

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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 2: Literaturlauswertung, Brand- und Löschrersuche an Kunststoffballen und an Paletten mit Pappkarton und Kunststoffkästen

104

Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten des Arbeitskreises V
der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Forschungsbericht 104

Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen -
Brandschutz durch ortsfeste Löschanlagen
unter Berücksichtigung der Brandentstehung
und Brandausbreitung über die Oberfläche und
des Eindringens in das Innere des Lagegutes
Teil 2: Literaturlauswertung, Brand- und
Löschversuche an Kunststoffballen und an
Paletten mit Pappkarton und Kunststoffkästen

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Januar 1997

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	LITERATURAUSWERTUNG	2
3.	BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	7
3.1	Versuchsanlage und Meßeinrichtung	7
3.2	Versuch 1: Brandgut Kunststoffballen - Löscheinsatz mit Sprinkleranlage	9
3.2.1	Versuchsaufbau	9
3.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	11
3.3	Versuch 2: Brandgut Kunststoffballen - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage	14
3.3.1	Versuchsaufbau	14
3.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	14
3.4	Versuch 3: Brandgut Pappkarton auf Holzpaletten - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage	17
3.4.1	Versuchsaufbau	17
3.4.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	19
3.5	Versuch 4: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten - Löscheinsatz mit Wassernebel	22
3.5.1	Versuchsaufbau	22
3.5.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	23
4.	VERGLEICH VON MEßERGEBNISSEN	26
5.	ZUSAMMENFASSUNG	29
6.	LITERATURVERZEICHNIS	31
7.	BILDER	32

1. EINLEITUNG

Durch die fortschreitende Entwicklung in der Industrie und Wirtschaft werden sehr viele Verbrauchsgüter produziert, die durch die vielfältigsten Behälter und Verpackungen geschützt werden müssen. Hierzu gehören Glas, Papier und Pappe sowie verschiedene Kunststoffarten.

Da die Entsorgung dieser Materialien in Lagerstätten immer größere Schwierigkeiten bereitet, wurden Möglichkeiten gesucht und gefunden, einen Teil dieser Stoffe wieder zu verwerten. Diese sogenannten Sekundär-Rohstoffe müssen gesammelt, sortiert und gelagert werden. Materialien wie Papier und Kunststoff werden in Ballen gepreßt und mehrlagig übereinander in Hallen oder auf Freilagerflächen bis zur weiteren Verarbeitung zwischengelagert. Da diese Stoffe brennbar sind, müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Schadensfälle in der Vergangenheit haben gezeigt, daß hier ein großer Handlungsbedarf besteht, derartige Brände unter Verwendung von wenig Löschmittel möglichst schnell bekämpfen bzw. löschen zu können.

Ein Forschungsvorhaben an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befaßt sich mit Untersuchungen über den Brandschutz von recyclingfähigen Stoffen. Durch diese Versuche ergeben sich einerseits wertvolle Erkenntnisse über die Ausbreitung eines Brandes an Sekundär-Rohstoffen und andererseits über den Einsatz von Wasser als Löschmittel mit unterschiedlich großen Tropfen.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet im ersten Abschnitt eine Auswertung der an der Forschungsstelle vorliegenden Literatur. Die nachfolgenden Abschnitte umfassen Untersuchungen über das Brandverhalten von Sekundär-Rohstoffen¹ und über den Einsatz

¹Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) bedankt sich für die freundliche Unterstützung bei: Deutsche Gesellschaft für Kunststoff-Recycling (DKR) in Köln

von Sprinklern und Löschdüsen bei als Block und in Regalen gelagerten Stoffen.

2. LITERATURAUSWERTUNG

In /1/ wird ausführlich auf das Wertstoffrecycling eingegangen. Das Hausmüllaufkommen beträgt jährlich ca. 40 Mio t. Verpackungen haben daran einen Anteil von ca. 30 %, der Rest ist reiner Hausmüll. Die Verpackungsanteile werden nach Sorten aufgegliedert in Glas, Papier (Pappe, Karton), Kunststoffe, Weißblech, Verbundstoffe und Aluminium. In einem Überblick wird über die Verpackungsverordnung, das Duale System und den grünen Punkt berichtet. Die Vermeidung und Optimierung von Verpackungen wird anhand von rückläufigen Zahlen dargestellt sowie die Techniken des Sammelns und Sortierens beschrieben. Im einzelnen wird ausführlich auf die Möglichkeiten und die Verfahren eingegangen, Stoffe wie Aluminium, Glas, Kunststoffe, Papier, Verbundstoffe und Weißblech als Abfallprodukt bzw. als Wertstoff wieder in den Verarbeitungskreislauf zu bringen, um neue Produkte herzustellen.

In /2/ wird auf die Verpackungsverordnung verwiesen, die seit 1994 in das Kreislaufwirtschaftsgesetz eingebettet ist, das die Nutzung von Stoffen aus Abfällen beinhaltet. Weiterhin werden die Sammel- und Sortiersysteme des Dualen Systems näher beschrieben. Die Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling (DKR) wird als Garantiegeberin für die Verwertung von Kunststoffverpackungen aus den Sammlungen der Dualen System Deutschland GmbH bezeichnet. Durch sie gelangen sortierte Kunststoffe an die Verwerterbetriebe. Außerdem werden ausführlich die einzelnen Recyclingverfahren beschrieben, mit deren Hilfe die Herstellung von Abfallstoffen wieder zu Rohstoffen möglich ist. Von den für 1995 geschätzten 500.000 t Kunststoffverpackungen wurden werkstofflich 315.000 t und rohstofflich 185.000 t recycelt.

In /3/ werden allgemeine Empfehlungen bezüglich der Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff aufgeführt und zunächst einige Grundlegende Begriffe wie Lagern, Lagerung, Lagermenge, Brandabschnitt u. a. erläutert. Die Maßnahmen für den vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz werden auf mehreren Seiten behandelt. So werden z. B. Zahlenwerte über die Größe von Lagerflächen, die Abstände von Grenzen, die Lagerhöhen, die Brandabschnitte, die Löschwasserversorgung und auch die zu beachtenden DIN-Vorschriften aufgeführt. Zusätzlich werden organisatorische und Umweltschutzmaßnahmen mit in die Überlegungen einbezogen.

Volkmar und Cimolino /4/ beschreiben sehr ausführlich den insgesamt 27-stündigen Einsatz der Feuerwehr bei einem Brand in einer Papierfabrik. Auf einer größeren als Außenlager genutzten Fläche waren gepreßte Altpapierballen, die bis zu 4 Lagen übereinander gestapelt waren, in Brand geraten. Starke Rauchentwicklung und nicht abfließendes Löschwasser behinderten die Einsatzkräfte.

In /5/ wird über mehrere Verfahren für die Beseitigung bzw. Verbrennung von Restmüll berichtet.

Just /6/ behandelt den Arbeitsschutz in Wertstoffsortieranlagen. Eine Gefährdung besteht sowohl durch das Einatmen der belasteten Raumluft als auch beim Sortieren der Abfallstoffe. Diesbezüglich kann z. B. durch Absaugen und tragen von Spezialhandschuhen Abhilfe geschaffen werden.

Friedl /7/ berichtet, daß die deutschen Deponien und Verbrennungsanlagen nur noch zu 60% bis 70% ausgelastet sind, was einerseits mit dem Export von Abfällen und andererseits mit dem starken Rückgang der Abfallmengen zu tun hat.

In /8/ wird über die unterschiedlichen Müllgebühren in 20 verschiedenen Städten Deutschlands berichtet und zugleich darauf hingewiesen, daß das Müllaufkommen durch dessen Vermeidung

optimal reduziert werden könnte.

Wandinger /9/ macht Angaben über ein Probenahmesystem und die Detektoroptimierung eines FID-Analysators zur Messung von Überwachungspflichtigen Abgaskomponenten wie z. B. der Gesamtkohlenwasserstoffe aus Müllverbrennungsanlagen.

Hamich und Rönich /10/ geben eine Art Bestandaufnahme und Übersicht über den Bereich Kunststoffrecycling. So werden u.a. die Duale System Deutschland GmbH (DSD), Gesellschaft für Abfallvermeidung und Sekundärrohstoffgewinnung, genannt, die im Jahre 1990 von 95 Unternehmen der Verpackungs- und Konsumgüterindustrie gegründet wurde. Die Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH (DKR) ist die Garantiegeberin für die Verwertung der gebrauchten Kunststoffverpackungen, die das Duale System sammelt und sortiert. In einer Tabelle werden Vorgaben für die Sortierung auf der Sortieranlage beschrieben. Neben der Art des Materials werden die Reinheit, die Störstoffe und die Form ausführlich erwähnt.

