer Fläche von 1 m * 1 m, um den aufsteigenden heißen Brandrauch auffangen zu können (Bild 2). Der Wasservolumenstrom wurde auf 460 l/min eingeregelt und konnte bedarfsweise ein- und ausgeschaltet werden.

Neben dem Indikatorsprinkler SWN0 wurden ein optischer Rauchmelder und ein Ionisationsmelder angebracht. Nach dem Zündvorgang wurden die Auslösezeiten der Melder aufgezeichnet und nach dem Auslösen wie bei Versuch 1 entfernt.

Temperaturmessungen wurden an 9 Meßstellen am und über dem Brandgut (T1 und T7) sowie neben den Indikatorsprinklern (TWN0,

TWN2) durchgeführt. Die Lage der Meßstellen ist in Bild 2 gekennzeichnet.

2.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung und der Löscheinsatz wurden anhand von direkten Beobachtungen und Videoaufzeichnungen in zeitlicher Abfolge kurz beschrieben. Die Bilder 13 bis 15 zeigen den Versuchsaufbau mit den Gitterboxen, geben einen Eindruck des Brandgeschehens und unmittelbar nach dem erfolgten Löscheinsatz mit Wassernebel.

Versuch 2: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen

Löscheinsatz mit Wassernebelanlage (Bild 2)

Zeit

- 0:00 Zündung zentral, zunächst geringe Rauchbildung
- 0:10 Flammenhöhe bis Oberkante 2. Gitterbox
- 0:20 Flammenhöhe bis Oberkante 3. Gitterbox
- 0:30 Optischer Rauchmelder ausgelöst,
Flammenhöhe ca. 1 m über Oberkante des Stapels
- 0:31 Indikatorsprinkler SWN0 ausgelöst,
- 0:32 Ionisationsmelder ausgelöst
- 0:40 Flammenhöhe ca. 2 m über Oberkante des Stapels
- 0:55 Flammen auf der Frontseite, weiter geringe Rauchbildung
- 1:00 Flammen auf der linken Seite,
Rauch um das gesamte Brandgut
- 1:30 Frontseite brennt zur Hälfte
- 1:48 Indikatorsprinkler SWN2 ausgelöst
- 2:16 Löscheinsatz mit Wassernebel, Volumenstrom 460 l/min
- 2:20 Gesamter Stapel mit Wasserdampf und Rauch eingehüllt,
Flammen aus ca. 6 m Entfernung noch gut zu erkennen
- 3:00 Rauch breitet sich weiter aus, Stapel brennt weiter
- 3:30 Rauch in der Versuchshalle sinkt weiter ab,
nur noch untere Stapelebene mit Flammen zu erkennen
- 4:00 Sicht wird geringer, Stapel brennt weiter
- 4:30 Sicht nimmt weiter ab

6:00 Brand nur durch Feuerschein im Rauch zu erkennen
7:00 Keine Sicht mehr in der Versuchshalle
8:36 Wasserzufuhr aus
12:00 Kleine Restflammen manuell abgelöscht

Bild 13 zeigt die Front- und die linke Seite der 12 aufeinandergestapelten mit Holzwolle gefüllten Gitterboxen. In Bild 14 ist die Brandentwicklung deutlich zu erkennen. Die Rauchentwicklung ist gering. Die Flammen über dem Stapel sind höher als 3 m. Bild 15 zeigt die Flammen- und die Rauchentwicklung unmittelbar nach dem Auslösen der seitlich angeordneten Sprühköpfe mit den Düsen der Wassernebelanlage (s. Bild 2).

Im Moment des manuell gesteuerten Auslösens der Wassernebelanlage werden die zentral nach oben gerichteten Flammen von der Stapelmitte verstärkt auf die Front- und Rückseite gedrückt. Die Rauch- und Wasserdampfbildung nimmt ebenso schlagartig zu, so daß die Sicht stark eingeschränkt wird. Nach dem Abschalten der Wasserzufuhr nach einer Versuchszeit von 8 min 36 s waren nur noch kleine Brandnester vorhanden, die anhand der Temperaturen nicht mehr zu erkennen waren.

Der zentral installierte optische Rauchmelder löste nach einer Versuchszeit von 30 s und der Ionisationsmelder nach 32 s aus. Auf Bild 16 sind die entsprechenden Kurven aufgezeichnet.

Da bei dieser Versuchsanordnung keine Waage installiert werden konnte, wurde bei diesem und bei den weiteren Versuchen keine Messung der Abbrandmasse durchgeführt.

Bild 17 zeigt den Wasservolumenstrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Da nach einer Löschzeit von ca. 5 min bereits keinerlei Sicht mehr vorhanden war, wurde die manuell eingeschaltete Löschanlage mit einem Volumenstrom von 460 l/min Wasser ca. 1 min später nach einer Löschzeit von mehr als 6 min abgeschaltet.

Die Bilder 18 und 19 zeigen die jeweilige Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7, TWN0 und TWN2. Nach der Zündung stiegen die Temperaturen an den Meßstellen T5 und T6 sowie mit geringer Verzögerung auch bei TWN0 steil an. Der Löscheinsatz erfolgte ca. 30 s nach dem Auslösen des zweiten Indikatorsprinklers nach einer Versuchszeit von 2 min 16 s. Die Temperaturen lagen zu diesem Zeitpunkt zwischen 880 °C und 980 °C. In einer Höhe von über 10 m wurden an der Meßstelle T7 unterhalb des Daches der Versuchshalle noch ca. 300 °C gemessen. Die Temperatur an der Meßstelle T4 am Brandgut stieg auf ca. 900 °C an. Dies bedeutet, daß durch den seitlich eingebrachten Wassernebel verstärkt heiße Brandgase durch den Spalt an die Meßstelle T4 auf der Frontseite gelangen konnten. Nach einer Versuchszeit von 7 min 20 s lagen alle Temperaturen unterhalb von 100°C. Die Brandgutreste brannten noch einige Minuten bei der im Bild erkennbaren geringen Temperatur ab und wurden dann abgelöscht.

2.4 Versuch 3: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse

2.4.1 Versuchsaufbau (Bild 2)

Bei Versuch 3 wurde das gleiche Brandgut wie bei Versuch 2 in einem Ausschnitt eines bestehenden Hochregallagers angeordnet. Bild 2 zeigt die Versuchsanordnung in der Seitenansicht und im Grundriß. Das eingezeichnete Gebläse zur Windsimulation wurde bei diesem Versuch erstmals eingesetzt. Der Abstand zum Lagergut betrug 1 m. Die Spaltbreite zwischen den Gitterboxen betrug auf der Frontseite wieder 10 cm und in der Vertikalebene der Wassernebeldüsen wie zuvor 20 cm.

Der Löscheinsatz wurde manuell mit der bereits unter 2.3.1 beschriebenen Wassernebelanlage mit seitlich an den Sprührohreinheiten installierten Sprühköpfen mit den Düsen und einem Was-

servolumenstrom von 460 l/min durchgeführt.

Um den Brandrauch festzustellen zu können, wurde ein optischer Rauchmelder zentral über dem Brandgut installiert. Die Temperaturen wurden an 9 in Bild 2 aufgeführten Meßstellen gemessen.

2.4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung wird in zeitlicher Abfolge kurz beschrieben. Die Bilder 20 bis 22 geben das Brandgeschehen vor dem Löscheinsatz wieder.

Versuch 3: Brandgut Holzwolle in Gitterboxen
 Löscheinsatz mit Wassernebelanlage
 Windsimulation mit Gebläse (Bild 2)

Zeit

- 0:00 Zündung zentral, Rauch wird durch das Gebläse von der Rückseite auf die Frontseite gedrückt
- 0:20 Flammen auf der Frontseite, danach auf linker Seite, danach auf allen Seiten Flammen und Rauchbildung
- 0:27 Optischer Rauchmelder ausgelöst,
(Ionisationsmelder nicht installiert)
- 0:30 Flammenhöhe bis Oberkante 3. Stapel, Rauchentwicklung wird stärker
- 0:37 Stärkere Flammen auf der Frontseite, obere Gitterboxen brennen, 4 Gitterboxen auf der Gebläsesseite schwelen, brennen aber noch nicht, Rauchentwicklung stärker
- 0:50 Flammenhöhe ca. 1 m über Oberkante des Stapels, Flammen um den gesamten Stapel
- 1:00 Starke Rauchentwicklung auf der Gebläsesseite
- 1:15 Flammenhöhe ca. 2 m über Oberkante des Stapels, Flammen noch gut sichtbar
- 1:19 Indikatorsprinkler SWN0 ausgelöst
- 1:30 Holzwolle in Gitterboxen auf der Gebläsesseite zündet, gesamter Stapel in Flammen
- 1:52 Indikatorsprinkler SWN2 ausgelöst,

Löscheinsatz mit Wassernebel, Volumenstrom 460 l/min,
starke Rauch- und Wasserdampfbildung

- 2:00 Stapel verschwindet im Rauch, Flammen zu erkennen
- 2:30 Rauch nimmt weiter zu, Sicht nimmt weiter ab
- 3:30 Frontseite keine Sicht mehr
- 4:00 Seitlich keine Sicht mehr vorhanden
- 8:04 Wasserzufuhr aus, Flammen wieder sichtbar
- 9:57 Wasserzufuhr ein
- 10:34 Wasserzufuhr aus
- 11:42 Wasserzufuhr ein
- 11:58 Wasserzufuhr aus
- 17:00 Wasserzufuhr ein
- 17:26 Wasserzufuhr aus
- 21:45 Kleine Restflammen manuell abgelöscht

Bild 20 zeigt die Rückseite der 12 aufeinander gestapelten mit Holzwolle gefüllten Gitterboxen. Am rechten unteren Bildrand ist in einem Abstand von 1 m das Gebläse zu erkennen, das während des Brandes und des Löscheinsatzes in Betrieb war. Die Bilder 21 und 22 zeigen den Brandfortschritt und die aus der Frontseite herausschlagenden Flammen. Die Rauchentwicklung wurde mit Zunahme der Flammen zunächst etwas geringer. Im Moment der manuellen Auslösung der Wassernebelanlage wurde die Rauch- und Wasserdampfbildung jedoch schlagartig verstärkt. Die schlechten Sichtverhältnisse können im Bild nicht dargestellt werden. Die Sicht wurde erst nach dem Unterbrechen der Wasserzufuhr nach einer Versuchszeit von mehr als 8 min wieder besser, so daß kleine Brandnester zu erkennen waren, die durch erneutes Einschalten der Anlage gelöscht werden konnten.

Bild 23 zeigt die Auslösekurve des zentral über dem Stapel installierten optischen Rauchmelders (Ionisationsmelder nicht installiert). Die Ansprechzeit betrug 27 s.

Bild 24 zeigt den Wasservolumenstrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Wie beim vorherigen Versuch dauerte der erste Löscheinsatz etwas mehr als 6 min. Es folgten noch 3 weitere

kürzere Löschphasen, da die Flammen nicht vollständig erloschen waren. Restflammen wurden mit dem Strahlrohr abgelöscht.

Die Bilder 25 und 26 zeigen die jeweilige Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7, TWN0 und TWN2. Direkt nach der Zündung zentral unterhalb des Stapels stieg die Temperatur an der Frontseite an der Meßstelle T4 nach einer Versuchszeit von ca. 15 s auf über 100 °C und bereits nach etwa 1 min auf über 900 °C an. Dies bedeutet, daß durch den Windeinfluß des auf der Rückseite des Stapels eingesetzten Gebläses die Flammen durch den vorhandenen Spalt nach vorne gedrückt wurden. An den Meßstellen T3 und T5 wurde eine Temperatur von 100 °C erst nach einer Versuchszeit von ca. 30 s und bei T6 nach mehr als 1 min erreicht. Erst nachdem die Flammen die 2. Palettenebene erreichten, breiteten sie sich wie bei den vorherigen Versuchen vertikal aus, da das Gebläse etwa in dieser Höhe seine Wirkung für eine horizontale Ausbreitung der Flammen verlor. Die max. erreichten Temperaturen in Stapelnähe lagen höher als 900 °C und über dem Stapel an der Meßstelle TWN0 bei nahezu 600 °C.

Wegen des optisch ähnlichen Erscheinungsbildes des Brandes auf der Frontseite wie bei den Versuchen zuvor, wurde die Zufuhr des Wassernebels bereits nach einer Versuchszeit von 1 min 52 s beim Auslösen des 2. Indikatorsprinklers, ca. 30 nach dem Auslösen des 1. Indikatorsprinklers, manuell ausgelöst. Die Temperaturen an den Meßstellen T4, T5 und T6 fielen zunächst nicht ab, da der Brand in der Stapelmitte und auf der Frontseite durch den Windeinfluß stark beeinflusst wurde. Die Meßstellen T1 und T3 dagegen wurden direkt vom Wassernebel erreicht, so daß die Temperatur unter 50 °C abfiel. Auf der Rückseite an der Meßstelle T2 wurden wegen des direkten Einflusses des Gebläses nur max. 180 °C gemessen. Der Brand konnte sich in dieser Richtung nicht richtig ausbreiten. Nach einer Löschzeit von mehreren Minuten fielen die Temperaturen an allen Meßstellen deutlich unter 100 °C ab, so daß die Wasserzufuhr nach einer Versuchszeit von ca. 8 min abgestellt wurde. Nachdem der Brand unter Kon-

trolle war, wurden kleine Brandnester durch erneutes Einschalten des Wassernebels abgelöscht. Auf der dem Gebläse zugewandten Seite war bei Versuchsende mehr unverbranntes Material vorhanden als bei den Versuchen zuvor. Dies bedeutet, daß die Flammen auf der Rückseite durch den Wind weggedrückt wurden und auf der Frontseite umso heftiger brannten.

2.5 Versuch 4: Brandgut Pappkarton auf Paletten im Regal - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse

2.5.1 Versuchsaufbau (Bild 3)

Bei Versuch 4 wurden als Brandgut anstelle der 12 Gitterboxen an der selben Stelle im Hochregal 12 Paletten mit gefalteten Pappkartons gelagert. Die Spaltbreite zwischen den Paletten betrug wie bei Versuch 3 etwa 10 cm an der Frontseite und etwa 20 cm in der Düsenebene. Bild 3 zeigt eine Seitenansicht und einen Grundriß des entsprechenden Versuchsaufbaus. Die Zündung erfolgte mit 1 l n-Heptan. Auf der Rückseite wurde wie bei Versuch 3 das Gebläse im Abstand von 1 m angeordnet.

Der Löscheinsatz erfolgte wie bereits beschrieben mit der an den Seiten des Hochregals installierten Wassernebelanlage und einem eingeregelter Wasservolumenstrom von 460 l/min.

Über dem Versuchsaufbau befand sich zentral ein optischer Rauchmelder. Die Thermoelemente wurden an den bereits bei den vorherigen Versuchen beschriebenen Meßstellen installiert.

2.5.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung wird in zeitlicher Abfolge kurz beschrieben. Die Bilder 27 bis 29 zeigen den Versuchsaufbau und vermitteln einen Eindruck vom Brandgeschehen nach einer Versuchszeit

von 55 s und unmittelbar vor dem Löscheinsatz.

Versuch 4: Brandgut Pappkarton auf Holzpaletten im Hochregal-
Löscheinsatz mit Wassernebelanlage
Windsimulation mit Gebläse (Bild 3)

Zeit	
0:00	Zündung zentral, geringe Rauchbildung auf Frontseite
0:30	Flammenhöhe bis Oberkante 1. Stapel
0:35	Flammenhöhe bis Oberkante 2. Stapel
0:40	Flammenhöhe bis Oberkante 3. Stapel, weiterhin geringe Rauchbildung
0:50	Flammenhöhe ca. 1 m über Oberkante des Stapels
0:57	Optischer Rauchmelder ausgelöst, (Ionisationsmelder nicht installiert), Flammenhöhe ca. 2 m über Oberkan- te, Flammen im unteren Bereich durch Gebläse in Rich- tung Frontseite gedrückt, geringe Rauchentwicklung
1:06	Indikatorsprinkler SWN0 ausgelöst
1:10	Flammen horizontal bis Frontseite
1:30	Flammenhöhe ca. 3 m über dem Stapel, Frontseite brennt, Sichtverhältnisse werden schlechter
1:35	Indikatorsprinkler SWN2 ausgelöst
2:00	Stapel brennt vollständig
2:06	Löscheinsatz mit Wassernebel, Volumenstrom 460 l/min, starke Wasserdampf- und Rauchbildung bis auf den Boden, Flammen jedoch weiterhin sichtbar
2:15	Flammen werden kleiner, Sichtverhältnisse nehmen ab, Verrauchung nimmt weiter zu
3:00	Durch starke Rauchbildung keine Sicht mehr
5:12	Wasserzufuhr aus, kleine Brandnester erkennbar
6:16	Wasserzufuhr ein
6:48	Wasserzufuhr aus
7:55	Wasserzufuhr ein
8:58	Wasserzufuhr aus
10:16	Wasserzufuhr ein
11:24	Wasserzufuhr aus
15:28	Wasserzufuhr ein

16:42 Wasserzufuhr aus
17:30 Kleine Restflammen manuell abgelöscht

Bild 27 zeigt die auf den Querträgern des Hochregals gelagerten Paletten mit den gefalteten Kartons, die teilweise in Umkartons verpackt waren. Das Gebläse befindet sich auf der Rückseite des Versuchsaufbaus in Höhe der unteren Palettenebene in einer Entfernung von 1 m.

Die Bilder 28 und 29 zeigen die Brandsituation nach einer Versuchszeit von 55 s und nach 2 min 3 s. Die Sichtverhältnisse um das brennende Lagergut sind zu diesem Zeitpunkt gut. Durch den Löscheinsatz nach 2 min 6 s nimmt die Rauch- und Wasserdampfbildung in diesem Bereich stark zu. Nach einer Versuchszeit von 3 min war keinerlei Sicht mehr vorhanden. Nach dem Brand war zu erkennen, daß trotz des starken Brandes die Paletten mit Kartons nur an den Oberflächen beschädigt waren, da die Flammen in einer derart kurzen Zeit nicht in das Innere von aufeinandergeschichtetem Karton (Papier) eindringen können.

Bild 30 zeigt die Auslösekurve des zentral über dem Lagergut befindlichen optischen Rauchmelders (Ionisationsmelder nicht installiert). Die Auslösezeit betrug 57 s.

Bild 31 zeigt den Wasservolumenstrom in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Der erste Löscheinsatz wurde nach einer Löschzeit von 3 min 6 s beendet, weil durch den starken Rauch keine Flammen mehr zu erkennen waren. Danach wurden kleine Brandnester durch einen mehrmaligem kurzzeitigen Betrieb der Anlage und nach einer Versuchszeit von 17 min 30 s Restflammen manuell mit dem Strahlrohr abgelöscht.

Die Bilder 32 und 33 zeigen die jeweilige Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7, TWN0 und TWN2. Nach der Zündung stiegen die Temperaturen an allen Meßstellen, teilweise mit einer Verzögerung, steil an. Die Temperaturen an den Meßstellen T2 im direkten Windeinfluß des Ge-

bläses, T7 weit über dem Lagergut und TWN2 liegen zwischen 100 °C und 250 °C und die max. erreichten Temperaturen zentral über dem Brandgut über 1000 °C. Die nach einer Versuchszeit von 2 min 6 s manuell ausgelöste Löschanlage bewirkte ein steiles Abfallen der Temperaturen. An der Meßstelle T4 verzögerte sich das Absinken durch die vom Gebläse verursachte Strömung zur Frontseite hin. Eine Erhöhung der Temperatur an der Meßstelle T2 kann nur so erklärt werden, daß Flammen durch den seitlich eingebrachten Wassernebel auf die Oberfläche des dem Gebläse zugewandten Lagerbereiches gelangen konnten, vom Luftstrom des Gebläses erfaßt und in diesem Bereich angefacht wurden. Erneutes mehrmaliges manuelles Auslösen der Wassernebelanlage konnte den Brand nahezu löschen.