In /11/ wird über den Einsatz und das mögliche Recycling von unterschiedlich zusammengesetzten Kunststoffteilen berichtet. Bisher bestand für derartige Teile kaum die Möglichkeit einer Verwertung.

In /12/ wird über die Kontrolle bei der Entsorgung seitens des Dualen Systems berichtet. Als Alternative wird über die mögliche thermische Verwertung der jährlich anfallenden 700.000 t Kunststoff berichtet.

Look /13/ gibt Hinweise für die Bekämpfung und Vermeidung von Bränden in Müllbunkern. Ein offener Brand, auch Flammenbrand, ist relativ schnell löschbar, während sich ein Schwelbrand schwierig gestalten kann. Als Brandparameter werden die Verbrennungstemperatur, das Sauerstoffangebot und die Reaktionszeit genannt. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Reaktionsprodukte. Beim Müll sind u. a. die Schadstoffinhalte

und die Bildung relevanter Stoffe maßgebend, die wiederum von der Abbrandrate, der Temperatur und der Strömung abhängen. In einer Tabelle werden Hausmüllinhaltsstoffe angegeben. Als Beispiel ergeben sich bei einer Leistung von 6 MW, einer Brandfläche von 20 m² und einer Abbrandrate von 1 kg Müll/s 1800 kg Abbrandmasse, bei der Pyrolyse mit 0,5 kg Müll/s ergeben sich 900 kg. Als wichtige Vorkehrungen für den Brandschutz werden u. a. die Überwachung und Abgrenzung sowie die Art des Löschmittels und die Löschmittelversorgung genannt.

Für Gebauer /14/ wird das Recycling von vermischten und verschmutzten Kunststoffen eine zentrale Bedeutung erlangen. Dabei bietet sich wegen der ähnlichen Zusammensetzung der Stoffe die Verwertung in Raffinerien an, wobei je nach Material vorbehandelt, getrennt oder zugemischt werden muß. Um die Kunststoffabfälle in Rohstoffe umzuwandeln werden Verfahren genannt wie die Hochtemperaturpyrolyse, das thermisch-katalytische Verfahren und die Kombination von Pyrolyse und Hydrierung. In Tabellen werden Firmen aufgeführt, die Altkunststoffe mit verschiedenen Methoden verwerten. Von der Gesellschaft für Kunststoffrecycling wurden für 510.000 t/a Kapazitäten garantiert.

Gebauer und Schermaul /15/ unterscheiden das werkstoffliche Recycling und das rohstoffliche Recycling, bei dem mehrere Verfahren angewendet werden können. Im Einzelnen werden mehrere Ergebnisse des Rohstoffrecyclings am Beispiel des Visbreakings dargestellt.

Gebert, Knittel und Schollmeyer /16/ berichten über das Recycling von gefärbten Kunststoffen wie PP- oder PPT-Materialien sowie PET-Folien und PUR-Beschichtungen, die zuvor mit Extraktionsverfahren entfärbt werden. Bei diesen Vorgängen sind Drücke bis zu 500 bar und Temperaturen bis zu 130 °C notwendig.

Für Stöcker /17/ sind die Abfallpressen die Schnittstelle zwischen der innerbetrieblichen Abfallwirtschaft und der außerbe-

trieblichen Entsorgung. Mit derartigen Maschinen wird z. B. Altpapier mit der Kraft von 24 t unter Druck gesetzt und sein Volumen bis zu 95 % reduziert. Mit einer Mammutanlage mit 75 t Preßkraft und 370 m³ stündlichem Durchsatz können Ballengewichte bis zu 700 kg erreicht werden.

Fischer /18/ verweist auf den von Kritikern immer wieder aufgeführten hohen Energiebedarf beim werkstofflichen Kunststoffrecycling. Anhand eines Beispiels wird eine Firma genannt, die aus Altkunststoffen Platten herstellt, die aufgrund des Recyclings bis zu 15 % weniger Energie zur Herstellung einer neuen Platte benötigt.

Wilcke /19/ berichtet über einen Brand einer ca. 800 m² großen Lagerhalle auf einer ca. 5.000 m² Freifläche. In einer weiteren Lagerhalle standen etwa 800 t PE- und Aluminiumfolien mit Papierresten sowie bis zu 5 m hoch gestapelte Altpapierballen in Flammen. Trotz großer Schwierigkeiten bei der Bekämpfung war der Brand nach 4-stündigem Einsatz unter Kontrolle. Als Brandursache wurde Selbstentzündung infolge der großen Hitze angenommen.

Felsch /20/ gibt den Einsatz bei einem Brand in einer Papierfabrik wieder. Eine Lagerhalle mit einer Grundfläche von 100 m * 60 m mit ca. 5.000 t Alt- und Rohpapier brannte beim Eintreffen der Feuerwehr bereits in voller Ausdehnung. Die sehr schnelle Brandausbreitung wurde mit der Durchzündung von geschreddertem Papier bei der Beschickung der Förderbänder erklärt. Es entstand ein Sachschaden von ca. 8,5 Mio DM.

Wirsig /21/ teilt die Restabfallbehandlung in 2 Gruppen ein, die Langzeitrotte, d. h. ein endlagerungsfähiges Produkt und die Kurzzeitrotte mit dem Ziel der Brennstoffherzeugung mit Heizwerten bis zu 18.000 kJ/kg. Zur Konfektionierung und Zwischenlagerung wurde die Rundballenpressung gewählt. Die Ballendichte beträgt bis zu 800 kg/m³. Ein derartiges Ballenlager bedarf weder einer Abdeckung noch einer Sickerwasserbehandlung

oder einer Gaserfassung.

Schatz /22/ berichtet über Brandversuche an Recyclingmaterialien in Form von sortierten Kunststoffballen (Misch-, Hohl- bzw. Flaschen-, Folienfraktion) und unsortierten Wertstoffen in gelben Säcken, die sich in wenigen Minuten nach der Zündung zu einem Vollbrand entwickeln können. Je nach Brandausbreitung wurden Zeiten zwischen 2 min und 6 min ermittelt. Die max. erreichten Temperaturen lagen bei ca. 1100 °C.

Schatz /23/ stellt bei Brand- und Löschversuchen mit Wasser ohne Zusätze an Recyclingmaterialien (Kunststoffballen) fest, daß sowohl eine Löschanlage mit 4 offenen Sprinklern als auch eine Wassernebelanlage in der jeweils ausgeführten Form in der Lage waren, einen Brand im Entwicklungsstadium mit einer entsprechenden Löschwassermenge einzudämmen. Nachlöscharbeiten müssen in jedem Falle von der Feuerwehr durchgeführt werden.

3. BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

In der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) an der Universität Karlsruhe (TH) wurden Brand- und Löschversuche an unterschiedlichen Stoffen wie Kunststoff und Karton durchgeführt. Dabei wurde für den Löscheintritt entweder eine Sprinkleranlage oder eine Wasserfeinsprühanlage, auch als Wassernebelanlage bezeichnet, eingesetzt. Eine schematische Übersicht über den Aufbau der gesamten Versuchseinrichtungen ist jeweils in der Seitenansicht und im Grundriß in den Bildern 1 bis 3 dargestellt.

3.1 Versuchsanlage und Meßeinrichtung

In der Brandversuchshalle der FFB mit den äußeren Abmessungen 30 m * 15 m * 12 m (L*B*H) wurde das jeweilige Brandgut entweder auf einer Waageplattform oder in einem Hochregal angeordnet. Die Auflagefläche der Waage beträgt 5 m * 5 m und ihre

Tragkraft ca. 80 kN. Die Abmessungen des in der Versuchshalle aufgebauten Ausschnittes eines Hochregallagers betragen 6,14 m in der Länge, 2,54 m in der Breite und 9,5 m in der Höhe. Die Höhe der obersten Regalebene beträgt 8,25 m, der Abstand der einzelnen Ebenen zueinander 1,25 m und der der beiden hintereinander aufgestellten Regalreihen 0,44 m (Bild 3). Mit der in der Versuchshalle installierten Rauchgasreinigungsanlage können die Brandgase mit bis zu 35.000 m³/h abgesaugt werden. Der bei den in diesem Bericht beschriebenen Versuchen eingestellte Volumenstrom betrug nur ca. 7.000 m³/h, so daß evtl. Strömungen innerhalb der Versuchshalle vernachlässigt werden konnten und keinen Einfluß auf die Brandversuche hatten.

Als Brandgut wurden bei Versuch 1 und 2 jeweils gepreßte Kunststoffballen einer Hohl- bzw. Flaschenfraktion, bestehend aus den Recyclingmaterialien Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), verwendet. 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. Die handelsüblichen Ballen hatten die Abmessungen 1,2 m * 1 m * 0,8 m. Die Maße der bei den Versuchen verwendeten Ballen wichen jedoch teilweise davon ab.