2.6 Versuch 5: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten - im Regal, Löscheinsatz Wassernebelanlage und Windsimulation mit Gebläse

2.6.1 Versuchsaufbau (Bild 4)

Bei Versuch 5 wurde anstelle der Pappkartons Kunststoffkästen verwendet, die im selben Ausschnitt des Hochregallagers angeordnet wurden. Bild 4 zeigt die Versuchsanordnung in der Seitenansicht und im Grundriß sowie in der linken Bildhälfte die Lage des Gebläses zur Windsimulation auf der Rückseite des Versuchsaufbaus.

Die Wassernebelanlage wurde wie bei den vorher durchgeführten Versuchen nach dem Auslösen der Indikatorsprinkler manuell eingeschaltet und mit einem eingestellten Wasservolumenstrom von 460 l/min betrieben.

Der optische Rauchmelder wurde zentral über den gestapelten Paletten installiert. Die eingesetzten Thermoelemente befinden sich an den bereits angegebenen Meßstellen (s. Bild 4).

2.6.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung wurde nachfolgend in zeitlicher Abfolge kurz beschrieben. Die Bilder 34 und 35 zeigen eine Seitenansicht des Lagergutes im Regal mit dem Gebläse in Höhe der 1. Lagerebene im Abstand von 1 m sowie das Brandgeschehen nach einer Versuchszeit von 1 min 26 s. Aufgrund der starken Raumbildung war kein weiteres Foto möglich.

Versuch 5: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten im Regal
Löscheinsatz mit Wassernebelanlage
Windsimulation mit Gebläse (Bild 4)

Zeit	
0:00	Zündung zentral, zunächst geringe Rauchentwicklung
0:35	Flammenhöhe bis Oberkante 1. Stapel
1:00	Flammenhöhe bis Oberkante 2. Stapel
1:10	Flammenhöhe bis Oberkante 3. Stapel, starke vertikale Rauchentwicklung
1:12	Optischer Rauchmelder ausgelöst
1:15	Flammenhöhe ca. 1 m über Oberkante des Stapels
1:20	Flammenhöhe ca. 3 m über Oberkante des Stapels
1:25	Flammen horizontal bis Frontseite
1:30	Starke dunkle Rauchentwicklung am gesamten Aufbau, Frontseite brennt, Kästen auf der Rückseite zünden
1:35	Indicatorsprinkler SWN0 ausgelöst, Vollbrand
1:48	Löscheinsatz mit Wassernebel (ca. 460 l/min), durch Windeinfluß Flammen auf Frontseite stärker als auf Rückseite, Sicht nimmt ab, Regal noch sichtbar, Flammen kurzzeitig etwas kleiner, brennendes Abtropfen von Kunststoff insbesondere auf der Frontseite
3:30	Flammen an der Frontseite durch Rauch noch zu erkennen, gesamte Versuchshalle füllt sich mit Rauch
4:00	Keine Sicht mehr
4:45	Zeitweise Flammen zu erkennen
8:15	Wasservolumenstrom auf ca. 500 l/min erhöht, keine Sicht mehr
19:26	Wasserzufuhr aus

23:56 Wasserzufuhr ein
26:03 Wasserzufuhr aus
28:00 Kleine Restflammen manuell abgelöscht

Bild 34 zeigt die Paletten mit den Kunststoffkästen auf den Querträgern des Hochregals von der Seite und das zur Windsimulation aufgestellte Gebläse in der linken Bildhälfte. Bild 35 gibt das Brandgeschehen vor dem Löscheinsatz nach einer Versuchszeit von 1 min 26 s wieder.

Bild 36 zeigt die Auslösekurve des zentral über dem Lagergut installierten optischen Rauchmelders. Die Auslösezeit betrug 1 min 12 s.

Auf Bild 37 ist der Wasservolumenstrom während des Löschvorganges eingetragen. Der manuell gesteuerte Einsatz der Wassernebelanlage mit 460 l/min Wasser erfolgte 13 s nach dem Auslösen des 1. Indikatorsprinklers. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich der Brand bereits sehr stark entwickelt. Durch den seitlich eingebrachten Wassernebel und den zusätzlichen Windeinfluß von der Rückseite waren auf der Frontseite trotz des sich bildenden starken dunklen Rauches Flammen zu erkennen. Auf der Rückseite waren keine Flammen sichtbar. Das brennende Abtropfen der Kunststoffkästen konnte durch den Wassernebel nicht verhindert werden. Nach einer Löschzeit von mehr als 6 min wurde deshalb der Volumenstrom auf ca. 500 l/min erhöht. Ein Löscherfolg bzw. Kontrollieren des Brandes konnte erst nach einer längeren Betriebszeit der Wassernebelanlage erreicht werden. Das Abschalten der Anlage nach einer Versuchszeit von 19 min 26 s brachte bessere Sichtverhältnisse, so daß noch bestehende kleinere Brandnester erkannt und durch erneutes manuelles Einschalten der Wassernebelanlage gelöscht werden konnten.

Die Bilder 38 und 39 geben einen Eindruck vom Temperaturverlauf an den Meßstellen T1 bis T7, TWN0 und TWN2 während des Versuches wieder. Nach der Zündung stiegen die Temperaturen an allen Meßstellen nach einer etwas verzögerten Anbrennphase

steil an. Die max. Temperaturen betragen bis zu 1200 °C an der Meßstelle T3 in der Mitte. Wegen der sehr schnellen Brandausbreitung wurde die Wassernebelanlage bereits nach einer Versuchszeit von 1 min 48 s manuell ausgelöst. Dadurch fielen die Temperaturen an den Meßstellen wieder steil ab. Durch den Wind- einfluß des Gebläses wurden auch bei diesem Versuch die noch vorhandenen Flammen zur Frontseite hin gedrückt, so daß die Temperatur an der Meßstelle T4 auf der Frontseite erneut anstieg. Heiße Brandgase erwärmten auch die Meßstelle T7 über dem Lagergut auf ca. 200 °C. Bei Erhöhung des Volumenstromes auf 500 l/min Wasser fiel auch an der Meßstelle T4 die Temperatur wieder ab. Zu diesem Zeitpunkt stieg jedoch die Temperatur an der Meßstelle T2 an, was auf einen Zündvorgang auf der Rückseite in diesem Bereich hindeutet. Ein Abschalten der Wassernebelanlage nach einer Versuchszeit von 19 min 26 s ließ den kontrollierten Brand wieder aufflammen, was an allen Temperaturmeßstellen verzeichnet wurde. Durch nochmaligen Einsatz des Wassernebels wurde der Brand schließlich bis auf kleine Restflammen gelöscht.

3. RAUCHGASANALYSE BEI BRÄNDEN MIT SEKUNDÄR-ROHSTOFFEN

3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden als Brandgut gepreßte Kunststoffballen verwendet, die in drei Sorten unterschieden werden. Es handelt sich dabei um die Hohl- bzw. Flaschenfraktion, die Folienfraktion und die Mischfraktion, die hauptsächlich aus den Recyclingmaterialien Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) bestehen. Die zu Ballen gepreßten, sortierten recyclingfähigen Stoffe, auch als Sekundär-Rohstoffe bezeichnet, wurden mit mehreren Drähten zusammengehalten angeliefert. Um bezüglich des Materials die gleichen Verhältnisse wie in den Betrieben bei der Sammlung, Sortierung und Verwertung zu erhalten, wurde das Material direkt dem Recyclingprozeß entnommen. Handelsübliche Ballen besitzen die Abmessungen 1,2 m x 1 m x 0,8 m.

Ein Kunststoffballen einer Mischfraktion wurde unter einem Rauchabzug positioniert. Der Rauchabzug befand sich in einer Höhe von ca. 3 m und hatte die Abmessungen von 3 m * 3 m. Zur Messung der Brandrauchtemperatur wurde am unteren Rand des Rauchabzugs ein Thermoelement befestigt. An dieser Stelle wurde auch der überwiegende Teil der Brandrauchproben entnommen. Weitere Proben wurden über dem Ballen in der Nähe der Flammen gezogen.

Die Zündung des Kunststoffballens erfolgte mit 1 l Brennspritus auf beiden Seiten der gepreßten Ballen. Bild 40 zeigt den mit einer Folie umhüllten Kunststoffballen im Anfangsstadium des Brandes und eine am Boden stehende zur Zündung verwendete Wanne.

Während des Brandes wurden mit einer Probenahmepumpe am unteren Rand des Rauchabzugs in einer Höhe von 3 m oder auch in Flammennähe Proben zu jeweils 100 cm³ auf Carbotrap 400 Adsorptionsröhrchen adsorbiert. Auf Bild 40 sind neben der Brandentwicklung in der Anfangsphase die unterschiedlichen Orte der Probenahme zu erkennen. Hier erfolgt z. B. eine Probenahme rechts neben dem Kunststoffballen und ein weitere am Rand des Abzuges durch eine auf der Leiter stehende Person. Zum Schutz vor den Brandgasen wurden Masken bzw. Preßluftatmer getragen. Bild 41 zeigt den Brand in einem weiter fortgeschrittenen Stadium und die Probenahme am Rand des Abzuges durch die auf der Leiter stehende Person.

3.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte einerseits über eine progammierbare elektronische Probenahmepumpe und andererseits über handbetätigte Probenahmepumpen.

3.2.1 Programmierbare elektronische Probenahmepumpe

Bei elektronischem Betrieb können an dieser Probenahmepumpe sowohl der Volumenstrom und das Gesamtprobevolumen als auch die Probenahmedauer vorgegeben werden. Bei der Anwendung dieser Pumpe bei Messungen zeigte sich jedoch in mehreren Punkten, daß eine praktische Anwendung für die Brandrauchanalytik in Frage gestellt werden muß.

- Der Volumenstrom ist vom Strömungswiderstand des verwendeten Adsorptionsröhrchens abhängig. Die Anzeige des Volumenstroms auf dem Display der Pumpe berücksichtigt diesen Effekt nicht, d.h. vor jeder Messung muß der Volumenstrom in Verbindung mit dem gerade verwendeten Adsorptionsröhrchen kalibriert werden.
- Die Einstellung der Parameter am Gerät ist kompliziert und zeitaufwendig. Dies bedeutet, daß eine Änderung der vorab eingestellten Werte während eines Brandversuchs oder während eines Realbrandes nur bedingt möglich ist.
- Die Probenahmepumpe wird durch einen fest eingebauten Akkumulator mit Energie versorgt. Es ist nicht möglich, diesen Akkumulator ohne größeren Aufwand zu tauschen. Dies bedeutet, daß die Pumpe während der Aufladezeit des Akkus nicht für die Probenahme zur Verfügung steht.

3.2.2 Handbetätigte Probenahmepumpe

Für die Schadstoffmessungen bei Bränden mit Prüfröhrchen sind bei den Feuerwehren eine große Anzahl handbetätigter Probenahmepumpen vorhanden. Diese Pumpen sind hinsichtlich ihrer Handhabung für die Brandrauchanalytik geeignet. Der Federmechanismus innerhalb der Pumpe bedingt jedoch einen nicht konstanten Volumenstrom während der Probenahme. In Verbindung mit einem Carbotrap 400 Adsorptionsröhrchen liegen diese Volumenströme während der Probenahme bei einer Temperatur von 25 °C zwischen

450 cm³/min nach 5 s und 25 cm³/min nach 30 s. Wegen der Möglichkeit des Durchbrechens der Analyten und Überladung sämtlicher Adsorptionsplätze bzw. Verdrängung bereits adsorbierter Substanzen ist es daher notwendig, den Volumenstrom mit einem nachgeschalteten Strömungswiderstand zu begrenzen.

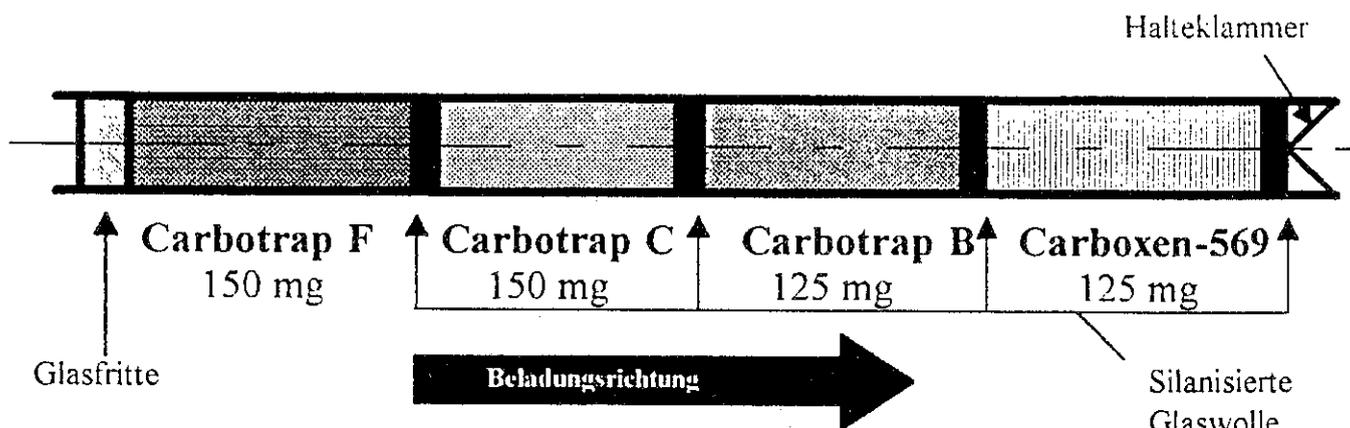
Je geringer das Probevolumen gewählt wird, desto geringer ist der Einfluß dieser Überladungs- und Verdrängungseffekte und desto weniger Substanzen (Ruß, Wasserdampf, usw.) gelangen bei der Probenahme in das Sammelröhrchen. Ein Probevolumen von 100 cm³ ist aufgrund der hohen Nachweisempfindlichkeit des Massenspektrometers für eine Messung ausreichend.

3.2.3 Probenahme auf Adsorptionsmaterial

Die Anlagerung von Gasteilchen an feste Oberflächen wird Adsorption genannt. Man nutzt diesen Effekt in der Analytik, um Gase auf Adsorbentien für eine nachfolgende Analyse anzureichern. Die Probenahme auf Adsorptionsröhrchen hat sich auf dem Gebiet der Brandrauchanalytik bewährt.

Der bei Bränden entstehende Brandrauch enthält viele verschiedene Schadstoffe mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Es ist nicht möglich, nur mit einem Adsorptionsmaterial alle Schadstoffe aufzufangen und effizient wieder abzugeben. Aus diesem Grund sind bei der Probenahme Kombinationen von verschiedenen Adsorptionsmaterialien notwendig, deren Adsorptionskraft gegenüber dem Analyten in Flußrichtung des Volumenstroms bei der Probenahme zunimmt.

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden diesbezüglich verschiedene Adsorptionskombinationen untersucht. Hierbei wurden mit dem Carbotrap 400 Röhrchen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Dieses Adsorptionsröhrchen ist wie folgt aufgebaut.



3.3 Analyse der Proben mit GC/MS-Meßtechnik

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. Eine ausführliche Beschreibung hierzu befindet sich in /3/. 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.

3.4 Quantitative Auswertung

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 Responsefaktoren einiger ausgewählter Substanzen sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Die bei Analysen erhaltenen Ergebnisse sind beispielhaft in den Tabellen 2 und 3 aufgeführt. Es werden nur Konzentrationen von Einzelsubstanzen, die größer als $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 auch unterschiedliche Substanzen zu verschiedenen Zeiten und/oder unterschiedlichen Meßstellen analysiert.

Wie die an verschiedenen Meßstellen gezogenen Proben der Tabellen 2 und 3 zeigen, fallen z. B. die noch in Tabelle 2 aufgeführten Substanzen wie 2,3-Dimethylpentan, Cyclohexan, Isocyanobenzol und Benzofuran in Tabelle 3 weg. Stattdessen wurde mit Ethylbenzol eine weitere Substanz analysiert und in Tabelle 3 aufgeführt. Dies bedeutet jedoch nicht, daß die anderen Substanzen nicht mehr vorhanden sind, sondern eventuell lediglich unterhalb der Toleranzgrenze liegen. Zu einer anderen Zeit an einer anderen Meßstelle kann sich die Analyse der Substanzen wieder ändern. Die Angaben in den Tabellen zeigen, daß eine quantitative Analyse von Schadstoffen möglich ist.

4. VERGLEICH VON MEßERGEBNISSEN

Bei den Untersuchungen wurde von Versuch zu Versuch nur ein Parameter geändert, um den jeweiligen Einfluß besser beurteilen zu können. Ein Vergleich direkt nach dem Zündvorgang zeigt, daß die Brandentwicklung innerhalb kurzer Zeit bei den verwendeten Brandstoffen sehr schnell fortschreitet. Bereits nach Versuchszeiten zwischen 22 s und 1 min 11 s löste der jeweils installierte optische Rauchmelder aus, obwohl in dieser Brandphase wenig Brandrauch vorhanden bzw. optisch zu erkennen war.

Die Flammen erreichten bei Versuch 1 erst nach einer Versuchszeit von über 85 s eine Höhe von mehr als 2 m über dem Versuchsaufbau, während dies bei Versuch 2 bereits nach 40 s der Fall war.

Das manuelle Einschalten der Löschanlage bei Versuch 1 mit vier offenen Sprinklern mit einer eingestellten Wasserbeaufschlagung von 12,5 mm/min bewirkte am Erscheinungsbild der Flammen recht wenig. Durch den Sprinklereinsatz nahm lediglich die Rauch- und Wasserdampfbildung unterhalb des Daches zu. Das Sprinklerwasser konnte den Brand selbst nicht unter Kontrolle bringen bzw. löschen. Die anschließende Erhöhung des Wasservolumenstromes auf ca. 30 mm/min ließ den Brandrauch und den Wasserdampf schlag-

artig nach unten bis auf den Boden absinken, so daß keine Sicht mehr vorhanden war. Nach ca. 30 s wurde die Wasserbeaufschlagung auf 20 mm/min eingeregelt. Die Kontrolle über den Brand wurde nach mehreren Minuten erreicht. Kleine Restflammen wurden später manuell abgelöscht.

Durch das Auslösen der Wassernebelanlage bei Versuch 2 nahm die Brandintensität ab und die Sichtverhältnisse um den Versuchsaufbau herum wurden durch den Rauch und Wasserdampf zunehmend schlechter. Nach einer Löschzeit von über 6 min wurde die Wasserzufuhr abgeschaltet. Der Brand war weitgehend abgelöscht und unter Kontrolle. Restflammen wurden später manuell abgelöscht.

Durch den Einfluß des Gebläses bei Versuch 3 wurde die Brandrauchentwicklung insgesamt etwas verstärkt. Auf der Rückseite des Aufbaus war ein verstärktes Schwelen der Holzwohle zu erkennen, während auf der Frontseite mehr Flammen aus dem Stapel heraustraten. Das Auslösen der Wassernebelanlage nahm ebenfalls die Sicht auf das Brandgut. Nach dem Abschalten der Löschanlage und Besserung der Sichtverhältnisse konnte der Brand durch mehrmaliges Einschalten der Löschanlage kontrolliert werden. Kleine Restflammen wurden auch hier später abgelöscht.

Bei der Verwendung von gefalteten Kartons als Brandgut war bei Versuch 4 sowohl die Brand- als auch die Löschwirkung wie beim Versuch 3 einzustufen. Die Sichtverhältnisse wurden nach dem Einschalten der Wassernebelanlage ebenso schlecht, so daß die Beurteilung über die Kontrolle des Brandes jeweils nur nach dem Abschalten der Wasserzufuhr beurteilt werden konnte.