Bei Versuch 3 wurden auf Euro-Holzpaletten einerseits glatte Pappkartons, die gefaltet aufeinanderlagen und mit Bändern zusammengehalten wurden und andererseits gefaltete Wellpappkartons, die sich jeweils in einem Umkarton befanden, verwendet.

Bei Versuch 4 wurden auf Euro-Holzpaletten gelagerte einwandige Kunststoffkästen aus Polypropylen (PP) verwendet, die bereits in der Industrie eine weite Verbreitung als Lagerbehälter gefunden haben.

Als Löschmittel wurde bei allen 4 Versuchen Wasser ohne Zusät-

ze verwendet, wobei der jeweilige Löscheinatz bei einem Versuch mit einer Sprinkleranlage und bei 3 Versuchen mit einer Wassernebelanlage durchgeführt wurde.

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 direkt zu den Sprinklern S1 bis S4 oder über einen vorgeschaltetem Filter in die Sprührohreinheiten SR1 bis SR3 zu den Sprühköpfen SK mit den Düsen. Das Auslösen selbst erfolgte bei diesen Versuchen durch eine manuelle Betätigung. Die Sprührohreinheit SR3 rechts außen (Bild 3) wurde bei diesen Versuchen nicht ausgelöst, da in diesem Regalbereich keine Palettenplätze belegt waren.

Ein magnetisch induktiver Durchflußmesser zur Messung des Löschwasservolumenstromes sowie ein Manometer zur Messung des Pumpendruckes wurden unmittelbar hinter der Kreiselpumpe installiert. Zusätzlich wurde mit Hilfe eines piezoresistiven Druckmeßumformers beim 3. und 4. Versuch am Sprührohr SR2 im obersten horizontalen Sprühkopf zu Kontrollzwecken der Druck gemessen.

3.2 Versuch 1: Brandgut Kunststoffballen - Löscheinatz mit Sprinkleranlage

3.2.1 Versuchsaufbau

Bei Versuch 1 wurde das Brandgut auf einer Waageplattform angeordnet. Bild 1 zeigt die Seitenansicht und den Grundriß des Versuchsaufbaus. In jeder der 3 Ebenen befanden sich jeweils 4 Kunststoffballen einer Hohl- bzw. Flaschenfraktion, die dicht aneinander gestellt wurden. Um ein Abrutschen oder Umfallen der Kunststoffballen während eines Versuches zu verhindern, wurden sie mit einem aus Vierkantrohren bestehenden Gestell in ihrer Lage gehalten (Bild 4). Das Gesamtgewicht des Brandgutes aus 12 Ballen dieser Flaschenfraktion betrug ca. 3,3 t. Durch

die Anordnung auf einer Waage konnte während des Versuches ablaufes die jeweilige Masse bestimmt werden.

Die Zündung erfolgte an der in Bild 1 gekennzeichneten Stelle mit 1 l n-Heptan in einer Zündwanne mit den Abmessungen 500 mm * 300 mm, die zentral 100 mm unterhalb des Brandgutes an der Waageplattform befestigt war.

Der Löscheinsatz erfolgte mit 4 offenen Sprinklern (S1 bis S4) die in einem Abstand von 6,8 m über der Waageplattform installiert wurden. Über den Sprinklern befand sich eine Dachkonstruktion mit den Abmessungen 5 m * 5 m mit seitlich herabhängenden Rauchschrzen von 0,4 m (Bild 1). In zentraler Position an der Stelle S0 sowie an der Stelle S02 befand sich jeweils in Höhe der offenen Sprinkler ein Glasfaßsprinkler ohne Wasseranschluß mit einer Auslösetemperatur von 68 °C und einem RTI-Wert von 50 bis 80. Nach dem Auslösen dieser beiden sogenannten Indikatorsprinkler wurde nach einer Zeit von weiteren 30 s die Sprinkleranlage manuell in Betrieb genommen. Die eingestellte Wasserbeaufschlagung betrug 12,5 mm/min.

Unmittelbar neben dem zentralen Indikatorsprinkler S0 wurden in der gleichen Höhe ein opt. Melder und ein Ionisationsmelder angeordnet (Bild 1), deren Ansprechverhalten aufgezeichnet wurde. Nach dem Auslösen wurden die Brandmelder entfernt, damit sie durch den Brand nicht zerstört werden konnten.

Weiterhin wurden bei diesem Versuch an 11 Meßstellen die Temperaturen am Brandgut und darüber (T1 bis T6), an den Indikatorsprinklern (TS01=TS0 und TS02=TS2) sowie an den Sprinklern (TS1 bis TS4) gemessen, um die Brandentwicklung besser beurteilen zu können. Die genaue Lage der Meßstellen ist ebenfalls in Bild 1 gekennzeichnet.

3.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Brandentwicklung und der Brandverlauf werden im folgenden anhand von direkten Beobachtungen und von Videoaufzeichnungen kurz beschrieben. Die Bilder 4 bis 11 zeigen für den Versuch 1 das verwendete Material und geben einen Eindruck des Brandverlaufes und des Löscheinsatzes wieder.

Versuch 1: Brandgut Kunststoffballen (Flaschenfraktion) Löscheinsatz mit 4 offenen Sprinklern

Zeit	
0:00	Zündung, schwache Rauchsäule
0:16	Opt. Rauchmelder ausgelöst
1:10	Flamme bis zur Oberkante des Stapels
1:12	Ion. Melder ausgelöst
1:40	Flamme ca. 1 m über Oberkante des Stapels
2:00	Flamme ca. 2 m über Oberkante des Stapels
2:15	Auslösen des 1. Indikatorsprinklers S0
3:00	Flamme ca. 3 m über Oberkante des Stapels Schwache Rauchentwicklung
3:40	Auslösen des 2. Indikatorsprinklers S02
4:10	Manuelles Einschalten der Löschanlage mit 4 offenen Sprinklern (12,5 mm/min). Rauchentwicklung/Wasserdampfanteil nimmt zu. Brennend abgetropftes Material auf dem Boden wird mit dem Strahlrohr abgelöscht
5:00	Flamme noch ca. 2 m hoch über dem Stapel
6:00	Flamme reißt teilweise ab
6:14	Erhöhung der Wasserbeaufschlagung auf 17,5 mm/min
6:27	Keine Flammen mehr sichtbar
6:44	Erneut Flammen zentral über dem Stapel
7:20	Keine Sicht mehr
19:16	Sprinkler abgeschaltet
22:00	Kleine Flammen im Stapel zu erkennen
23:00	Feuerwehr löscht mit Strahlrohr verdeckte Bereiche

Bild 4 zeigt die Front- und die rechte Seite der 12 Kunststoffballen der Flaschenfraktion mit der Halterung aus Vier-

kantröhr vor Versuchsbeginn. Auf Bild 5 ist die Brandentwicklung nach einer Versuchszeit von 3 min zu erkennen. Bild 6 zeigt die Flammenentwicklung 10 s vor dem Auslösen des zentral angeordneten Indikatorsprinklers S01.

Nach einer Versuchszeit von 4 min 30 s (Bild 7) sowie von 5 min 35 s (Bild 8) konnte kein wesentlicher Löscherfolg festgestellt werden, so daß nach einer Versuchszeit von 6 min 14 s die Wasserbeaufschlagung von 12,5 mm/min auf 17,5 mm/min erhöht wurde, was zu einem deutlichen Rückgang des Brandes führte (Bild 9). Unterhalb des Brandgutes sind die Flammen des brennend abgetropften Materials zu sehen, das mehrfach mit dem Strahlrohr abgelöscht wurde, damit sie die im Realfall auf dem Boden stehenden Ballen nicht erneut von der Unterseite her großflächig zünden.

Die im Stapel befindlichen Flammen konnten durch die Sprinkleranlage nicht völlig gelöscht werden, so daß die Feuerwehr Nachlöscharbeiten vornehmen mußte. Die Bilder 10 und 11 zeigen die Kunststoffballen nach dem Versuch. Die Schwärzung auf der rechten Außenseite des Stapels in Bild 10 läßt den auf die Außenseite erfolgten Durchbrand erkennen. Die anderen seitlichen Außenflächen blieben unbeschädigt.

Bild 12 zeigt das Ansprechen der zentral installierten Brandmelder nach einer Versuchszeit von 16 s für den opt. Melder und 1 min 12 s für den Ionisationsmelder. Das relativ späte Auslösen dieses Brandmelders ist wahrscheinlich auf eine Verschmutzung zurückzuführen.

Bild 13 zeigt die während des Versuchsablaufes auf der Waageplattform vorhandene Masse in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Es ist daraus zu erkennen, daß bis zum Löscheinsatz etwa 10 kg des Kunststoffmaterials verbrannten.

Mit Beginn der manuell gesteuerten Wasserzufuhr der Sprinkleranlage nach 4 min 10 s stieg die Masse bis zum Abschalten des

Löschwassers an. Die Abnahme der Masse durch die noch in der Stapelmitte züngelnden kleinen Flammen war gering und ist anhand der Kurve nicht ersichtlich. Nach dem Abschalten überlagerten sich zusätzlich Änderungen durch das abtropfende Löschwasser, durch das Betreten und Entlasten der Waage durch Feuerwehrleute und durch erneutes Löschen mit dem Strahlrohr.

Bild 14 zeigt den bei Löschanfang für alle 4 Sprinkler eingestellten Wasservolumenstrom von 460 l/min. Wegen des in der Stapelmitte ungestörten Weiterbrennens trotz Sprinklerung, insbesondere in der Stapelmitte, wurde ca. 2 min später der Wasservolumenstrom auf 630 l/min erhöht. Nach einer Versuchszeit von 19 min 16 s wurde die Wasserzufuhr abgestellt.

Die Bilder 15 und 16 zeigen die Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit sowohl an den Meßstellen neben den Sprinklern (TS0 bis TS4) als auch an den Meßstellen am Stapel und darüber (T1 bis T6). Nach der Zündung stiegen die Temperaturen T5 und T6 in zentraler Position steil an und erreichten Werte bis zu 900 °C. Durch die aufsteigenden heißen Brandgase stiegen die Temperaturen unterhalb des Daches an der Meßstelle TS0 auf ca. 400 °C und an den Meßstellen TS1 bis TS4 auf ca. 150 °C an.

Der Löscheintritt erfolgte 30 s nach dem Auslösen des 2. Indicatorsprinklers. Dadurch fielen die Temperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4 sowie T6 steil ab. An der zentralen Meßstelle T5 im Stapel ist zu erkennen, daß es in diesem Bereich weiterbrannte. Nach einer Versuchszeit von ca. 12 min stieg die Temperatur an der Meßstelle T3 steil an und fiel erst nach mehr als 19 min beim Abschalten der Sprinkleranlage wieder ab. In diesem Zeitraum schlugen die Flammen an der rechten Außenseite des Stapels heraus (s. auch Bild 10). Die Feuerwehr löschte anschließend die kleinen im Stapelinneren auftretenden Flammen ab.

3.3 Versuch 2: Brandgut Kunststoffballen - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

3.3.1 Versuchsaufbau

Bei Versuch 2 wurde das Brandgut in einem für diesen Versuch modifizierten Hochregal, bei dem eine Wassernebellöschanlage installiert war, angeordnet. Bild 2 zeigt eine Seitenansicht und einen Grundriß des Versuchsaufbaus. Wie bei Versuch 1 wurden 12 Ballen einer Flaschenfraktion in etwa der gleichen Höhe über dem Boden in dem bestehenden Hochregal angeordnet. Die Zündung erfolgte wie bei Versuch 1 mit 1 l n-Heptan in einer Zündwanne unterhalb des Stapels.

Der Löscheinsatz erfolgte mit einer Wassernebelanlage mit 2 Sprührohreinheiten (SR1 und SR2) mit jeweils 4 Sprühköpfen (SK) mit den jeweiligen Düsen, deren genaue Lage in Bild 2 zu erkennen ist. In zentraler Position sowie an einer weiteren Stelle befanden sich, wie in Bild 2 zu erkennen ist, in einer Höhe von 7 m über dem Boden je ein Indikatorsprinkler (SWN0, SWN2). Über beiden wurde ein kleineres Dachteil von jeweils ca. 1 m² angebracht, um den aufsteigenden heißen Brandrauch auffangen zu können. Der Wasservolumenstrom der Anlage wurde wie bei Versuch 1 auf 460 l/min eingestellt.

Bei diesem Versuch wurden an 9 Meßstellen die Temperaturen am Brandgut und an den Indikatorsprinklern (T1 bis T7, TWN0, TWN2) gemessen. Die genaue Lage der Meßstellen ist in Bild 2 ersichtlich.

3.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Wie bei Versuch 1 wurde auch bei Versuch 2 die Brandentwicklung anhand von direkten Beobachtungen und Videoaufzeichnungen kurz beschrieben. Die Bilder 17 bis 25 geben einen Eindruck des Brandverlaufes wieder.

Versuch 2: Brandgut Kunststoffballen (Flaschenfraktion)
Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

Zeit

0:00	Zündung, schwache Rauchsäule
0:55	Flammen über der Oberkante des Stapels
1:20	Auslösen des 1. Indikatorsprinklers SWNO
1:30	Flammen reißen teilweise ab, Rauchsäule stärker
1:50	Keine Flammen sichtbar, starke Rauchbildung
2:00	Flammen im Stapel
2:20	Flammen seitlich am Stapel, abtropfendes Material
2:50	Flammen an der Frontseite
3:16	Flammen zentral über dem Stapel, Höhe ca. 3 m
4:20	Auslösen des 2. Indikatorsprinklers SWN2
4:32	Manuelles Einschalten der Wassernebelanlage (460 l/min), starke Rauchentwicklung und Wasserdampfbildung, Flammen an der Stapelfrontseite
5:48	Keine Sicht vorhanden
6:10	Bei minimaler Sicht teilweise Flammen an der Frontseite erkennbar
10:32	Erhöhung des Wasservolumenstromes auf 500 l/min
23:30	Wassernebelanlage abgeschaltet
27:00	Flammen in der Stapelmitte
28:06	Feuerwehr löscht mit Strahlrohr

Bild 17 zeigt die Frontseite des Stapels mit den 12 Kunststoffballen der Flaschenfraktion im Regal. Bild 18 gibt die Brandentwicklung nach einer Versuchszeit von 3 min 6 s wieder. Der 1. Indikatorsprinkler hatte zu diesem Zeitpunkt bereits ausgelöst. Auf dem Hallenboden ist das brennende abgetropfte Material zu erkennen, das wie bei Versuch 1 mehrmals mit dem Strahlrohr abgelöscht wurde. Die Flammen breiteten sich jedoch im Gegensatz zum Versuch 1 im Stapel seitlich aus, was sicherlich auf die individuelle Lagerung (Spaltbreiten) zurückzuführen ist.

Bild 19 zeigt die Flammenentwicklung nach einer Versuchszeit von 3 min 23 s. Auf Bild 20 sind nach einer Versuchszeit von

3 min 54 s auch Flammen zu erkennen, die sich im Spalt nach rechts ausbreiteten. Der 2. Indikatorsprinkler an der Stelle SWN2 löste durch die ungünstigere Anordnung eines kleinen Dachteiles (s. Bild 2) erst nach 4 min 20 s aus. Die Wassernebelanlage wurde deshalb bereits 12 s später eingeschaltet, um den Brand nicht wesentlich größer werden zu lassen als bei Versuch 1. Bild 21 wurde beim Auslösen der Wassernebelanlage nach 4 min 32 s aufgenommen.

Bild 22 zeigt die Rauch- und Wasserdampfbildung 10 s nach Löschbeginn nach einer Versuchszeit von 4 min 42 s. Da nach mehreren Minuten trotz schlechter Sicht noch Flammen erkennbar waren, wurde der Wasservolumenstrom nach einer Löschzeit von 6 min auf 500 l/min erhöht, was zu einem merklichen Rückgang des Brandes führte. Als keine Flammen mehr zu erkennen waren, wurde die Wassernebelanlage abgeschaltet.

Die in den Spalten des Stapels befindlichen Flammen konnten auch durch die Wassernebelanlage nicht vollständig gelöscht werden, so daß die Feuerwehr nach einer Versuchszeit von mehr als 28 min mit einem Strahlrohr Nachlöscharbeiten vornahm.

Die Bilder 23 bis 25 zeigen die Kunststoffballen nach dem Versuch. Auf Bild 23 ist deutlich der auf der Frontseite oben rechts angebrannte Ballen zu erkennen. Bild 24 zeigt die Rückseite mit der angebrannten Stapelmitte (Spalt). Bild 25 zeigt die angebrannten Innenseiten des Stapels.

Auf Bild 26 ist der bei Versuchsbeginn eingestellte Wasservolumenstrom von 460 l/min zu erkennen, der nach einer Löschzeit von 6 min auf 500 l/min erhöht wurde. Das Abschalten der Anlage erfolgte nach 23 min 30 s.