Bei Versuch 5 mit Kunststoffkästen aus PP verlief die Brandausbreitung direkt nach dem Zündvorgang zunächst etwas langsamer als bei den Versuchen zuvor. Einige Sekunden später war der Brand jedoch so heftig und mit einer so großen Rauchentwicklung verbunden, daß der Löscheinsatz mit Wassernebel sehr schnell erfolgen mußte, um Beschädigungen innerhalb der Versuchshalle zu vermeiden. Die Löschzeit insgesamt war trotz des zeitlich

frühen Einsatzes beträchtlich länger als bei den anderen Versuchen.

Tabelle 4 zeigt die jeweilige Löschzeit und den Wasserverbrauch für die durchgeführten Versuche. Bei Versuch 1 mit der Sprinkleranlage (Holzwolle, Sprinkler, kein Windeinfluß) wurde der Löschvorgang am spätesten begonnen und nach der optischen Beurteilung nach Aufbringung von 2346 l die Wasserzufuhr abgeschaltet. Nach Erkennen eines durch den Betrieb der Anlage nicht gelöschten Brandnestes, das jedoch auf eine Stelle beschränkt war, wurde die Anlage erneut eingeschaltet und versucht, dieses vollständig zu löschen. Dabei wurden mit der Sprinkleranlage insgesamt 3464 l Wasser eingesetzt. Kleine Restflammen wurden später manuell abgelöscht.

Bei Versuch 2 (Holzwolle, Wassernebel, kein Windeinfluß) wurde die Wassernebelanlage nach einer Löschzeit von 6 min 20 s abgeschaltet. Es war kein Nachlöschen erforderlich. Die Löschwassermenge betrug nur 2912 l.

Bei Versuch 3 (Holzwolle, Wassernebel, Windeinfluß) wurde der Löschvorgang früher eingeleitet und nach der optischen Beurteilung die Wasserzufuhr nach 2852 l abgestellt. Der Brand wurde bis auf kleine Restflammen gelöscht. Durch mehrfaches Einschalten der Anlage belief sich die Gesamtwassermenge auf 3455 l.

Ein Vergleich der für diesen Versuch nach der ersten Betriebsphase benötigten Löschzeiten bzw. Löschwassermengen zeigt deutlich, daß nach dem ersten Ausschalten der Löschanlage aufgrund optischer Beurteilung für einen Löscherfolg (Kartons, Wassernebel, Windeinfluß) zunächst die geringste Wassermenge mit 1426 l eingesetzt wurde. Erst nach geringer Besserung der Sichtverhältnisse wurde ein Wiederaufflammen erkannt, so daß ein Nachlöschen notwendig wurde. Insgesamt wurden dadurch 3243 l Wasser benötigt.

Der durch die schnelle Brandausbreitung erfolgte frühzeitige

Löscheinsatz bei Versuch 5 (Kunststoff, Wasserdampf, Windeinfluß) ließ zunächst auf einen schnellen Löscherfolg schließen. Bei der optischen Beurteilung konnte ein sich länger hinziehender Brand, bedingt durch zusätzliches brennendes Abtropfen des Kunststoffes, festgestellt werden. Nach der optischen Beurteilung war der Brand noch nicht unter Kontrolle, so daß die Wasserzufuhr erst nach einer längeren Löschzeit mit einer Wassermenge von insgesamt 9617 l Wasser abgestellt wurde. Durch die schlechten Sichtverhältnisse konnte nicht beurteilt werden, ob eventuell die Kontrolle über den Brand bereits zu einem etwas früheren Zeitpunkt erreicht war.

Durch den Einsatz eines Gebläses zur Simulation des Windeinflusses kann bei diesen Untersuchungen auf eine etwas schnellere Brandentwicklung von der Mitte auf die dem Gebläse abgewandte Seite geschlossen werden, während auf der dem Gebläse zugewandten Seite die Flammen in der Anfangsphase weggedrückt werden.

Der etwas früher erfolgte Löscheinsatz bei diesen Versuchen läßt jedoch nicht auf einen früheren Löscherfolg schließen. Bei den Versuchen 1 bis 4 liegen die Gesamtlöschzeiten bzw. Gesamtwassermengen mit und ohne Windeinfluß im gleichen Bereich. Die Abweichungen lassen sich mit den geometrischen Verhältnissen des Aufbaus und den stofflichen Eigenschaften des Materials erklären. Bei Versuch 5 ist eindeutig die Materialabhängigkeit beim Brand- und Löschverhalten zu beobachten. Der Brand konnte mit der Wasserdampfanlage dennoch auf den bereits brennenden Bereich beschränkt werden. Der Windeinfluß ist im fortgeschrittenen Brandstadium von untergeordneter Bedeutung. Eine höhere Wasserbeaufschlagung, evtl. auch eine andere Anordnung der Löschdüsen wäre erforderlich, um die Löschzeit zu reduzieren.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsprogramms wurden Brand- und Löschversuche an recyclingfähigen Stoffen wie Holz, Pappkarton und Kunststoff durchgeführt. Für den Löscheinsatz wurden sowohl eine Sprinkler- als auch eine Wassernebelanlage eingesetzt. Das Brandgut selbst wurde als Block oder auf Regalebene angeordnet. Mit einem Gebläse wurde der Windeinfluß sowohl auf das brennende Material als auch auf das aus den Sprinklern bzw. Düsen in Tropfenform austretende Löschwasser simuliert.

Bei den Versuchen wurde festgestellt, daß die Brandentwicklung und die Bildung von Brandrauch einerseits vom Material des Brandgutes und andererseits von dessen Oberfläche abhängt. Der Auslösezeitpunkt der installierten Rauchmelder lag zwischen 22 s und 1 min 11 s. Die manuelle Auslösung der eingesetzten Löschanlagen erfolgte bei diesen Untersuchungen nach einer Versuchszeit von 1 min 48 s und 2 min 42 s, einem Bereich von weniger als 1 min. Der Windeinfluß machte sich zwar, vor allem im Anfangsstadium, bemerkbar, war jedoch bei zunehmender Brandentwicklung von geringer Bedeutung. Der Löscheinsatz und die Löschwassermengen differierten mit und ohne Windeinfluß in der gleichen Größenordnung. Lediglich beim Brandgut Kunststoff mit der größeren Wärmefreisetzung wurde etwa die dreifache Wassermenge zum Löschen benötigt. Der mit dem Gebläse simulierte Wind hatte beim Löschvorgang keinen erkennbaren Einfluß.

Die Ergebnisse bei der Rauchgasanalyse lassen erkennen, daß eine quantitative Analyse einzelner Gaskomponenten mit dem an der Forschungsstelle modifizierten GC/MS-System möglich ist. Bei der Vielzahl der aus dem Brandrauch analysierten Stoffe kann eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen nicht ausgeschlossen werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Schatz, H. : Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen. Brandschutz durch ortsfeste Löschanlagen unter Berücksichtigung der Brandentstehung und Brandausbreitung über die Oberfläche und des Eindringens in das Innere des Lagergutes
Teil 1. Literatúrauswertung und Brandversuche an Sekundär-Rohstoffen
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996) Nr.102, 39 S.
- /2/ Schatz, H. : Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen. Teil 2. Literatúrauswertung, Brand- und Löschversuche an Kunststoffballen und an Paletten mit Pappkarton und Kunststoffkästen
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1997) Nr.104, 58 S.
- /3/ Föhl, A.C. : Untersuchung der Löschverfahren und Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter - GC/MS-Rauchgasanalyse -
Basmer, P. Brandschutzforschung der Bundesländer
Wagner, D. Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1992) Nr.81, 119 S.
- /4/ Föhl, C.A. : Untersuchung der Löschverfahren und Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter
Basmer, P. Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996) Nr.103, 157 S.

7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Responsefaktoren des Massenspektrometers für ausgewählte Substanzen

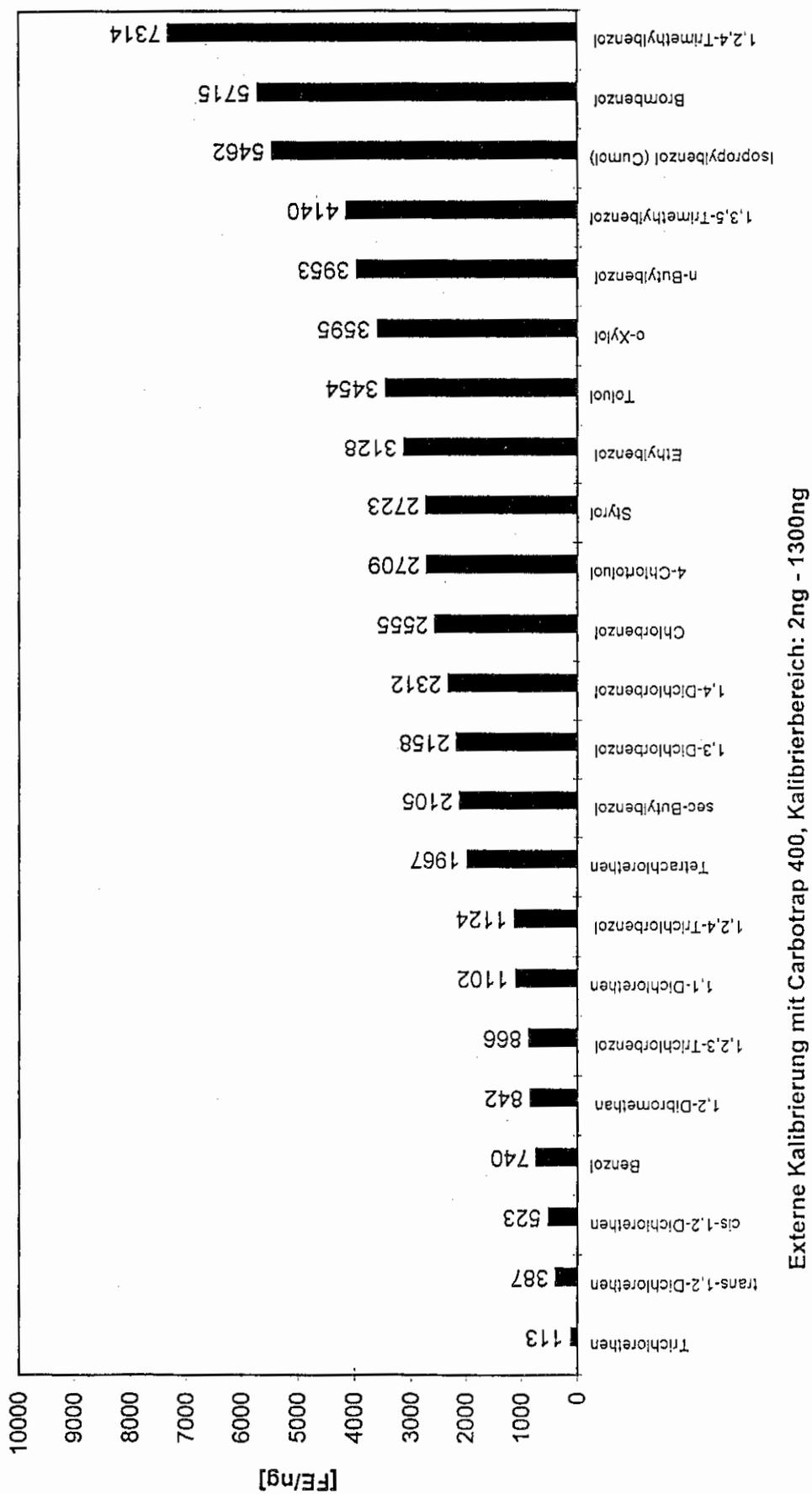


Tabelle 2: Konzentrationen von Einzelsubstanzen ($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
in der Reihenfolge zunehmender Retentionszeit.

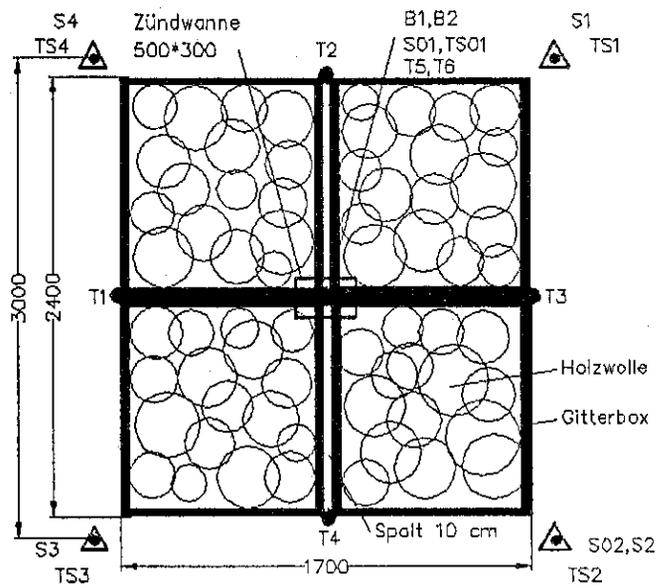
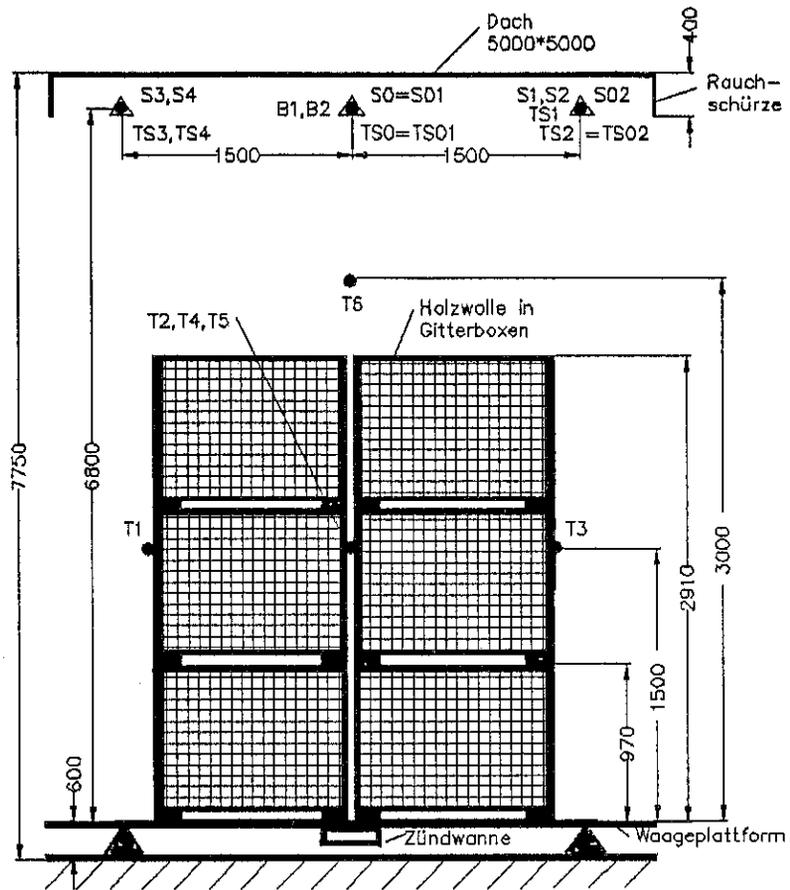
Substanz	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
2,4-Dimethylpentan	380
Benzol	5000
Cyclohexan	480
1,4-Dioxan	510
Toluol	1800
m/p Xylol	2500
Styrol	1100
o-Xylol	1100
Benzaldehyd	190
Isocyanobenzol	230
Benzofuran	190

Tabelle 3. Konzentrationen von Einzelsubstanzen ($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
in der Reihenfolge zunehmender Retentionszeit.

Substanz	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Benzol	3300
1,4-Dioxan	680
Toluol	1800
Ethylbenzol	600
m/p-Xylol	1400
Styrol	2300
o-Xylol	1000
Benzaldehyd	350

Tabelle 4: Löschzeit und Wasserverbrauch bei unterschiedlichen Brandgütern und Löschanlagen.

Ver- such	Brand- gut	Lösch- anlage	Gebläse (Wind)	Lösch- beginn	Löschzeit		Wasserverbrauch	
					Ersteinsatz/ gesamt	Ersteinsatz/ gesamt	l	/ l
				min:s	min:s /	min:s		
1	Holz- wolle	Sprink- ler	nein	2:42	5:06	7:32	2346	3464
2	Holz- wolle	Wasser- nebel	nein	2:16	6:20	6:20	2912	2912
3	Holz- wolle	Wasser- nebel	ja	1:52	6:12	7:31	2852	3455
4	Karton	Wasser- nebel	ja	2:06	3:06	7:03	1426	3243
5	Kunst- stoff	Wasser- nebel	ja	1:48	17:08	19:45	8567	9617

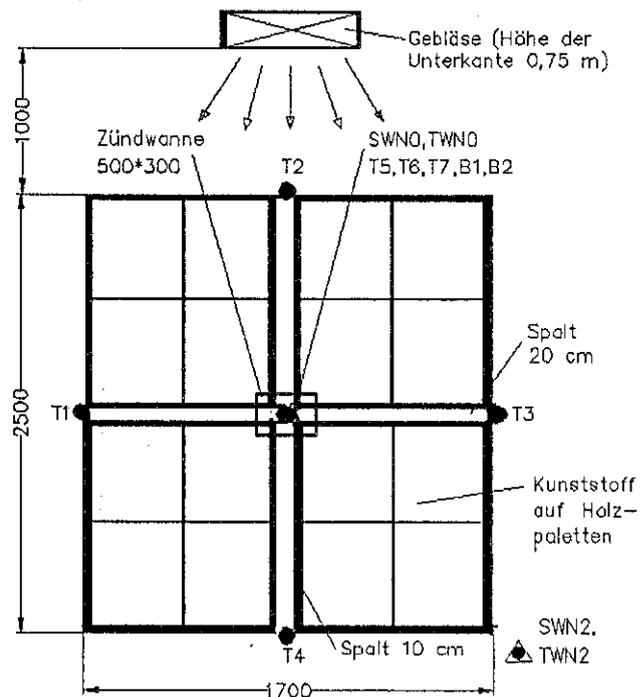
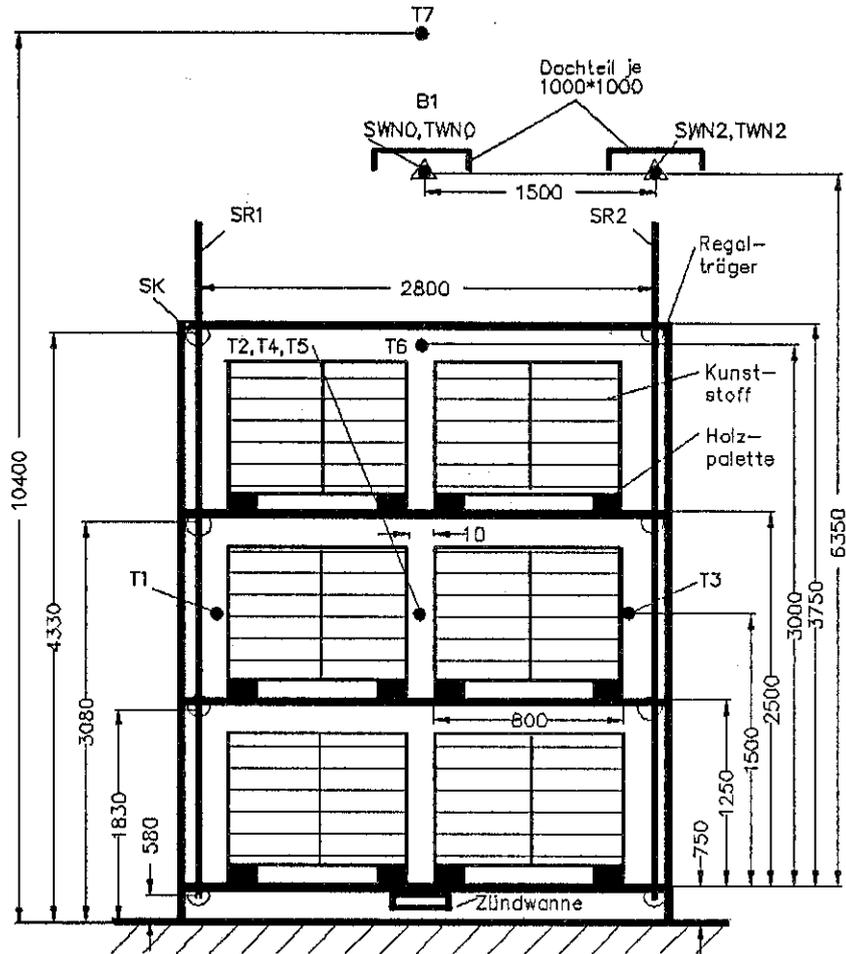