Die Bilder 27 und 28 zeigen die jeweilige Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen der Indikatorsprinkler (TWN0 und TWN2) sowie an den Meßstellen am Stapel und darüber (T1 bis T7). Nach der Zündung stiegen die zentra-

len Temperaturen T5, T6 und TWN0 steil an und fielen zeitweise wieder ab, als sich die Flammen im Stapel quer ausbreiteten, wobei an der Stelle T3 die Temperatur zunahm. Dabei wurden anschließend Werte bis ca. 900 °C erreicht.

Bedingt durch den Löscheinsatz mit Wassernebel fielen die Temperaturen an den Stellen T3, T6, T7, TWN0 und TWN2 ab. Die Temperaturen an den Meßstellen T4 auf der Frontseite und T5 im Stapel wurden durch den Wassernebel zunächst nicht abgekühlt und fielen erst später ab. Die Meßstellen T1, T2 und T4 erwärmten sich durch den Brand nur geringfügig. Nach dem Abschalten der Löschanlage löschte die Feuerwehr noch kleine im Stapelinneren auftretende Flammen ab.

3.4 Versuch 3: Brandgut Pappkartons auf Holzpaletten Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

3.4.1 Versuchsaufbau

Bei Versuch 3 wurde das Brandgut auf Euro-Holzpaletten mit den Abmessungen 1200 mm * 800 mm * 145 mm (L*B*H) in den Regalebenen des Hochregals angeordnet. Bild 3 zeigt den schematischen Versuchsaufbau mit den einzelnen Abmessungen in der Seitenansicht und im Grundriß, die Position der belegten Palettenplätze und die Anordnung der Meßstellen.

Im Hochregal wurden 3 vertikale Sprührohreinheiten (SR1, SR2, SR3) installiert, an denen, beginnend in einer Höhe von 0,75 m jeweils im Abstand von 1,25 m Höhe ein nach links und nach rechts gerichteter Sprühkopf mit jeweils 3 Wassernebeldüsen angebracht wurde. Die Sprührohreinheiten befanden sich zwischen den beiden Regalreihen sowohl links und rechts außen als auch in der Mitte des Hochregals. Am oberen Ende wurde jeweils ein vertikal sprühender Kopf zur Kühlung der Decke installiert. Die Sprührohreinheit SR3 rechts außen wurde bei diesen Versuchen nicht ausgelöst, da in diesem Regalbereich keine Palettenplätze belegt waren.

Bild 29 zeigt den Beladungsplan des Regales A und Bild 30 den Beladungsplan des Regales B. In jeder Ebene eines Regales befanden sich 4 Paletten (s. Bild 3). Da die hintere obere Ebene des Regales B nicht belegt wurde, ergaben sich insgesamt 52 belegte Palettenplätze.

Auf Bild 31 sind 6 der insgesamt 7 belegten Ebenen auf der Frontseite (Regal A) des mit dem Brandgut Pappkarton auf Holzpaletten beladenen Hochregales dargestellt.

Die Zündung erfolgte mit 1 l n-Heptan in einer Zündwanne mit den Abmessungen 700 mm * 200 mm, die in einer Höhe von 75 cm zwischen den Paletten der unteren Regalebene an der in Bild 3 gekennzeichneten Stelle angeordnet war.

Im Hochregal wurde mit Thermoelementen an 24 Meßstellen (T1 bis T24 an den Stellen A bis E, Bild 3) die jeweils herrschende Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit in Höhe der Unterkante des jeweiligen Querträgers, mit Ausnahme von T6 und T16, die am Absaugrohr unterhalb der Decke angeordnet waren, ermittelt. Die Lage der einzelnen Meßstellen ist ebenfalls aus Bild 3 zu entnehmen.

Zur Bewertung der Brandausbreitung und der Wärmefreisetzung wurden als Indikatorsprinkler an den in Bild 3 eingezeichneten Stellen oberhalb der 4. Ebene die Sprinkler S01, S02 und S03 jeweils ohne Wasseranschluß angeordnet. Bei diesen Sprinklern handelte es sich um handelsübliche schnell ansprechende Glasfaßsprinkler mit einem RTI-Wert zwischen 50 und 80.

Der Löscheinsatz mit den Wassernebeldüsen sollte erfolgen, wenn 2 von 3 Glasfäßchen der Indikatorsprinkler S01 bis S03 geplatzt waren. Bei einer zu diesem Zeitpunkt nicht ausreichenden Flammenhöhe und -ausbreitung sollte der Löschbeginn ca. 30 s später erfolgen, um somit auf jeden Fall eine größere Brandintensität zu erreichen als dies normalerweise beim Auslösen der Wassernebelanlage der Fall gewesen wäre.

3.4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Bei Versuch 3 wurde die Brandentwicklung ebenfalls anhand von direkten Beobachtungen und Videoaufzeichnungen zusammengestellt. Die Bilder 32 bis 36 zeigen den Brandverlauf bei der Lagerung von Pappkartons auf Paletten im Hochregal.

Versuch 3: Brandgut Pappkarton auf Holzpaletten im Hochregal Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

Zeit	
0:00	Zündung
0:10	Flammen bis zur Unterseite der 2. Regalebene (2 m)
0:25	Flammen bis zur 3. Regalebene (3,25 m)
0:35	Flammen bis zur 4. Regalebene (4,5 m)
0:40	Flammen bis zur 5. Regalebene (5,75 m)
0:45	Flammen in Hochregalmitte (Kaminwirkung)
0:48	Indikatorsprinkler S01 platzt
0:52	Flammen an der Frontseite
0:55	Flammen bis zur 6. Regalebene (7 m)
0:56	Indikatorsprinkler S02 platzt
0:58	Indikatorsprinkler S03 platzt
1:00	Frontseite brennt bei mehreren Paletten
1:18	Manuelles Einschalten der Wassernebelanlage (1070 l/min), nachdem die Flammen die Oberkante des Hochregals erreichten
1:27	Keine Flammen mehr in Hochregalmitte Frontseite brennt, Flammen unter den Paletten
1:42	Flammen werden kleiner
2:12	Kleine Flammen, Rauchbildung nimmt zu, Sicht nimmt ab
3:27	Keine Sicht mehr
6:26	Wassernebelanlage abgeschaltet als keine Flammen mehr zu erkennen waren
7:36	Wieder kleine Flammen erkennbar
8:41	Feuerwehr löscht kurzzeitig mit Strahlrohr
11:12	Qualm wird weniger, keine Flammen zu erkennen
15:42	Rauchentwicklung in der 4. Regalebene

16:15 Feuerwehr löscht mehrfach kurzzeitig Restflammen mit dem Strahlrohr ab

Bei Versuch 3 (Brandgut Pappkarton) erreichten die Flammenspitzen nach einer Versuchszeit von 30 s eine Höhe über dem Boden von ca. 4 m. Bild 32 zeigt den Brandverlauf nach einer Versuchszeit von 27 s. Zu diesem Zeitpunkt nahm die Rauchentwicklung stark zu. Die Glasfäßchen der Indikatorsprinkler platzten nach einer Versuchszeit von 47 s (S1), von 56 s (S2) und von 58 s (S3). Nach einer Versuchszeit von 1 min waren die Flammen bis auf eine Höhe von über 7 m angestiegen.

Da sich die Flammen sehr schnell ausbreiteten, konnten vom Platzen der Glasfäßchen bis zum Löscheinsatz aus Sicherheitsgründen keine weiteren 30 s abgewartet werden. Die Wasservernebelungsanlage wurde deshalb nach 1 min 18 s eingeschaltet. Die Flammen hatten zu diesem Zeitpunkt bereits die Oberkante des Hochregals erreicht. Die Temperatur an der Decke der Versuchshalle war kurzzeitig auf einen Wert von 500 °C angestiegen, so daß der Löscheinsatz erfolgen mußte, um einen Schaden an der Dachkonstruktion der Versuchshalle zu verhindern. Die Bilder 33 und 34 geben einen Eindruck des Brandes nach 42 s und nach 54 s wieder. Die Bilder 35 und 36 zeigen den Brandverlauf nach einer Versuchszeit von ca. 2 min in den Regalebene 1 bis 3 (Bild 36) und in den oberen Regalebene 3 bis 7 (Bild 35).

Als keine Flammen mehr sichtbar waren, wurde nach einer Löschdauer von 5 min 8 s die Löschanlage abgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt war die Versuchshalle durch ein Gemisch von Brandrauch und Wassernebel gefüllt und die Sicht stark behindert. Durch den langsam abziehenden Rauch wurden kleine Brandnester in den Kartons sichtbar, die nach einer Versuchszeit von 16 min 15 s durch die Feuerwehr mit einem Strahlrohr abgelöscht wurden.