T... = Thermoelemente
 S... = Sprinkler

B... = Brandmelder

Maße in mm

Bild 1: Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus



- | | | |
|-----------------------|-------------------------|------------|
| T... = Thermoelemente | WN.. = Wassernebel | |
| S... = Sprinkler | SK.. = Sprühkopf | |
| B... = Brandmelder | SR.. = Sprührohreinheit | Maße in mm |

Bild 4: Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus

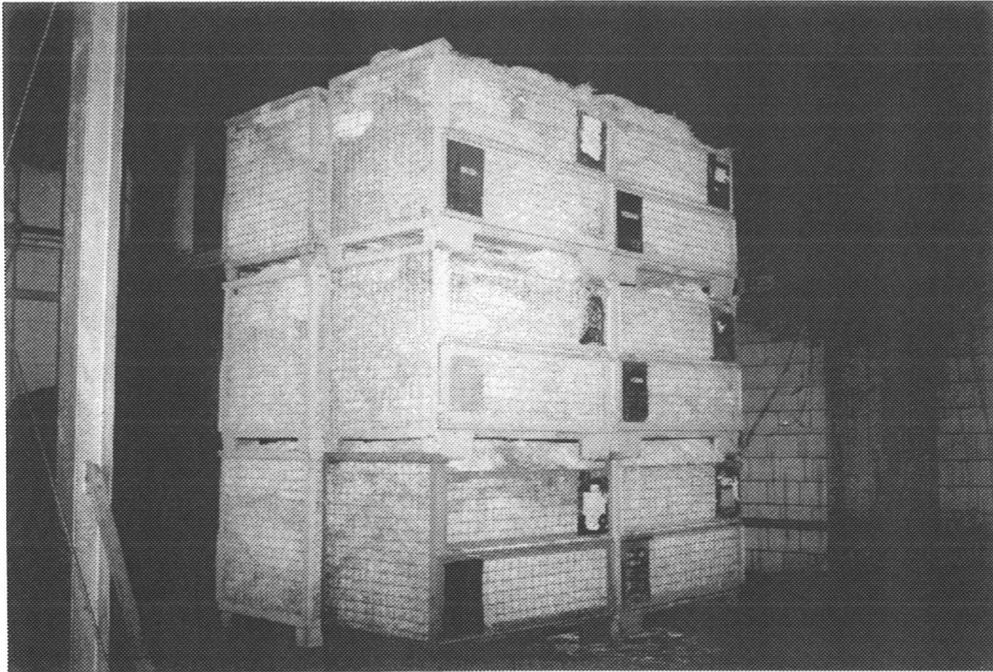


Bild 5. Versuchsaufbau, Frontseite und rechte Seite,
12 Gitterboxen mit Holzwole gefüllt.

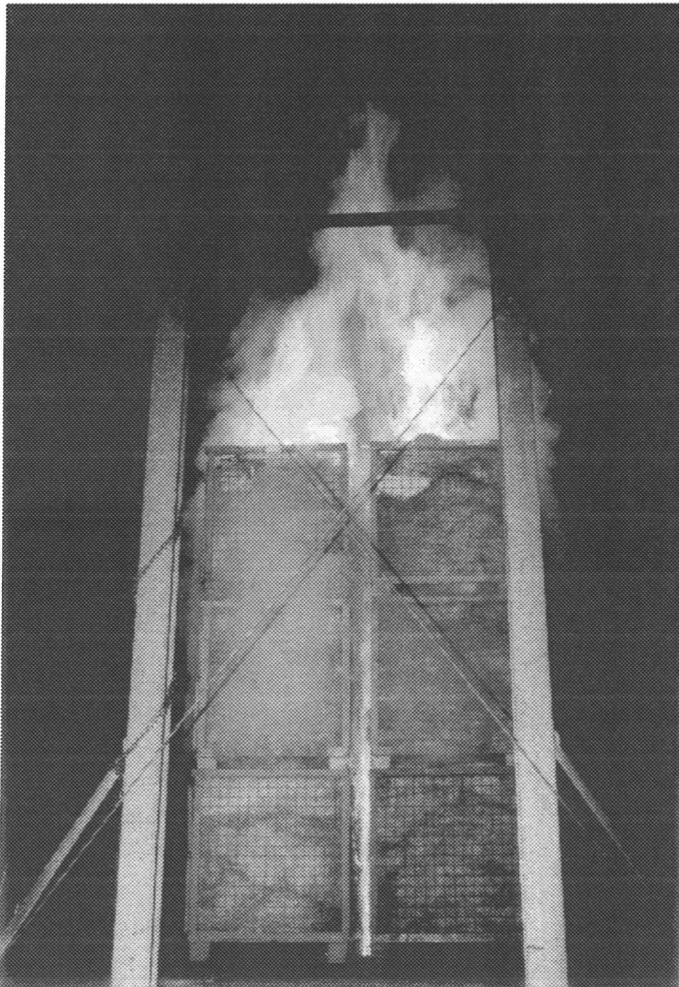


Bild 6. Brandentwicklung,
Versuchszeit 1 min 50 s.

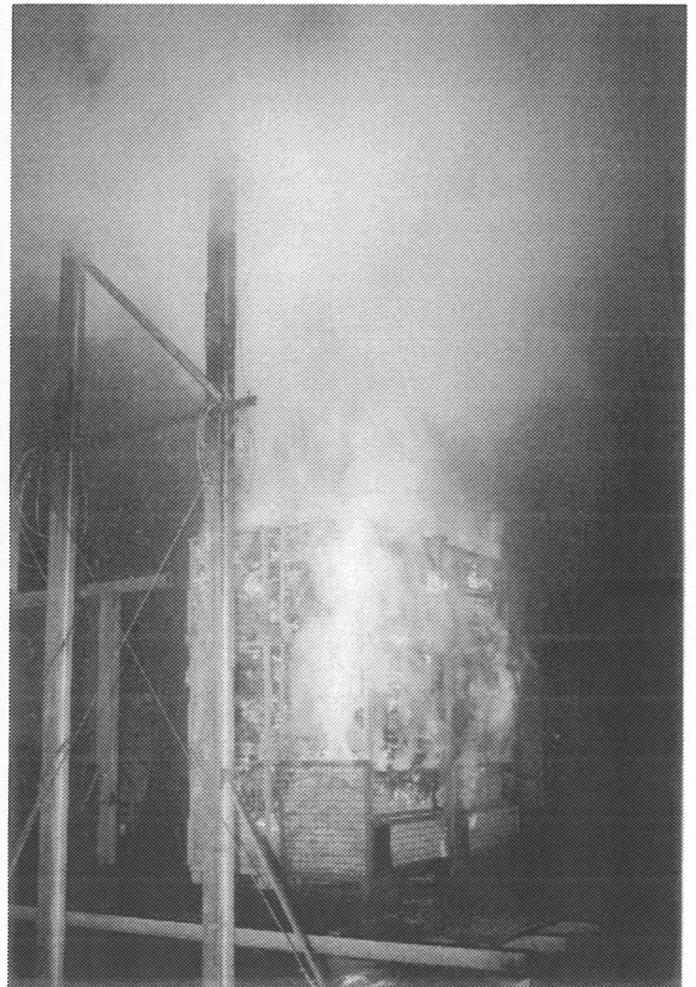


Bild 7. Brandrauchentwicklung
30 s nach Auslösen der
Sprinkler,
Versuchszeit 3 min 12 s.

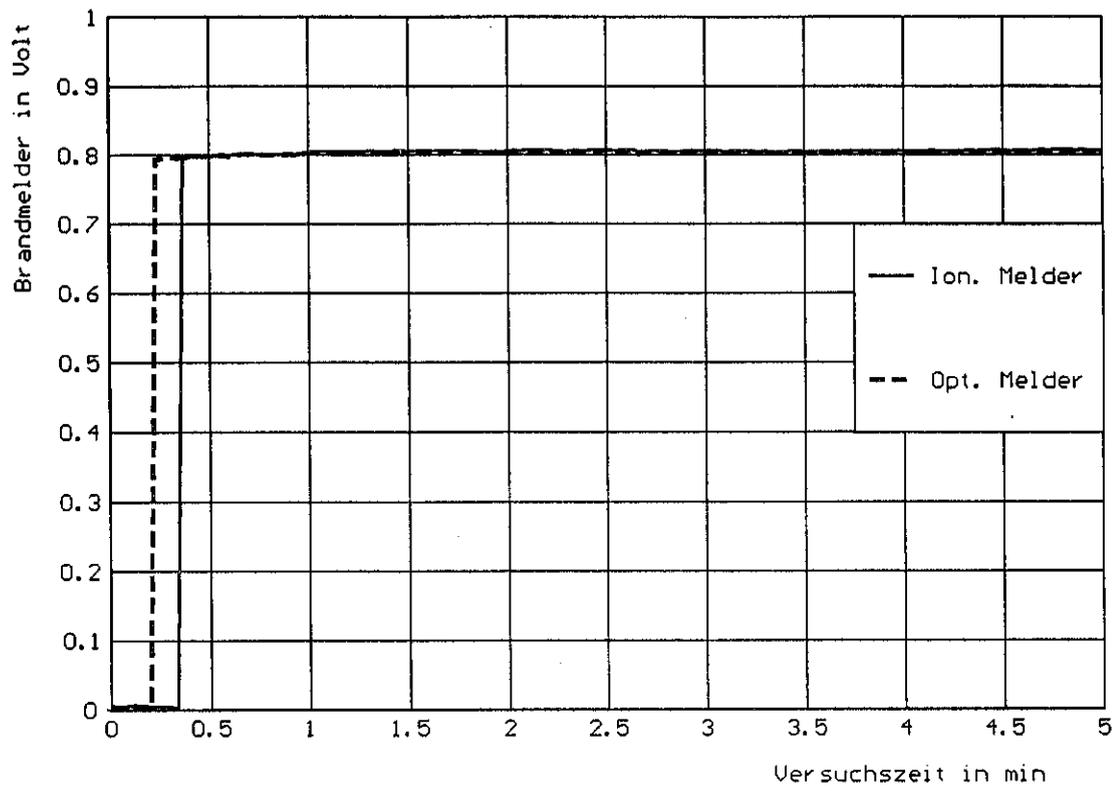


Bild 8. Auslösen der zentralen Brandmelder.

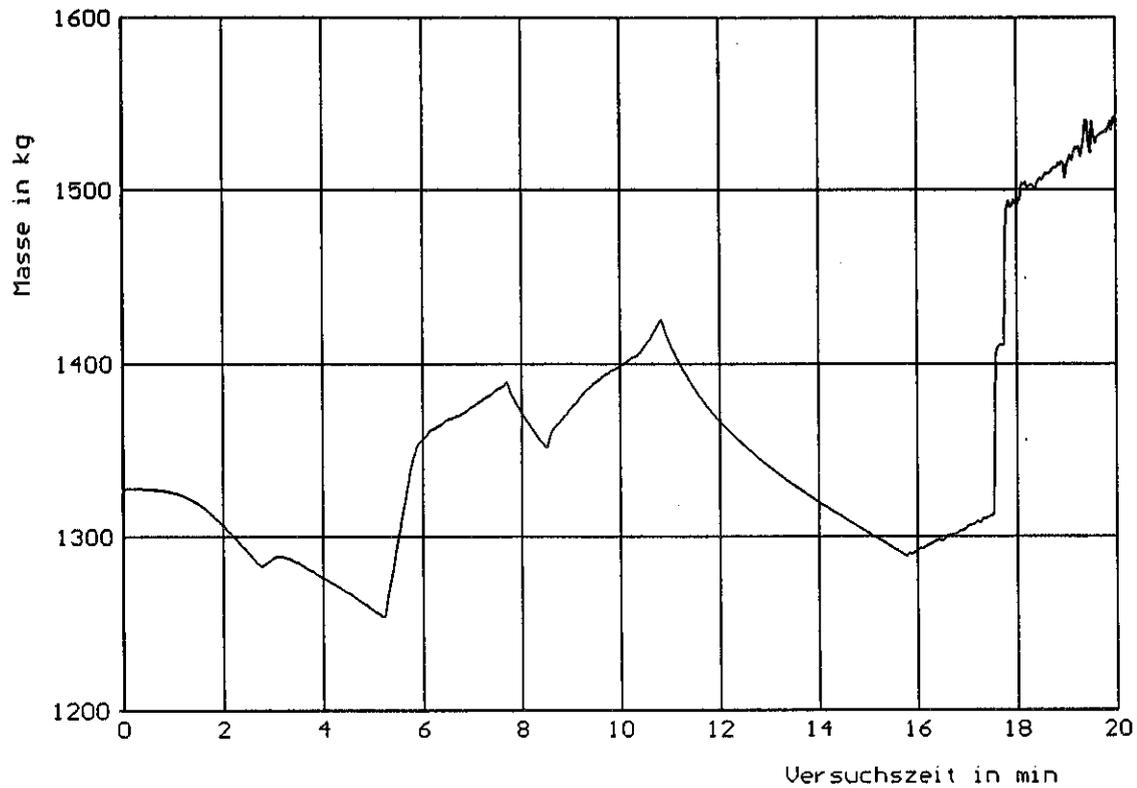


Bild 9. Vorhandene Masse in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

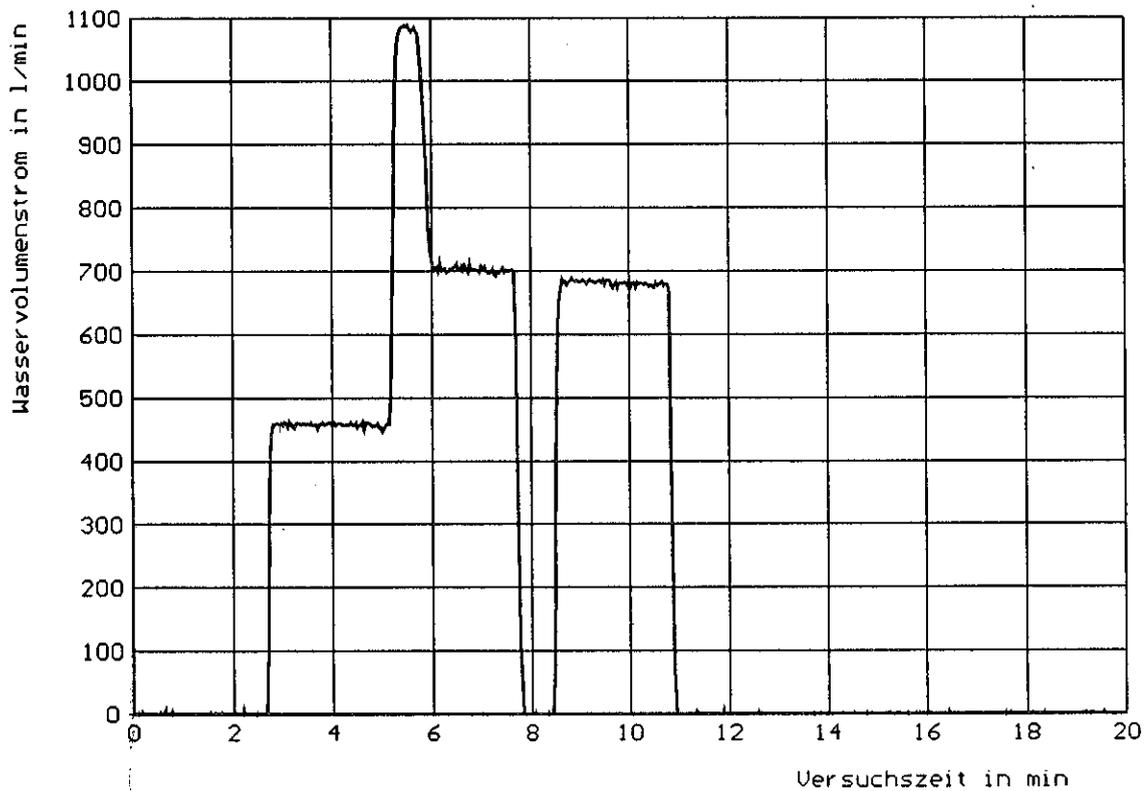


Bild.10: Wasservolumenstrom der Sprinkleranlage in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

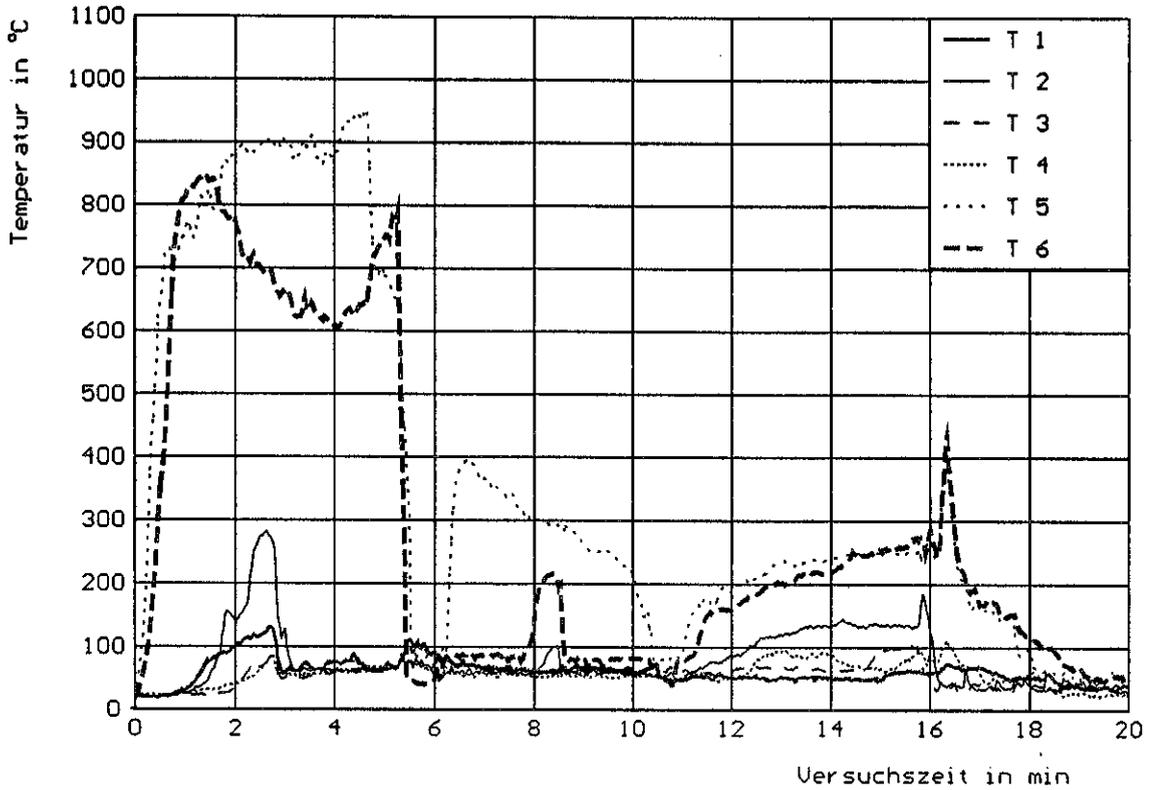


Bild 11. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6.

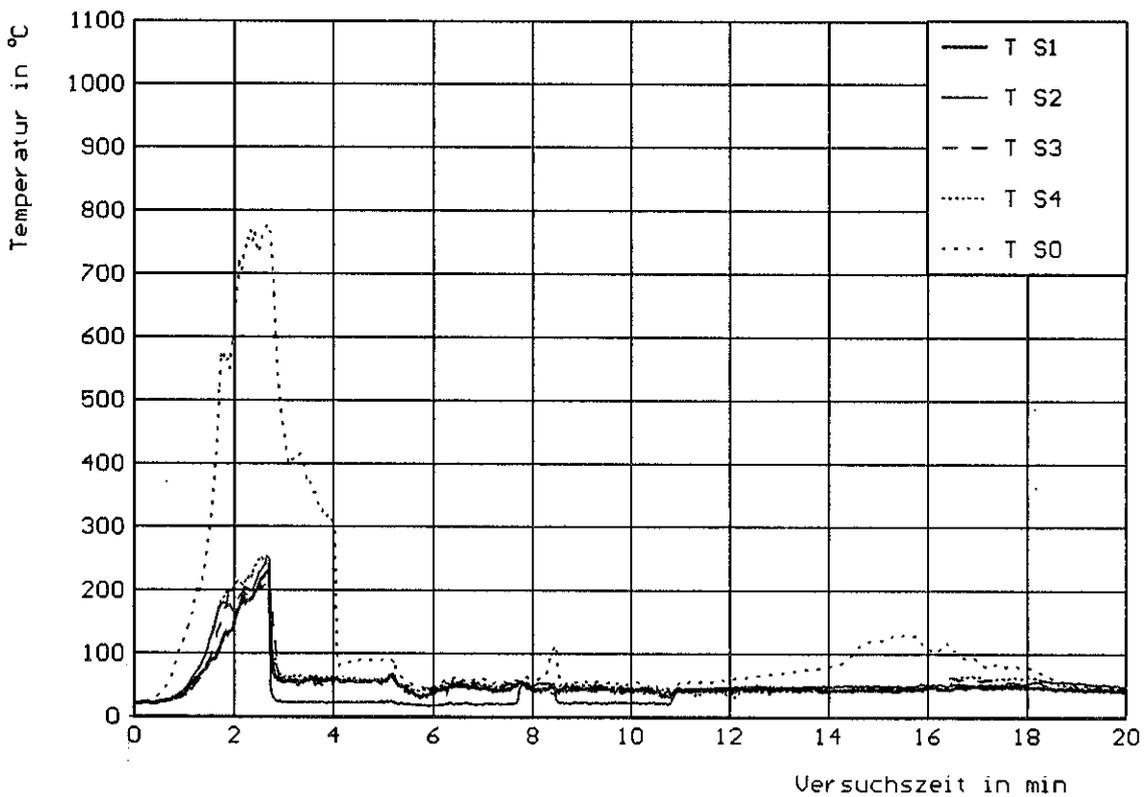


Bild 12. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TS0 bis TS4.

Bild 13. Versuchsaufbau,
Holzwolle in Gitterboxen.

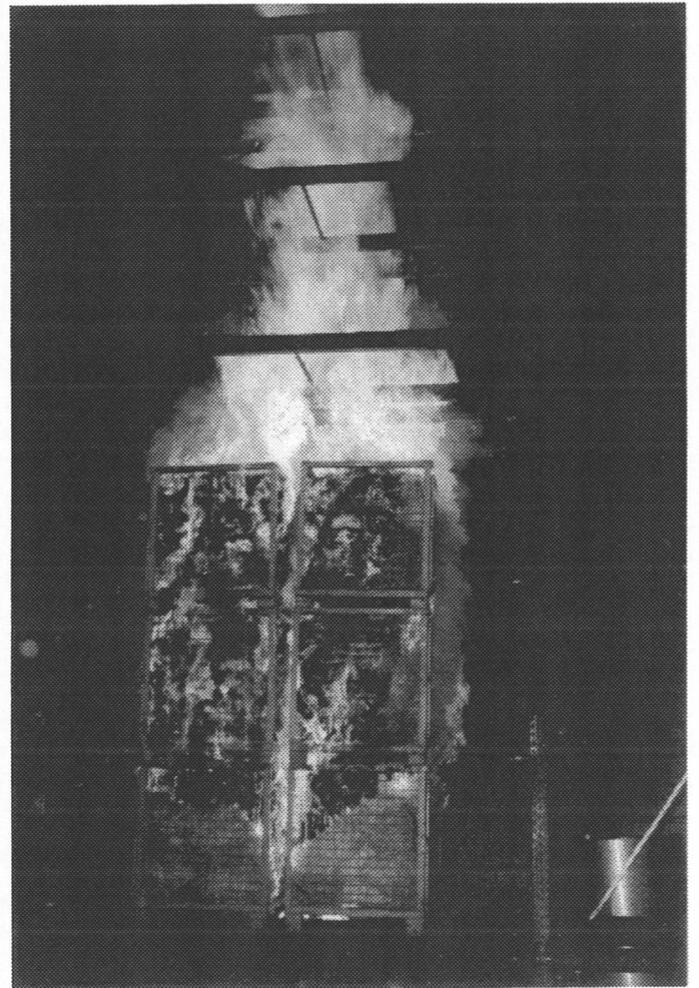
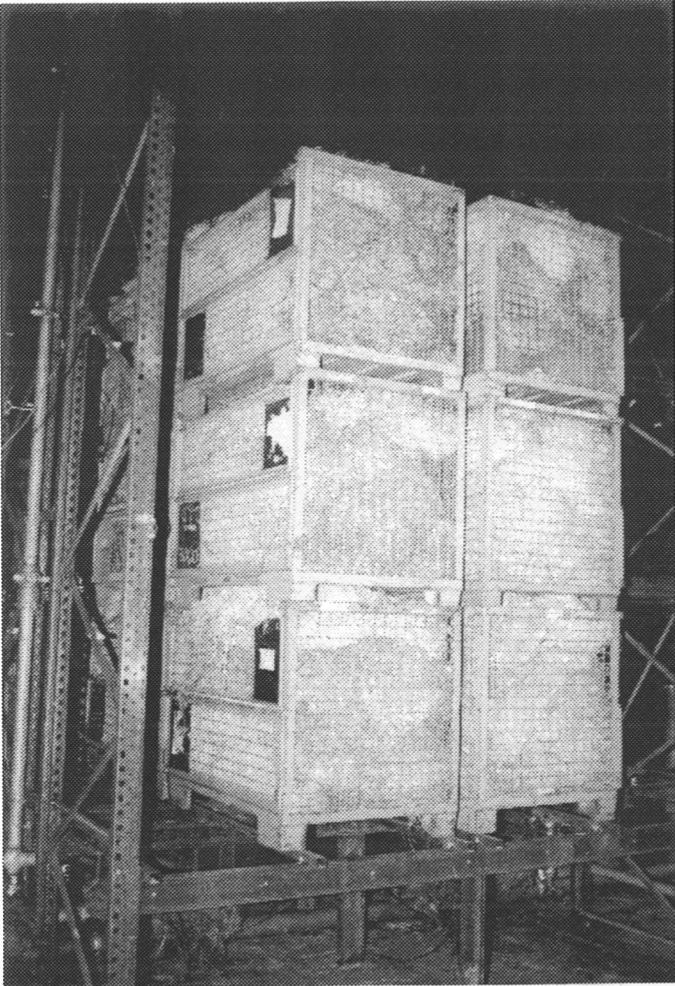


Bild 14. Brandentwicklung,
Versuchszeit 2 min.

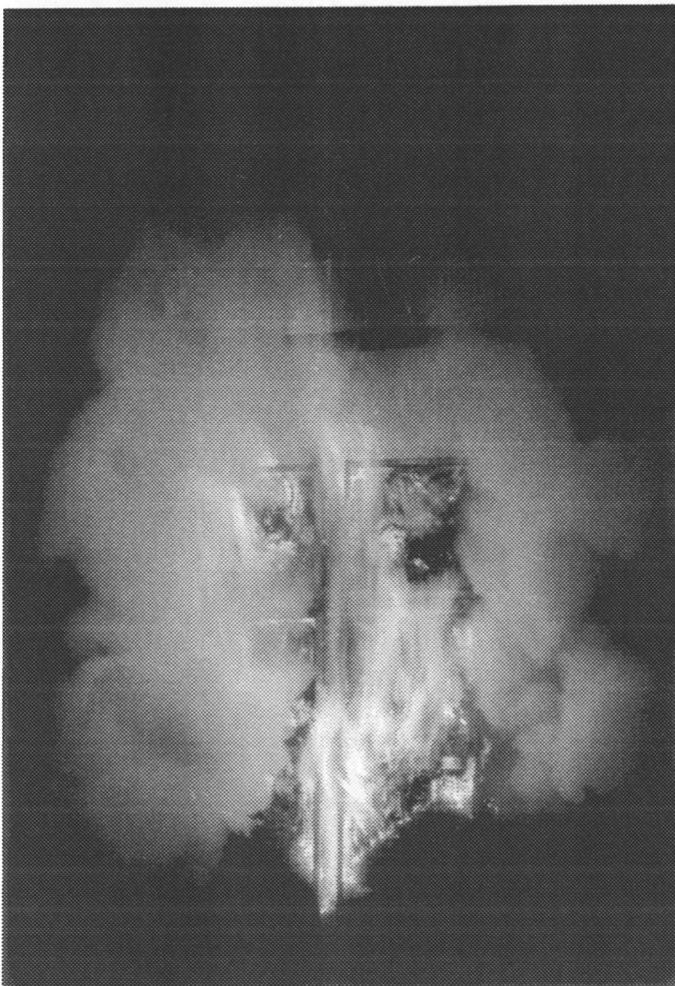


Bild 15. Brandentwicklung direkt
nach dem Löscheinsatz,
Versuchszeit 2 min 18 s.

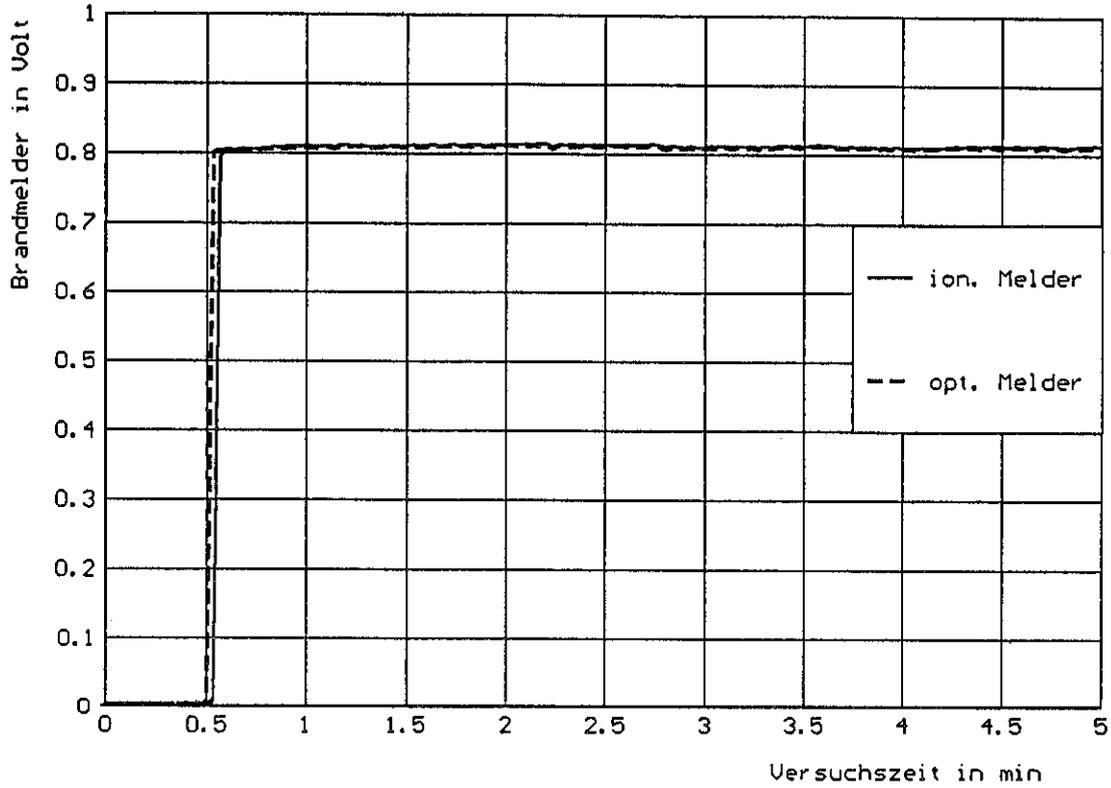


Bild 16. Auslösen der zentralen Brandmelder.

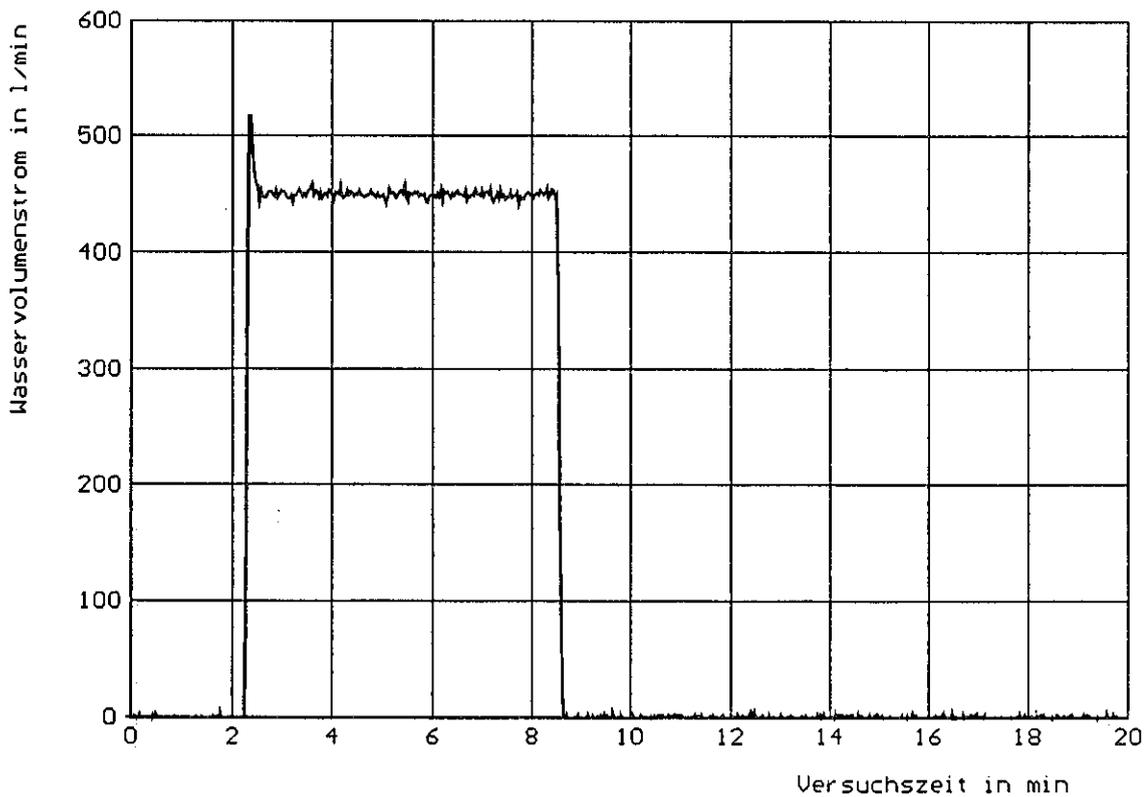


Bild 17. Wasservolumenstrom der Wassernebelanlage in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

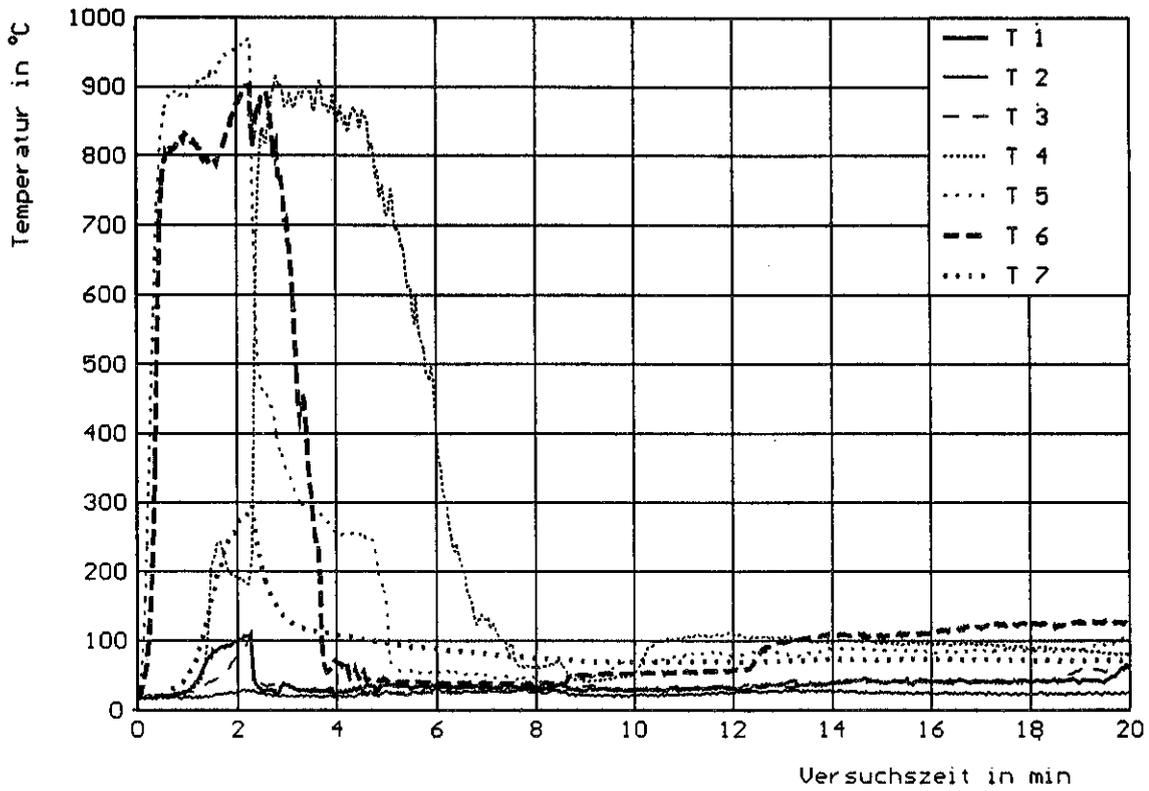


Bild 18. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7.