Nach dem Abziehen des gesamten Qualmes war zu erkennen, daß

der sich zunächst stark entwickelnde Brand ab dem Zeitpunkt des Betriebens der Wassernebelanlage auf bereits brennende Palettenstapel beschränkte. Die weitere Ausbreitung wurde behindert und der Brand bis auf kleine Brandstellen eingedämmt. Die Feuerwehr mußte lediglich Nachlöscharbeiten an jeweils einer Palette in der 1., 3. und 4. Regalebene vornehmen.

Die bei diesem Versuch eingesetzte Wassermenge betrug bei einem Volumenstrom von 1070 l/min aus 2 Sprührohreinheiten 5401 l. Der Druck im obersten horizontalen Sprühkopf lag bei ca. 3,9 bar.

Bild 37 zeigt die Temperaturen an der Position A (Bild 3) an den Meßstellen T1 bis T6 in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Die Temperatur T1 unterhalb der Zündwanne beträgt weniger als 50 °C. Die Temperatur T2 oberhalb der Zündwanne steigt am steilsten an und erreicht mit ca. 950 °C den höchsten Wert. Die Temperaturen T3 bzw. T4 steigen mit jeweils 10 s Verzögerung an und erreichen Maximalwerte von ca. 880 °C bzw. 730 °C. Die Temperaturen T5 bzw. T6 steigen ca. 1 min später auf ihre Maximalwerte von über 500 °C an. Der Temperaturabfall nach dem Löscheintritt zeigt, daß sich der Brand nicht weiter entwickelte, sondern vielmehr innerhalb von ca. 90 s eingedämmt wurde.

Bild 38 zeigt an der Position B (Bild 3) die Temperaturen an den Meßstellen T7 bis T11. Der steile Anstieg beginnt nach einer Versuchszeit von ca. 30 s. Die max. Temperaturen wurden je nach Höhe und Lage der Meßstellen zwischen 660 °C und 900 °C gemessen. Der Temperaturabfall an diesen Meßstellen bei Löscheintritt erfolgte durch die direktere Beaufschlagung des Sprühnebels schneller als an denen der Position A.

Bild 39 zeigt die an der Position C (Bild 3) gemessenen Temperaturen T12 bis T16. Hier ist deutlich zu erkennen, daß sich die Flammen mit hohen Temperaturen auch seitlich ausbreiteten und abhängig von der Höhe eine Temperatur bis zu 1000 °C erreichten. Unterhalb der 3. Ebene an der Meßstelle T12 wurden

weniger als 400 °C und unter der Decke an der Meßstelle T16 ebenso wie an der Meßstelle T6 ca. 500 °C gemessen. Nach dem Löschbeginn fielen die Temperaturen ebenfalls nach ca. 90 s auf weniger als 60 °C ab.

An der Position D (Bild 3) haben die Temperaturen an den Meßstellen T17 bis T19 (T20 war defekt) an der Vorderseite des Hochregals (Bild 40) einen ähnlichen Verlauf wie die Temperaturen T1 bis T4. An der Meßstelle T17 wurden jedoch nur etwa 80 °C gemessen. Die Temperaturen T21 bis T24 an der Position E verlaufen ähnlich wie die Temperaturen T12 bis T15, jedoch mit deutlich geringeren Temperaturen. Das bedeutet, daß sich die Flammen im Hochregal etwas stärker auf die rechte Regalseite ausbreiteten.

3.5 Versuch 4: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

3.5.1 Versuchsaufbau

Bei Versuch 4 wurden die bereits erwähnten Euro-Paletten mit einwandigen nach oben offenen Kunststoffkästen aus Polypropylen (PP) im Hochregal eingelagert. Durch die unterschiedliche Form und Größe der Kästen sowie deren Inhalt wurden die einzelnen Paletten unterschiedlich bestückt.

Die genaue Position der belegten Palettenplätze in den Regalen A und B ist jeweils aus den Bildern 29 und 30 zu entnehmen. Der Zusatz "Kunst" bzw. "Metall" gibt an, welche Kästen mit Kunststoffteilen und welche mit Metallteilen gefüllt waren. Insgesamt wurden 52 Palettenplätze auf den Regalen A und B belegt.

Bei Versuch 4 wurden wie zuvor die bei Versuch 3 installierten Sprührohreinheiten eingesetzt (Bild 3).

Bild 41 zeigt die 7 mit Kunststoffkästen auf Holzpaletten be-

ladenen Regalebenen auf der Frontseite (Regal A) und Bild 42 die 6 von 7 bestückten Regalebenen auf der Rückseite (Regal B) des Hochregals.

Die Zündung erfolgte wie bei Versuch 3 zwischen den Paletten des Regales A in der unteren Regalebene (Bild 3).

Die Temperaturen wurden an den selben Meßstellen wie bei Versuch 3 gemessen (Bild 3). Ebenfalls wurden an den bei Versuch 3 genannten Positionen die Indikatorsprinkler installiert. Der Löscheinsatz mit der Wassernebelanlage sollte 30 s nach dem Auslösen des 2. Indikatorsprinklers erfolgen.

3.5.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Bei Versuch 4 wurde die Brandentwicklung ebenfalls anhand von Beobachtungen und von Videoaufzeichnungen dokumentiert. Die Bilder 43 bis 48 geben einen Eindruck über den Brandverlauf im Hochregallager wieder.

Versuch 4: Brandgut Kunststoffkästen auf Holzpaletten
im Hochregal - Löscheinsatz mit Wassernebelanlage

Zeit

0:00	Zündung
0:15	Flamme erreicht Unterkante 2. Regalebene (2 m)
1:10	Flamme erreicht Unterkante 3. Regalebene (3,25 m)
1:13	Indikatorsprinkler S01 platzt
1:25	Flamme erreicht Unterkante 4. Regalebene (4,5 m)
1:32	Indikatorsprinkler S02 platzt
1:37	Indikatorsprinkler S03 platzt
1:40	Flamme erreicht Unterkante 5. Regalebene (5,75 m)
1:50	Flamme erreicht Unterkante 6. Regalebene (7 m)
2:02	Manuelles Einschalten der Wassernebelanlage
2:45	3 Regalebenen brennen, brennendes Abtropfen
3:00	Flammen bis zur 4. Regalebene
4:00	Abtropfen in Regalmitte, wenig Sicht
5:00	Kleinere Flammen in 3 Regalebenen (Kästen + Inhalt)

7:02 Wassernebelanlage ausgeschaltet
8:00 Wasser an
10:03 Wasser aus, wenig Sicht, Abtropfen aus 1.+ 3. Ebene
12:14 Wasser an
17:22 Wasser aus, kleinere Brandnester vorhanden
17:58 Feuerwehr löscht mit Strahlrohr ab

Bei Versuch 4 (Kästen aus PP) erreichten die Flammenspitzen nach einer Versuchszeit von 30 s eine Höhe über dem Boden von ca. 2 m und nach 1 min eine Höhe von ca. 2,5 m. Bild 43 zeigt die von der Zündwanne ausgehenden Flammen nach 1 min 3 s. Nach einer Versuchszeit von 1 min 13 s platzte das Glasfäßchen des 1. Indikatorsprinklers (S01) über der 4. Regalebene (Bild 3). Nach einer Versuchszeit von 1 min 30 s hatten die Flammen eine Höhe von ca. 5 m erreicht (Bild 44). Das Glasfäßchen des 2. Indikatorsprinklers (S02) platzte nach 1 min 33 s und das des 3. Indikatorsprinklers (S03) nach 1 min 37 s. Bild 45 zeigt den Brand unmittelbar vor dem Löscheinsatz nach einer Versuchszeit von 2 min 1 s. Der Löscheinsatz erfolgte wie bereits erwähnt ca. 30 s nach dem Ansprechen des 2. Indikatorsprinklers bei einer Versuchszeit von 2 min 2 s. Die Temperatur an der Decke betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 100 °C.

Direkt nach dem Auslösen der Wassernebelanlage waren die Flammen in der 1., 2. und 3. Regalebene gut zu erkennen. Ebenso konnte das Abtropfen von geschmolzenem Material sowohl der Kästen als auch des in den Kästen gelagerten Kunststoffmaterials festgestellt werden. Bild 46 zeigt die Ausbreitung des Brandes nach dem Auslösen der Löschanlage nach einer Versuchszeit von 2 min 43 s.

Im weiteren Brandverlauf wurden die Sichtverhältnisse durch das Gemisch aus Brandrauch und Wassernebel stark beeinträchtigt, dennoch waren noch kleine Flammen zu erkennen. Bild 47 zeigt den zurückgegangenen Brand nach einer Versuchszeit von 3 min 44 s.