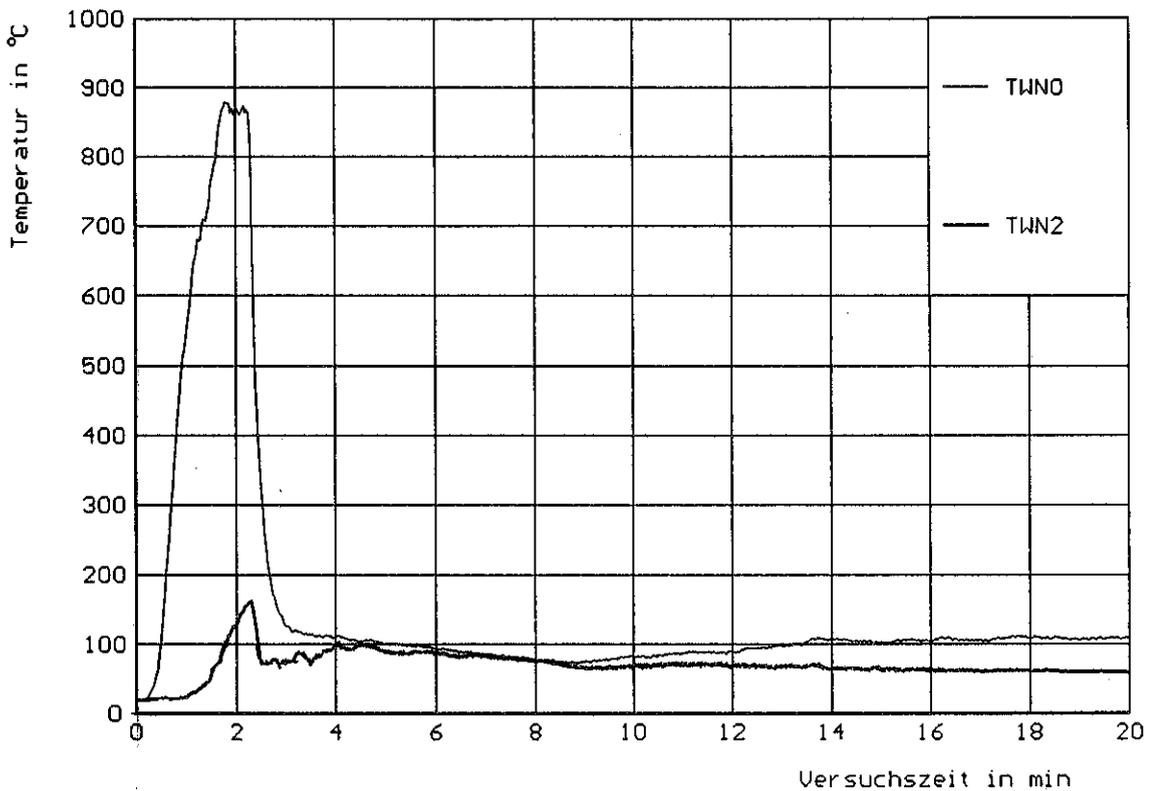


Bild 19. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TWN0 und TWN2.

Bild 20. Versuchsaufbau,
Holzwolle in Gitterboxen
und Windgebläse.

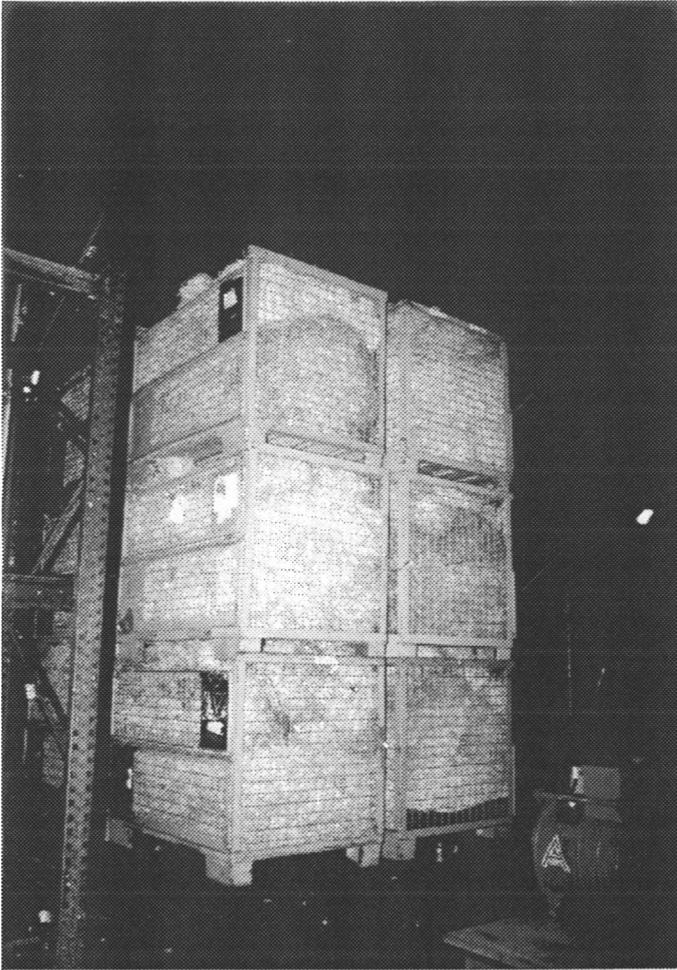


Bild 21. Brandrauchentwicklung,
Versuchszeit 1 min 18 s.

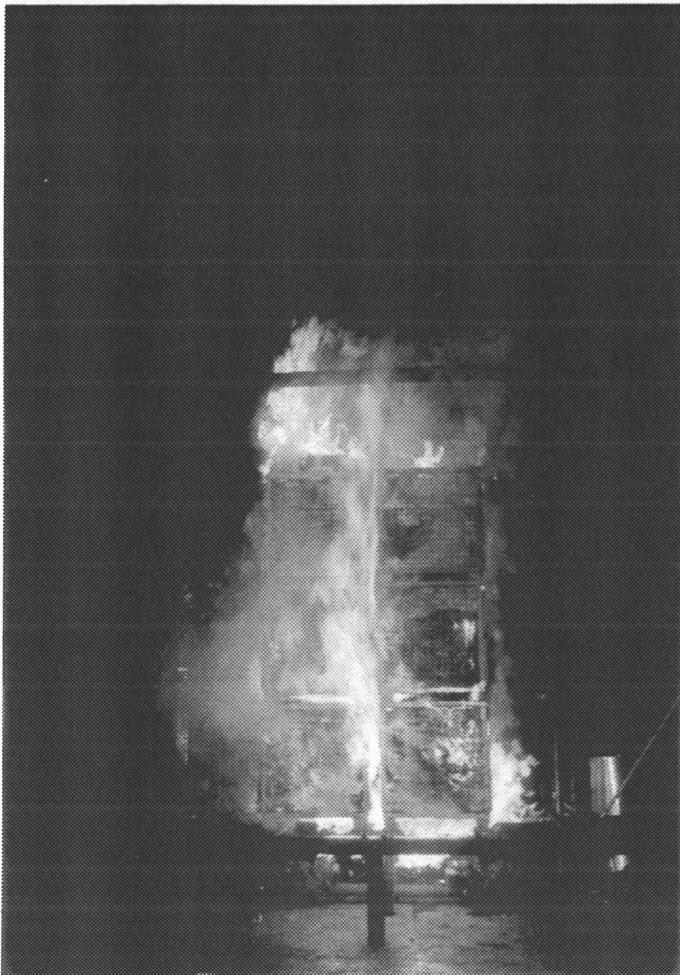


Bild 22. Brandentwicklung,
Versuchszeit 1 min 35 s.

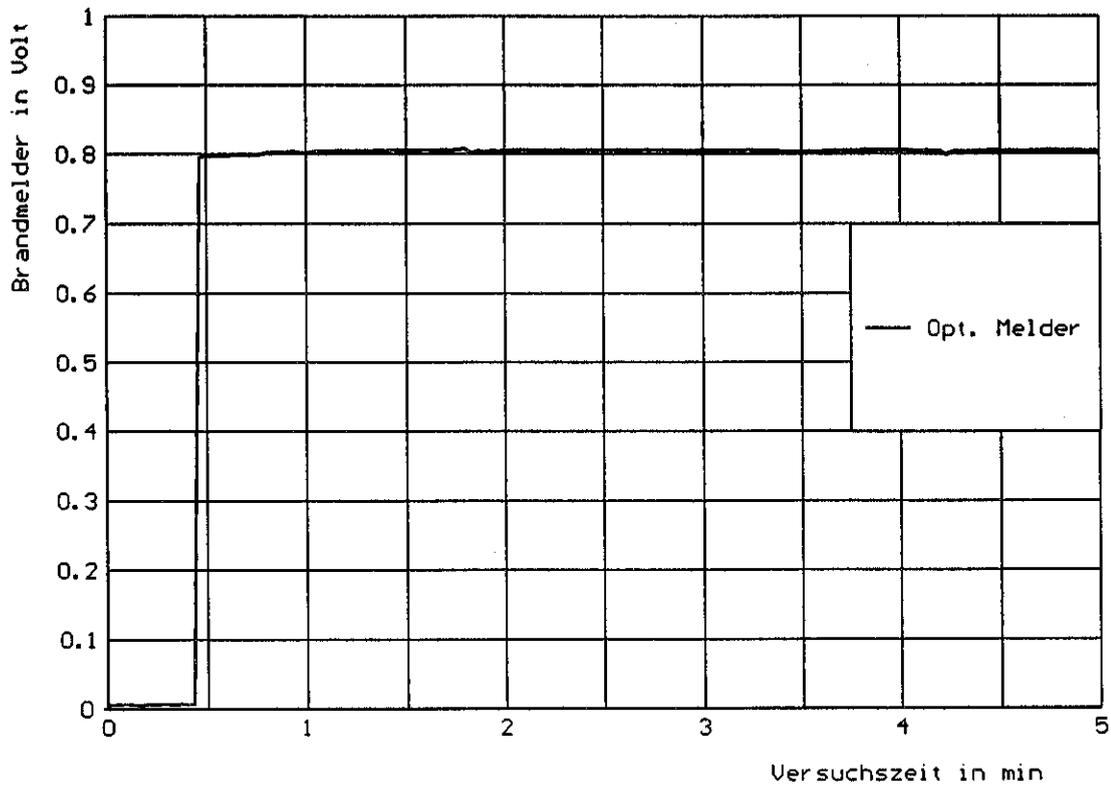


Bild 23. Auslösen des zentralen Brandmelders.

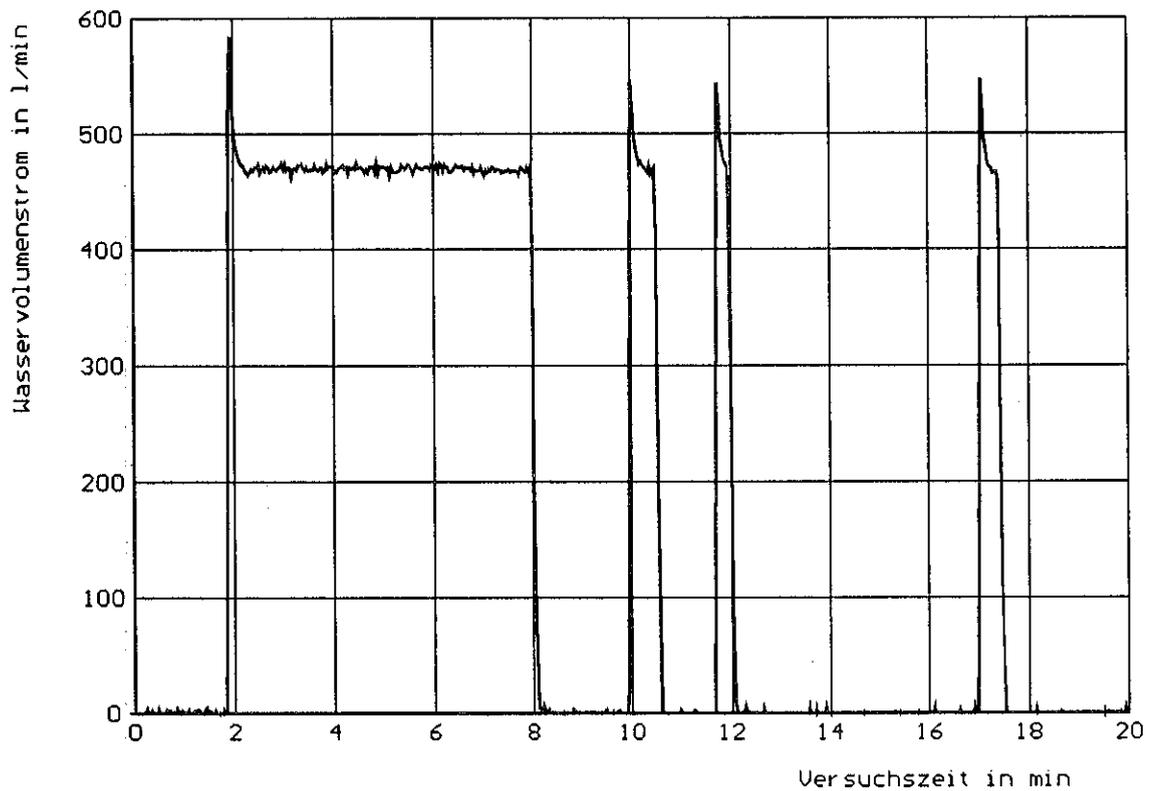


Bild 24. Wasservolumenstrom der Wassernebelanlage in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

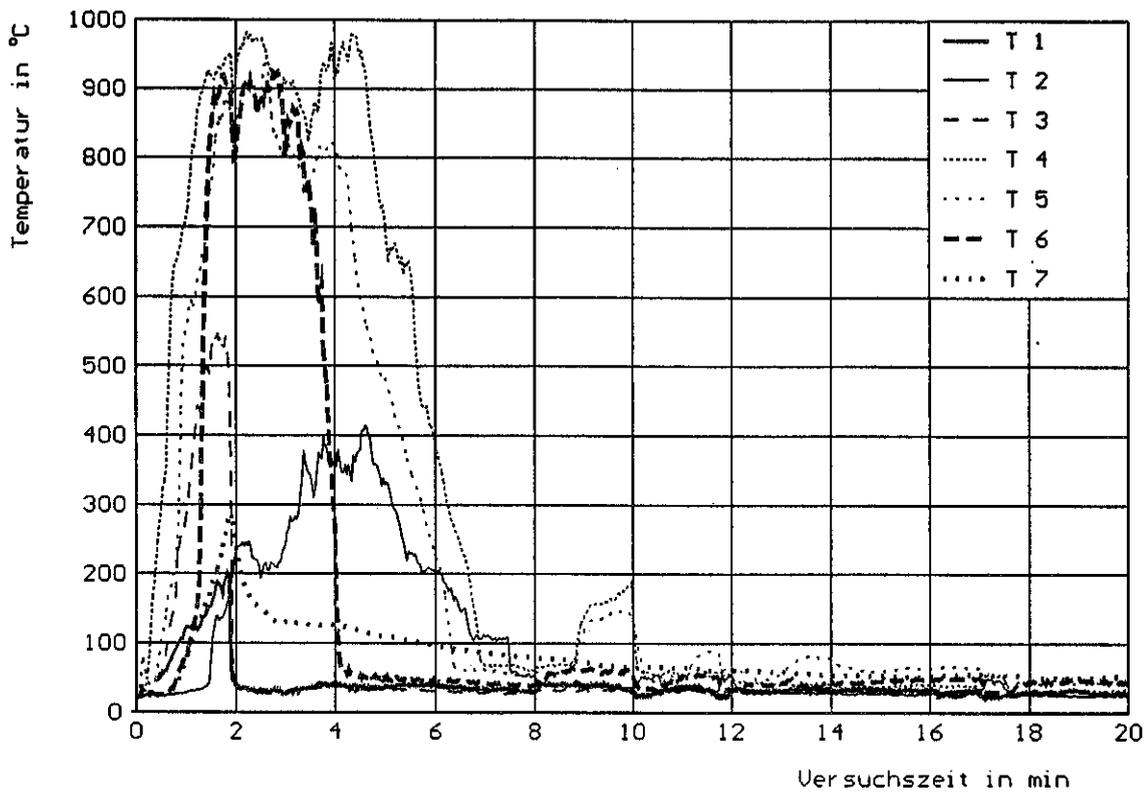


Bild 25. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7.

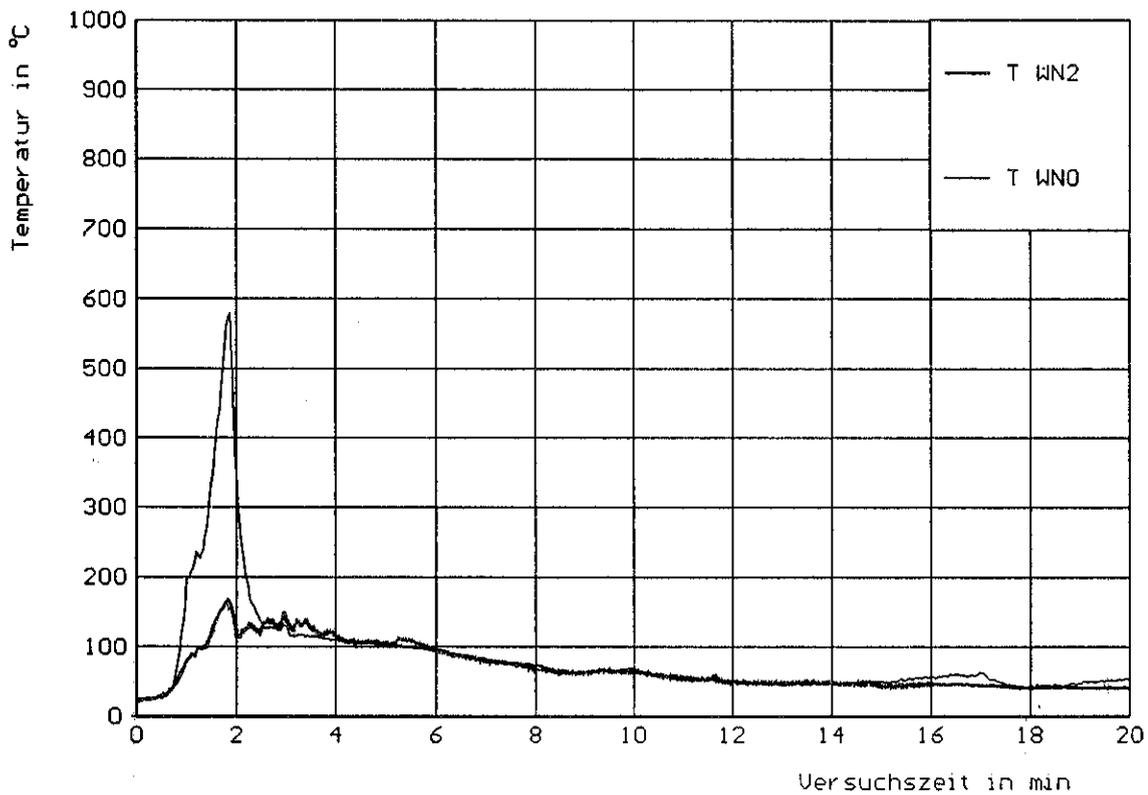


Bild 26. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TWNO und TWN2.

Bild 27. Versuchsaufbau.
Frontseite der Regalebene,
Paletten mit Faltkartons.

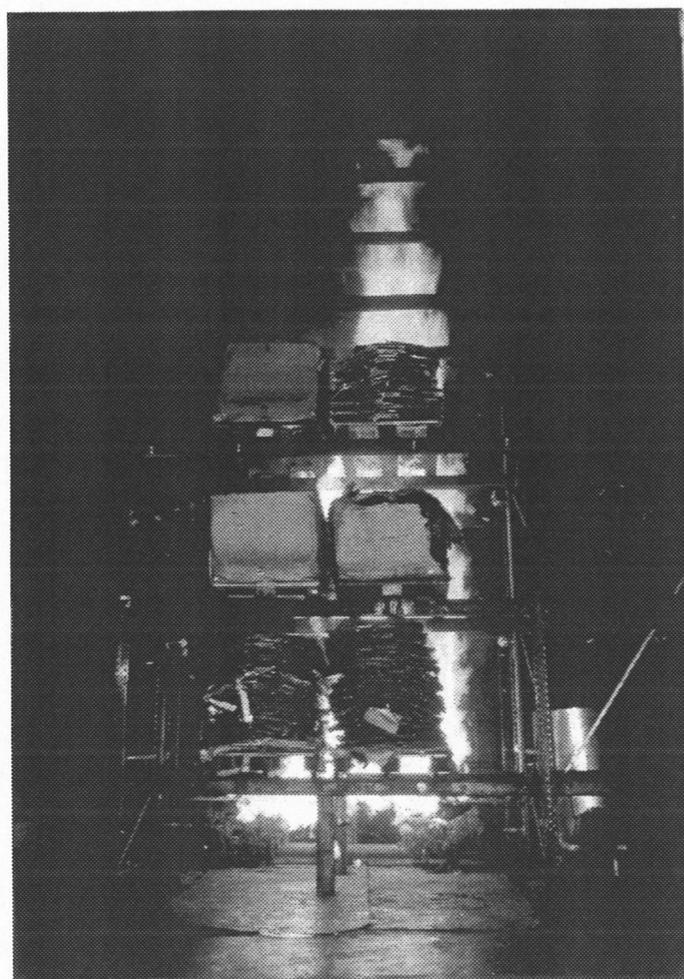
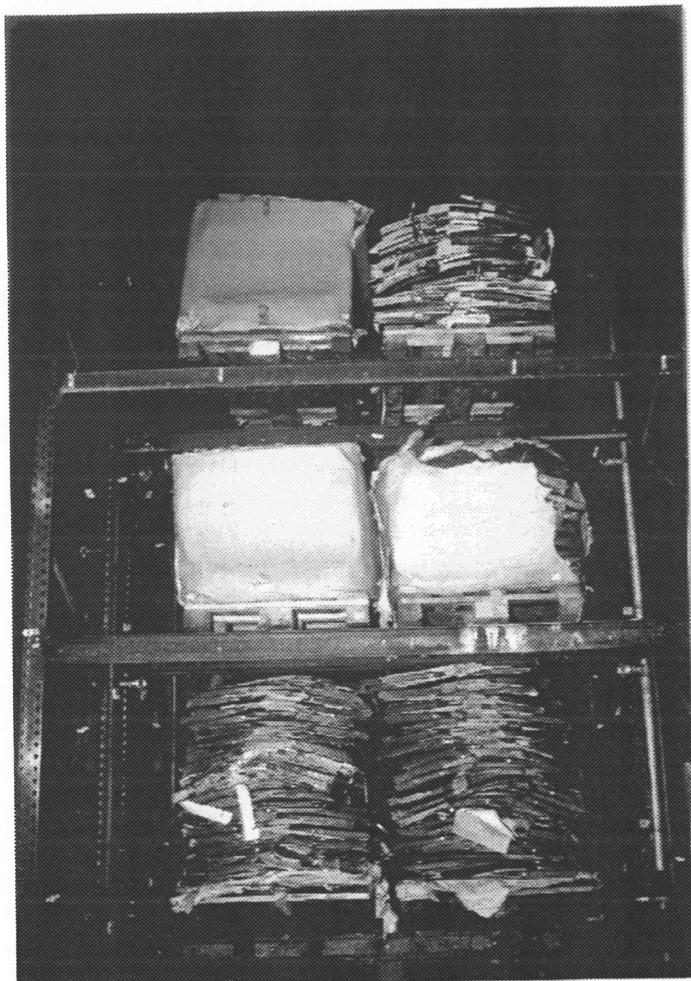


Bild 28. Brandentwicklung,
Versuchszeit 55 s.

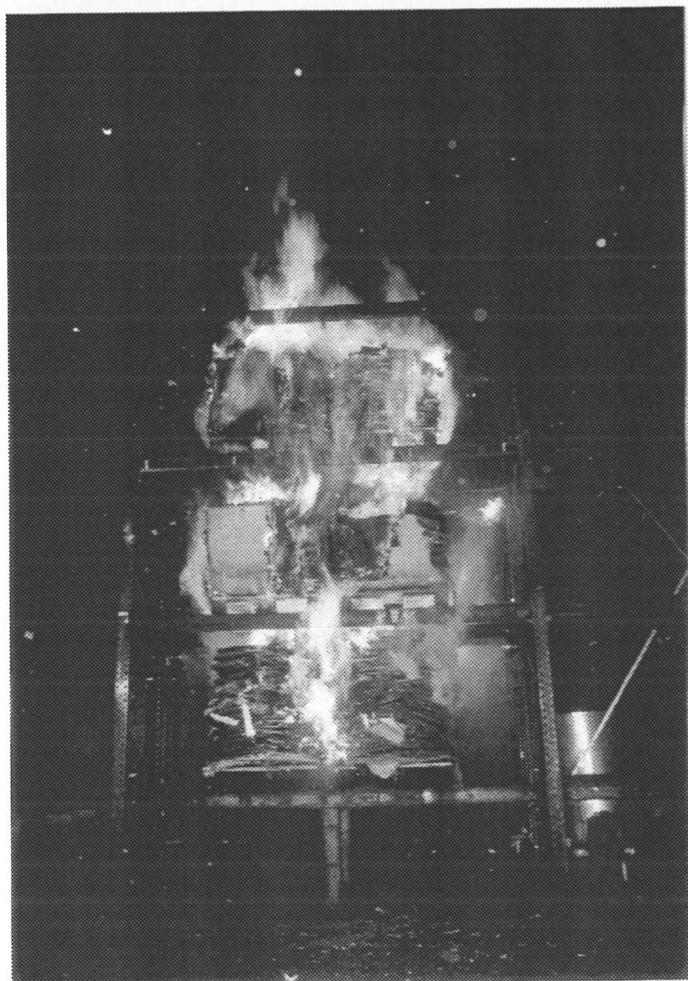


Bild 29. Brandentwicklung direkt
vor Löschbeginn,
Versuchszeit 2 min 3 s.

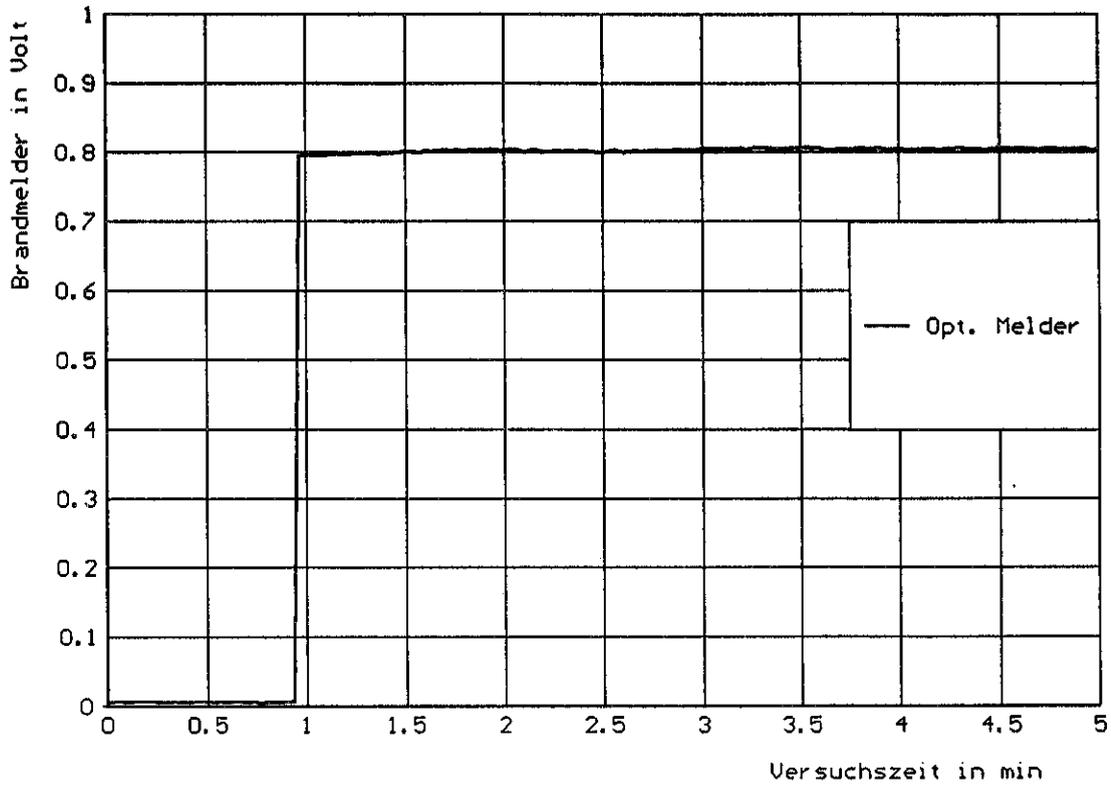


Bild 30. Auslösen des zentralen Brandmelders.

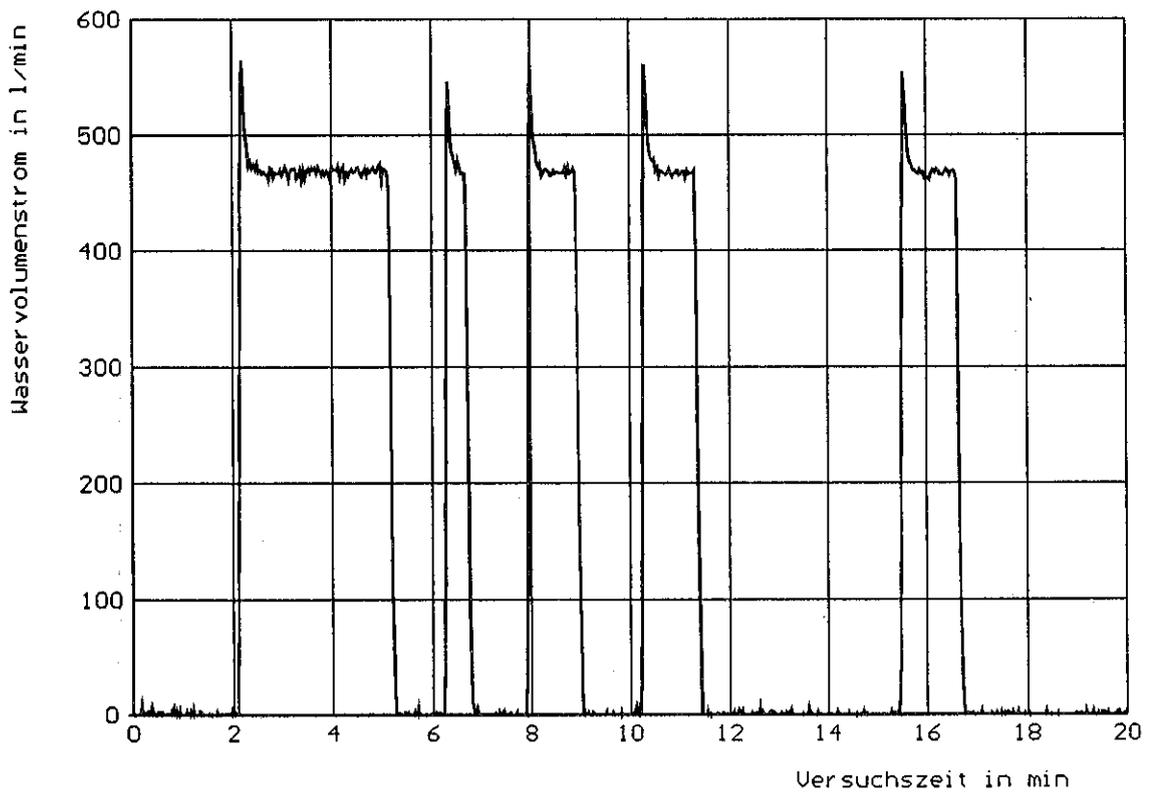


Bild 31. Wasservolumenstrom der Wassernebelanlage in Abhängigkeit von der Versuchszeit,

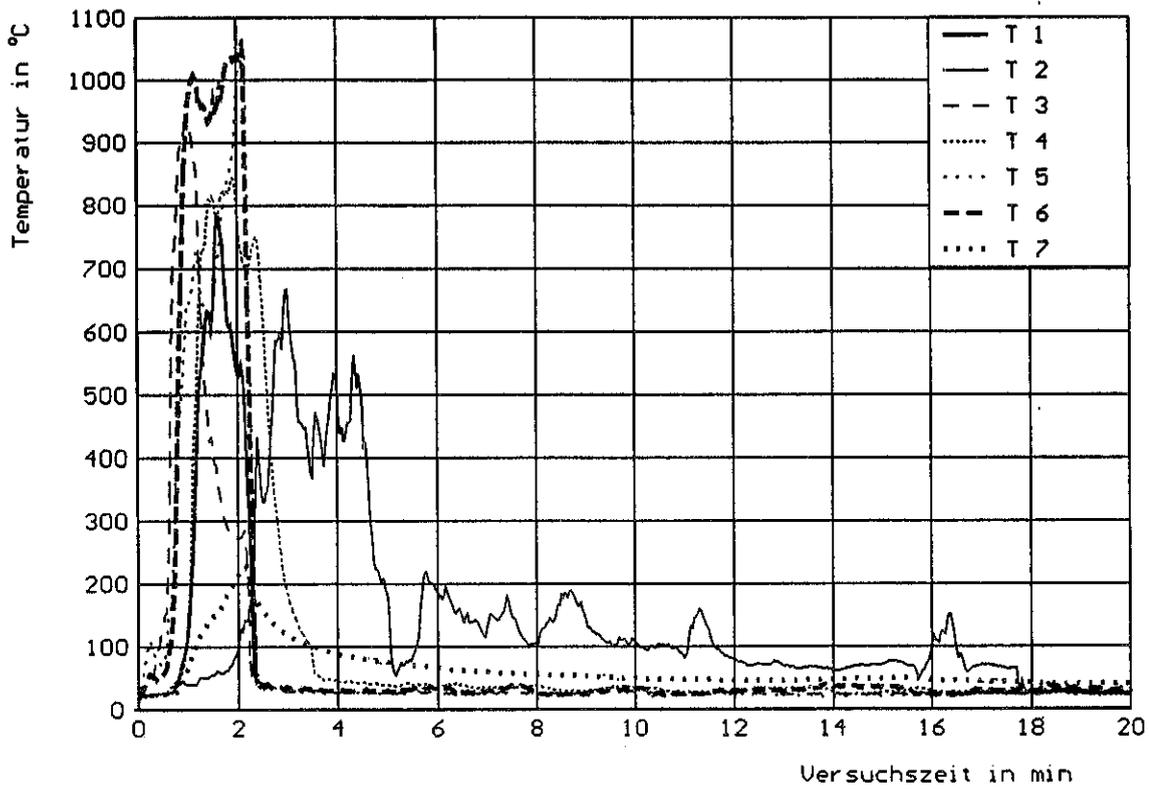


Bild 32. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7.

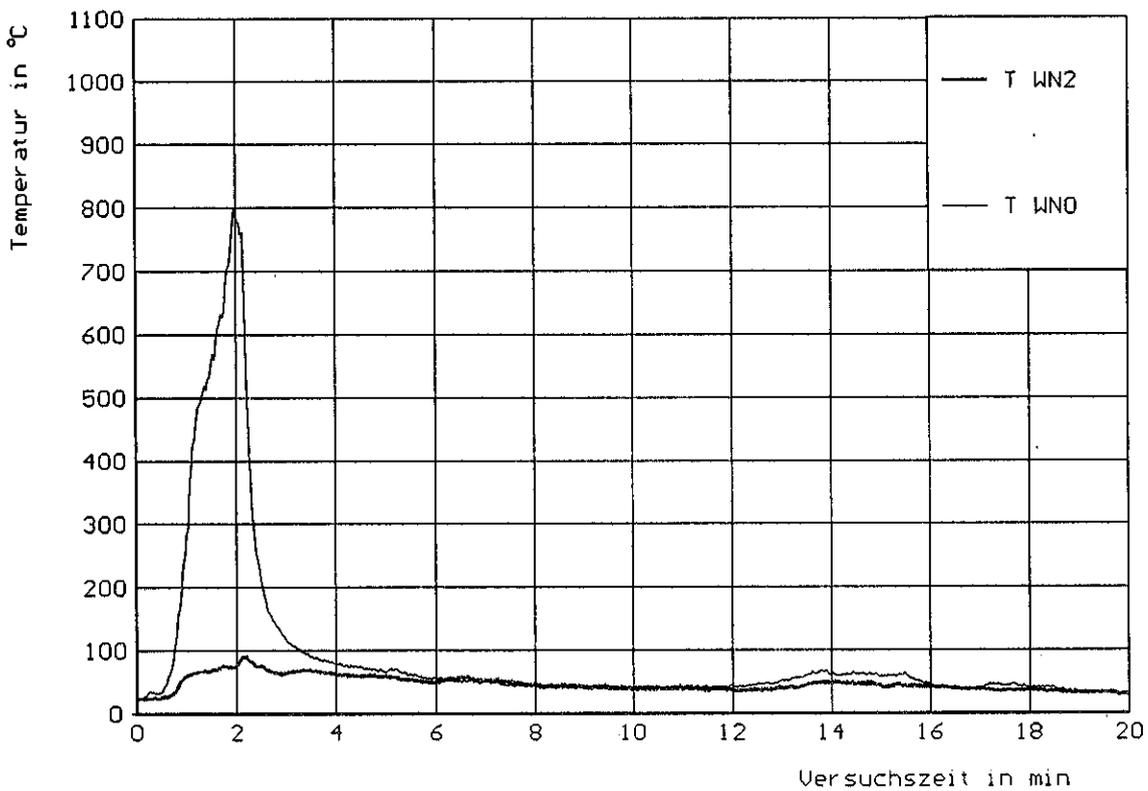


Bild 33. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TWN0 und TWN2.

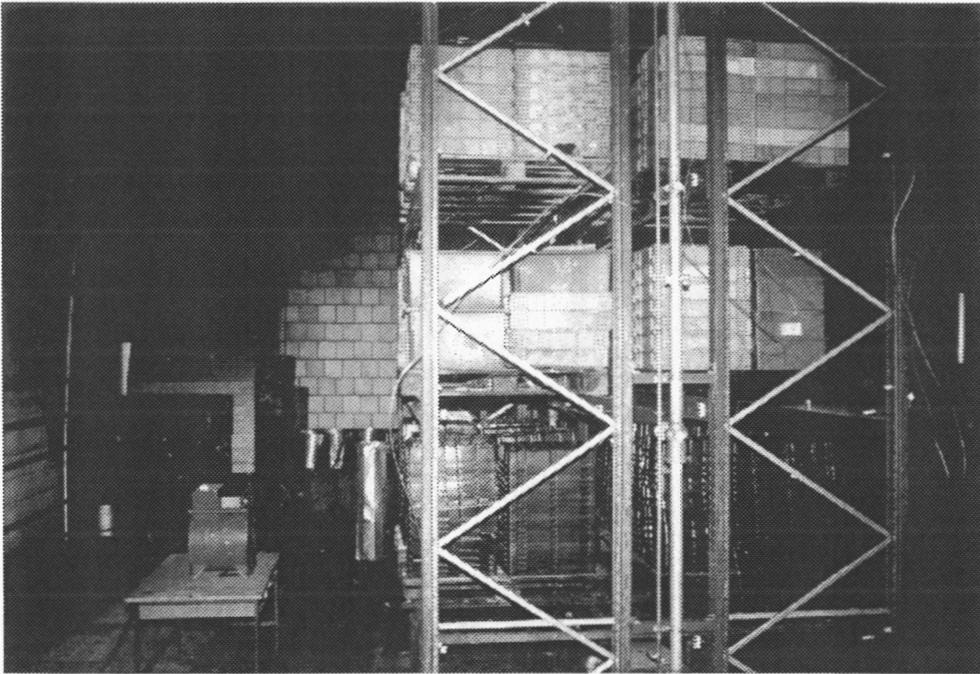


Bild 34. Versuchsaufbau. Seitenansicht der Regalebene
mit Kunststoffkästen auf Paletten.