Nach einer Löschdauer von 5 min wurde die Löschanlage abgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt konnten noch kleine Flammen in der 1. und 3. Regalebene festgestellt werden. Obwohl der Brand bereits eingedämmt war, wurde die Wasserzufuhr erneut für 2 min geöffnet, was jedoch keinen weiteren Löscherfolg mit sich brachte. Da der Brand vollständig gelöscht werden sollte, wurde 2 min später die Wasserzufuhr nochmals für ca. 5 min geöffnet.

Ein weiteres Versprühen des Wassernebels auf die noch vorhandenen kleinen Brandnester hätte wohl keinen weiteren Löscherfolg gezeigt, so daß nach einer Versuchszeit von ca. 18 min die kleinen Brandnester von der Feuerwehr mit dem Strahlrohr abgelöscht wurden. In Bild 48 sind in den unteren 3 Ebenen die durch den Brand beschädigten Kunststoffkästen einschließlich der geschmolzenen Kunststoffteile zu erkennen. Der Brand hatte sich nicht auf benachbarte Paletten ausgedehnt. Er konnte vielmehr durch die Löschanlage auf bereits bei Löschbeginn brennende Paletten beschränkt werden.

Die Wassermenge zum Löschen mit der Wassernebelanlage aus 2 Sprührohreinheiten mit 1070 l/min belief sich durch das mehrmalige Öffnen insgesamt auf 12912 l. Der Druck im obersten horizontalen Sprühkopf betrug ca. 3,9 bar.

Bild 49 zeigt die Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T6 in Abhängigkeit von der Versuchszeit, deren Maximalwerte zwar später erreicht wurden, aber höher lagen als bei Versuch 3 mit Pappkartons, ausgenommen die Temperatur an der Meßstelle T1, die während des gesamten Versuches nicht über ca. 30 °C anstieg. An den Meßstellen T2 bis T5 stiegen die Temperaturen steil an und erreichten Maximalwerte von nahezu 900 °C bei T3 bzw. 1000 °C bei T4, während an den Meßstellen T2 und T5 nur ca. 650 °C erreicht wurden. Unterhalb der Decke an der Meßstelle T6 wurden lediglich 100 °C gemessen.

Die Brandausbreitung erfolgte langsamer als bei Versuch 3, so

daß der Löschvorgang wie vorgesehen 30 s nach dem Auslösen des 2. Indikatorsprinklers S02 vorgenommen wurde. Beim Auslösen der Löschanlage sanken die Temperaturen steil ab. Kleinere Temperaturerhöhungen zu einem späteren Zeitpunkt weisen auf kleinere Brandnester hin.

Im Gegensatz zu Versuch 3 stiegen die Temperaturen an den Meßstellen T7 bis T11 (Bild 50) nur auf max. 100 °C bis 250 °C an. Der Löschbeginn bewirkte wiederum einen steilen Abfall. Auch die Temperaturen an den Meßstellen T12 bis T16 (Bild 51) weisen nur Werte bis max. 290 °C auf. Unterhalb der Decke an der Meßstelle T16 wurden lediglich ca. 60 °C erreicht.

Bild 52 zeigt für die Position D (Bild 3) die Temperatur an der Meßstelle T17, die ihren Höchstwert ebenfalls bei 60 °C erreichte. Die Temperaturen an den Meßstellen T18 bis T20 weisen einen steilen Anstieg auf und fallen nach dem Löschbeginn ebenfalls wieder schnell ab. An der Meßstelle T18 ist jedoch deutlich ein Wiederanstieg zu erkennen, d.h. daß an dieser Stelle der Brand noch nicht vollständig gelöscht war.

An der Position E (Bild 3) weist die Temperatur an der Meßstelle T22 einen Maximalwert von ca. 180 °C auf, während an den anderen Meßstellen T21 bis T24 nur Temperaturen von max. 80 °C erreicht wurden.

4. VERGLEICH VON MEßERGEBNISSEN

Die Brandentwicklungsphase beim 1. und 2. Versuch bei gleichem Versuchsaufbau verlief etwas unterschiedlich. Während der Brandentwicklung entstand bei Versuch 1 zunächst wenig Brandrauch. Nach einer Versuchszeit von ca. 1 min war über der Stapelmitte eine ausgeprägte Flamme in vertikaler Richtung zu erkennen. Bei Versuch 2 entstand vergleichsweise wesentlich mehr Brandrauch. Die vertikalen Flammen rissen zunächst zeitweise ab. Anschließend entwickelten sich auch Flammen in horizontaler Richtung.

Das manuelle Einschalten der Löschanlage mit den 4 offenen Sprinklern bei Versuch 1 bewirkte zunächst keinen sichtbaren Löscherfolg. Da nicht zu erwarten war, daß mit der eingestellten Wasserbeaufschlagung von 12,5 mm/min ein Löscherfolg im Bereich der vertikalen Flamme in der Stapelmitte erreicht werden konnte, wurde nach einer Löschzeit von ca. 2 min die Wasserbeaufschlagung auf 17,5 mm/min erhöht. Hierdurch wurde eine weitere Ausbreitung des Brandes verhindert. Ebenfalls wurde die Intensität des Brandes deutlich vermindert. Nach einer Löschzeit von insgesamt ca. 15 min waren die offenen Flammen bis auf kleine für das Wasser nicht erreichbare Stellen innerhalb des Stapels gelöscht. Nach dem Abschalten der Löschanlage wurden diese Flammen von der Feuerwehr mit Wasser abgelöscht.

Bei Versuch 2 wurde anders als bei Versuch 1 eine Wassernebel-löschanlage eingesetzt, jedoch der gleiche Wasservolumenstrom von 460 l/min eingestellt. Infolge der Einwirkung des Wassernebels wurden unmittelbar nach dem Einschalten der Wassernebelanlage die Sichtverhältnisse stark eingeschränkt. Trotz der eingeschränkten Sicht war zu erkennen, daß die Brandintensität sowohl der vertikalen als auch der sich bereits horizontal zwischen den Ballen ausbreitenden Flammen deutlich abnahm. Als zu erkennen war, daß sich die auf der Frontseite erkennbaren Flammen nach Umfang und Intensität nicht nachhaltig änderten, wurde der Wasservolumenstrom bei der für diesen Versuch verwendeten Löschanlage auf den max. möglichen Wert von 500 l/min erhöht. Nach einer Einwirkungsdauer des Wassernebels von insgesamt ca. 19 min war der Brand bis auf kleinere Brandnester, ähnlich wie bei Versuch 1, eingedämmt. Nach dem Abschalten der Löschanlage wurden diese Restflammen wieder von der Feuerwehr mit dem Strahlrohr abgelöscht.

Die an den zentralen Meßstellen in 1,5 m und 3 m Höhe gemessenen Temperaturen erreichten durch den Einfluß der direkten Flammeneinwirkung ca. 900 °C. Unterschiede im Temperaturverlauf an weiteren Meßstellen ergaben sich bei beiden Versuchen durch

den Löscheinsatz mit verschiedenen Löschanlagen.

Die Temperaturmaxima des Brandrauchs in zentraler Position in Höhe des Daches bzw. des Dachteils über dem jeweiligen Stapel der 12 als Block gelagerten Kunststoffballen lagen bei beiden Versuchen bei ca. 400 °C.

Bei Versuch 3 wurde das Brandgut der vorherigen Versuche durch Pappkarton auf Holzpaletten ersetzt und auf einem Hochregal eingelagert. Die bereits eingesetzte Wassernebellöschanlage wurde für diesen Aufbau entsprechend modifiziert.

Nach der Zündung kam es zu einer sehr schnellen Brandausbreitung im Hochregal. Der Brand wurde jedoch nach dem manuellen Auslösen der Wassernebelanlage bereits nach ca. 30 s Löschzeit stark eingedämmt. Die Sichtverhältnisse waren zu diesem Zeitpunkt sehr stark eingeschränkt mit zunehmender Tendenz. Nach einer Versuchszeit von ca. 6,5 min wurde das Wasser abgeschaltet. Nach dem Abziehen des Brandrauches zeigte sich, daß eine Ausbreitung des Brandes verhindert wurde und nur einzelne kleine Brandnester übrig blieben, die durch die Feuerwehr mit einem Strahlrohr abgelöscht wurden.

Bei Versuch 4 wurde das Brandgut gegen Kunststoffkästen ausgetauscht. Die Brandausbreitung nach der Zündung war wesentlich geringer als bei den mit Pappkarton bestückten gelagerten Paletten. Das manuelle Einschalten der Wassernebelanlage bewirkte wiederum eine starke Sichtbeeinträchtigung, so daß die Flammen und das brennende Abtropfen von Kunststoffmaterial nur kurzzeitig beobachtet werden konnten. Nachdem im Hochregal keine Flammen mehr zu erkennen waren, wurde nach einer Löschzeit von 5 min die Wasserzufuhr der Löschanlage abgeschaltet. Die jetzt sichtbaren kleineren Brandnester wurden durch mehrfaches An- und Abschalten der Wasserzufuhr bekämpft, ließen sich aber nicht vollständig löschen, so daß die Feuerwehr wie bei den Versuchen zuvor die Reste ablöschen mußte.