Bild 35.
Brandentwicklung,
Versuchszeit 1 min 26 s.

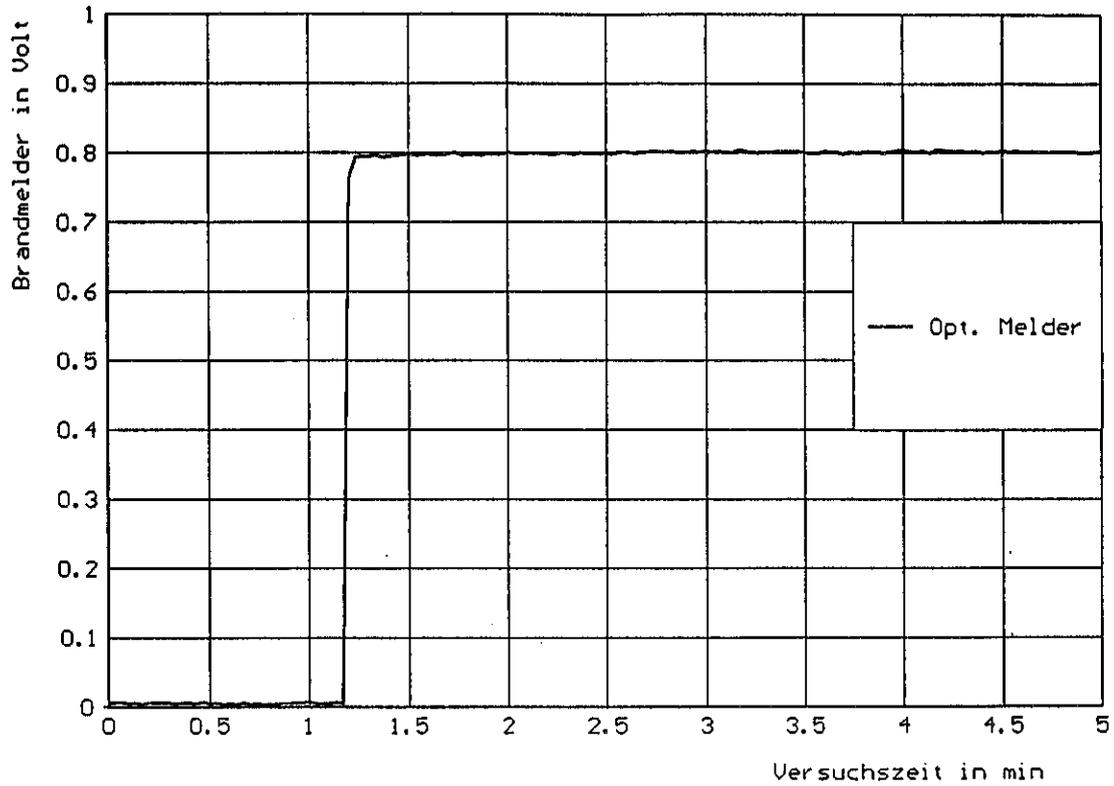


Bild 36. Auslösen des zentralen Brandmelders.

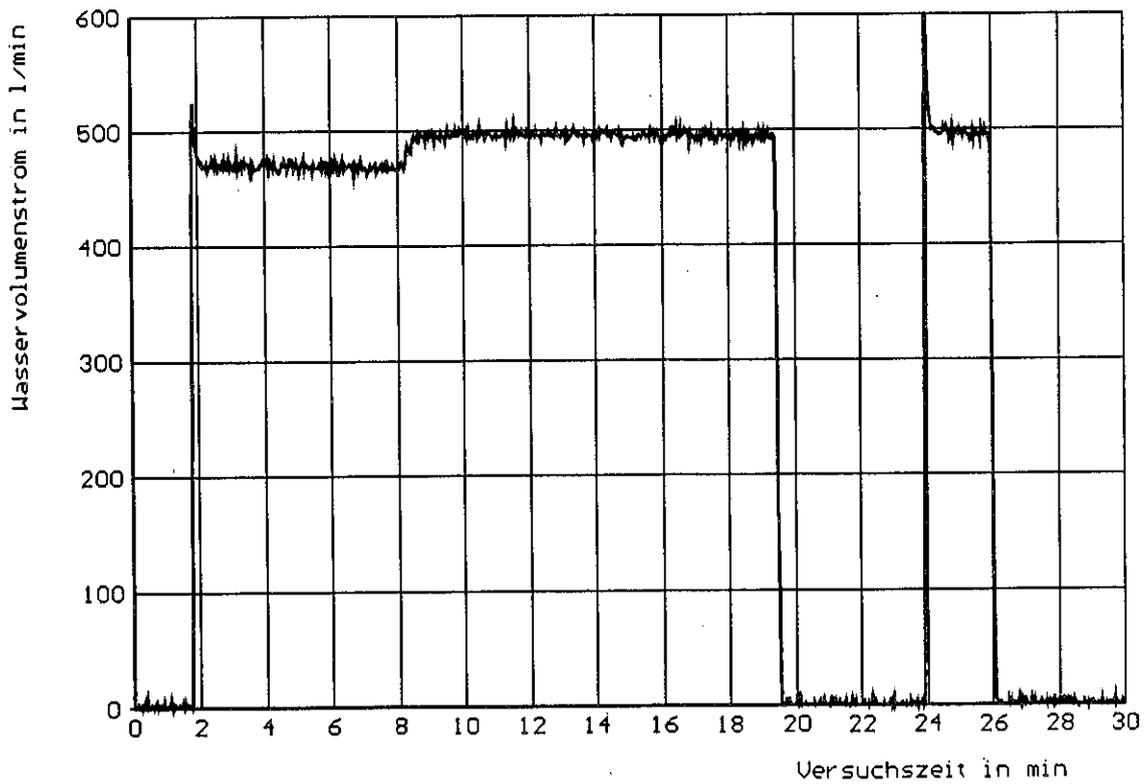


Bild 37. Wasservolumenstrom der Wassernebelanlage in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

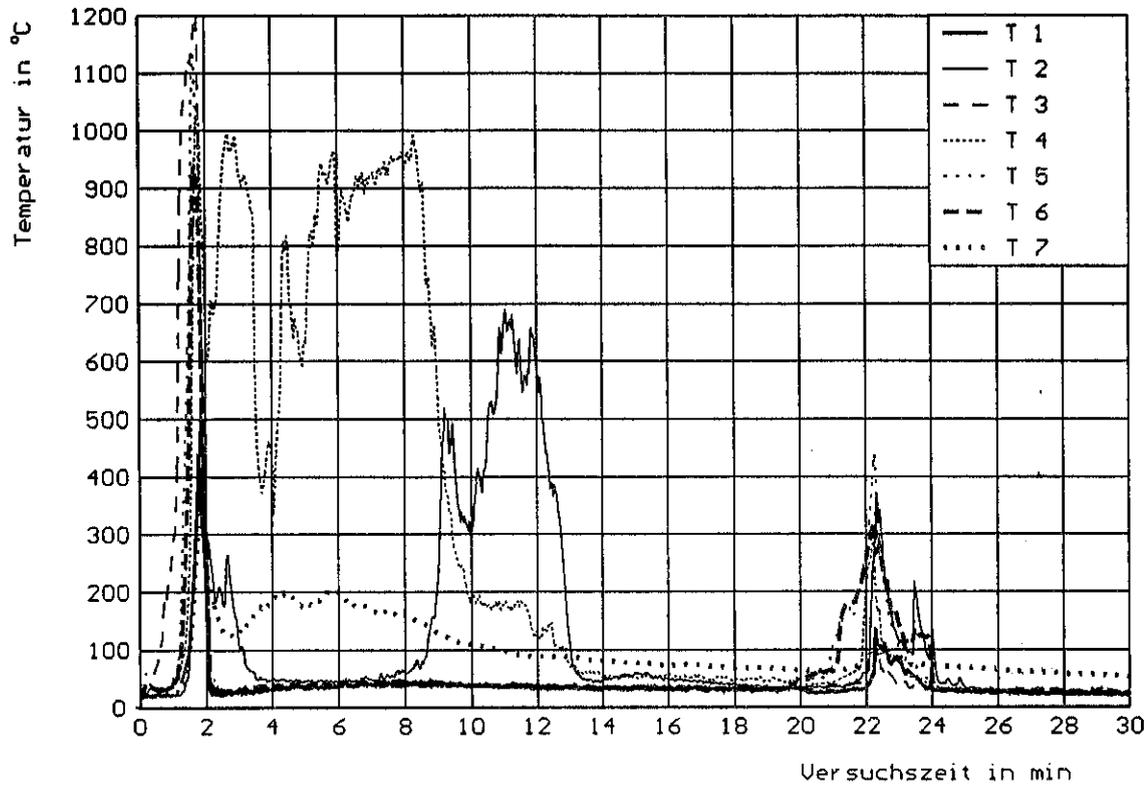


Bild 38. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T7.

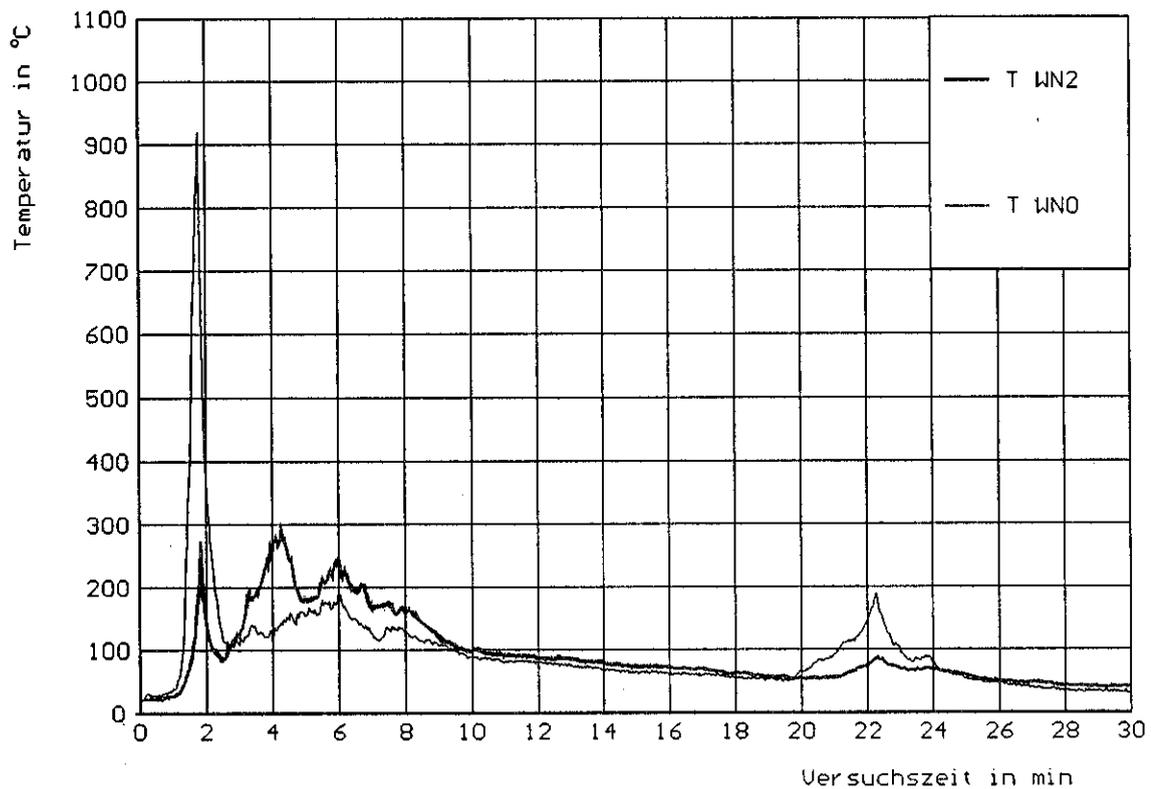


Bild 39. Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TWN0 und TWN2.

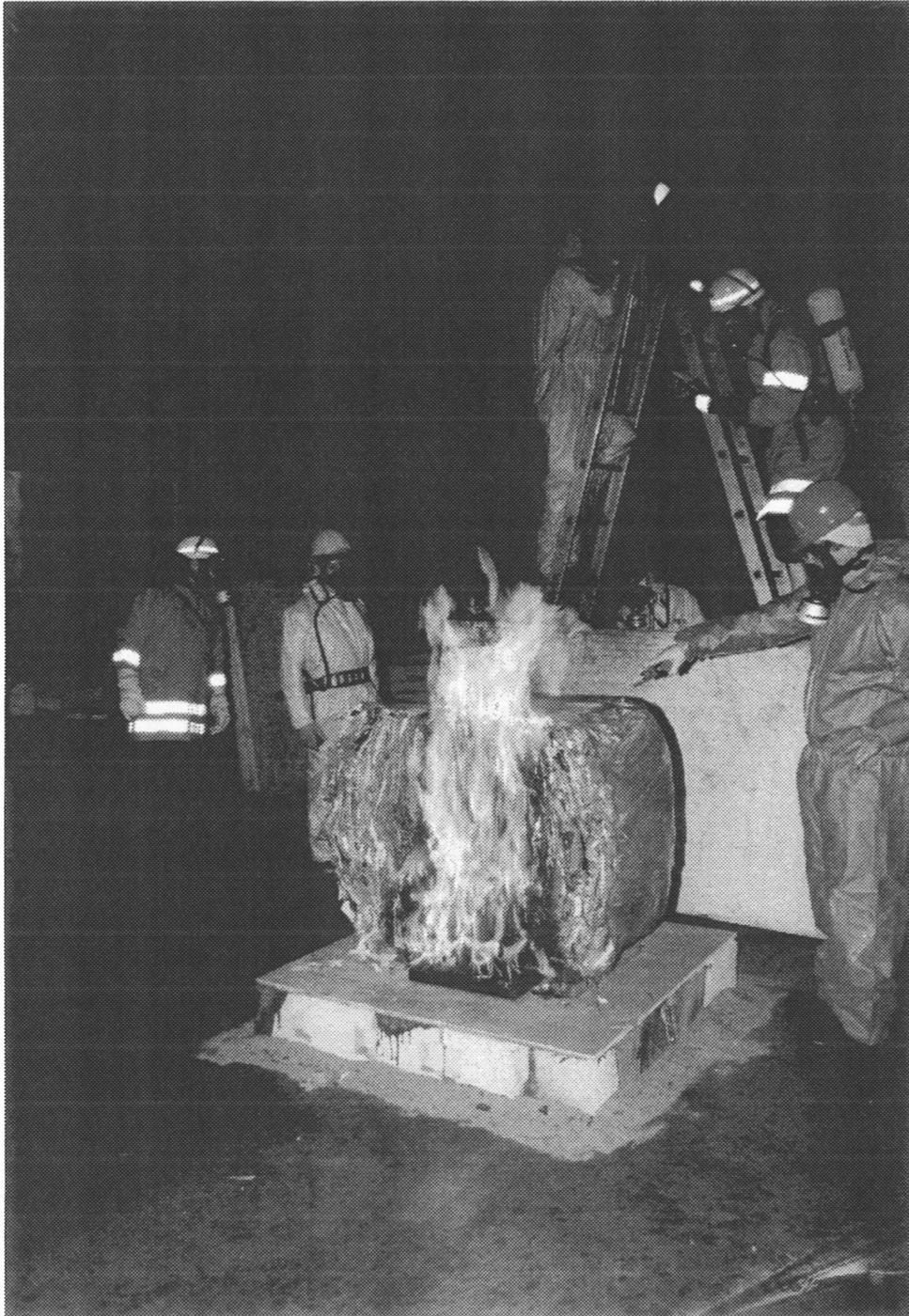


Bild 40. Brandentwicklung bei Kunststoffballen einer Mischfraktion und Probenahme in Flammennähe und in ca. 3 m Höhe.

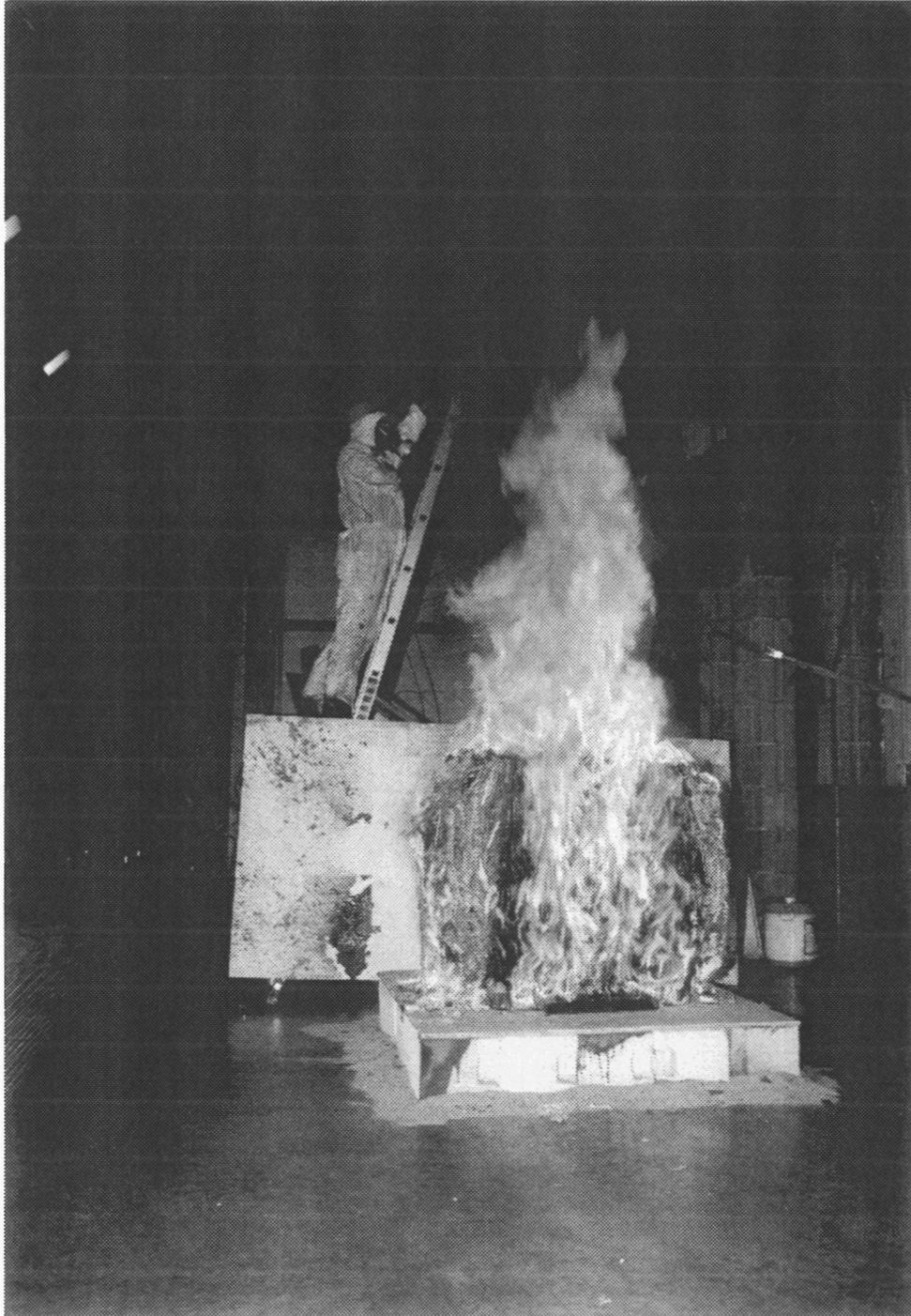


Bild 41. Fortgeschrittenes Brandstadium bei Kunststoffballen einer Mischfraktion und Probenahme in ca. 3 m Höhe.