Die max. Temperaturen bei diesen Versuchen betragen nahezu 1000 °C im Hochregal. Der Temperaturverlauf an den anderen Meßstellen weist auf die unterschiedliche Brandausbreitung beim jeweiligen Brandgut hin.

Es kann abschließend festgestellt werden, daß der Brand bei allen 4 Versuchen durch die jeweils eingesetzte Löschanlage kontrolliert, aber nicht vollständig gelöscht werden konnte, so daß die Feuerwehr nach dem Abschalten der Löschanlage verdeckte Bereiche mit dem Strahlrohr ablöschen mußte.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden Brand- und Löschanlagenversuche durchgeführt, bei denen unterschiedliche Materialien wie Kunststoffballen einer Hohl- bzw. Flaschenfraktion (PP, PE) als Blocklager aufgebaut sowie Wellpappkartons und Kunststoffkästen (PP) als Brandgut in einem Hochregal eingelagert wurden. Für den Löscheininsatz wurden bei diesen Untersuchungen sowohl eine Sprinkleranlage mit 4 offenen Sprinklern als auch eine Wassernebelanlage in der jeweils ausgeführten Installation eingesetzt.

Bei den Versuchen mit diesen Brandgütern konnte festgestellt werden, daß ein Brand im Entwicklungsstadium innerhalb von wenigen Minuten soweit eingedämmt werden konnte, daß nur noch kleine Brandstellen vorhanden waren, die anschließend von der Feuerwehr abgelöscht wurden.

Eine weitere Brandausbreitung nach dem Löschanlagenbeginn auf andere Teilflächen der Stapel aus Kunststoffballen bzw. auf weitere Paletten im Hochregal wurde durch die jeweilige Löschanlage (Sprinkler- oder Wassernebel-), verhindert. Die dafür eingesetzten Wasservolumenströme betragen je nach Löschanlage zwischen 460 l/min und 1070 l/min.

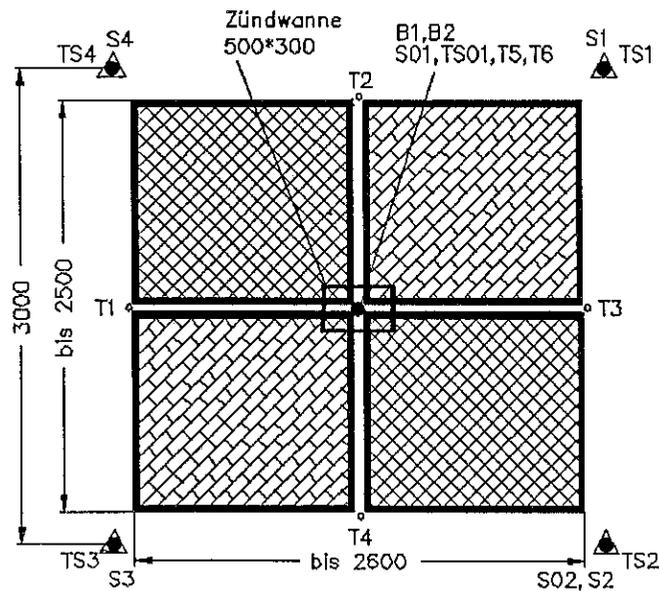
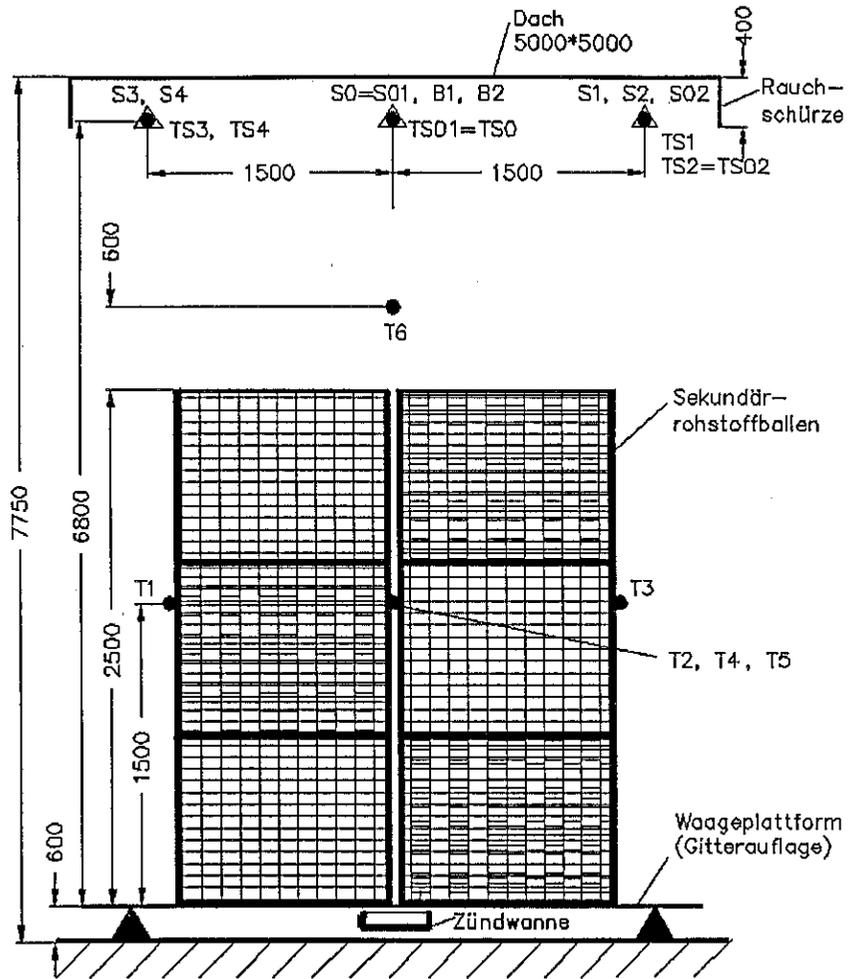
Die Temperaturen fielen kurze Zeit nach Löschanfang an den Meßstellen soweit ab, daß die jeweilige Brandtemperatur nicht mehr ausreichte, um weiteres durch das Löschwasser befeuchtetes Material zu zünden. Temperaturmessungen zeigten je nach Position der Meßstelle Werte von Raumtemperatur bis zu 1100 °C. Es bildeten sich jedoch sowohl in den Spalten der aneinander gestellten Kunststoffballen des jeweiligen Stapels als auch in einzelnen Paletten im Hochregal kleine Brandnester aus. Ein vollständiges Löschen war aufgrund dieser innenliegenden Brandnester, bei denen das Löschwasser keinen direkten Zugang hatte, nicht möglich. Diese Brandstellen wurden bei allen 4 Versuchen durch die Feuerwehr mit dem Strahlrohr vollständig abgelöscht.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /001/ Wertstoffrecycling in Zahlen - Techniken und Trends. Daten und Fakten zum grünen Punkt
Duales System Deutschland, Köln Jan.1995
- /002/ Wandlungen - Kunststoffrecycling heute
Duales System Deutschland, Köln Feb.1995
- /003/ Muster-Richtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff
(Kunststoff-Lager-Richtlinie - KLR)
Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU,
Entwurf: Nov. 1995 KOE; 0912-2
- /004/ Volkmar, G. : Brand bei Papierhersteller
Cimolino, U. 112, (1996) 2, S.78-83
- /005/ Fortschritte bei der Restmüllverbrennung
Stromthemen 3 (1996) S.1-3
- /006/ Just, D. : Gefährliche Arbeit in Recyclinganlagen
Umwelt 26 (1996) Nr.3, S.68
- /007/ Friedl, Ch. : Abfallentsorgung '95: Müll gesucht!
VDI Nachrichten (1995) Nr.50, S.18
- /008/ Keine saubere Lösung (Abfallentsorgung)
Test, Stiftung Warentest (1994) Nr.5,
S.94-97
- /009/ Wandinger, H. : Messungen an Müllverbrennungsanlagen
Optimierung eines
Flammenionisationsdetektors
CAV Feb. 1995, S.82,84
- /010/ Hamich, W. : Kunststoffrecycling zwischen Ökologie
Rönich, J. und Ökonomie
KPZ 13 Juli 1995, S.9-13
- /011/ Durchbruch für das Recycling von
K-Verbundwerkstoffen
KPZ 13 Juli 1995, S.13-16
- /012/ K-Recycling im Zwielight
KPZ 25/26 Dez. 1995, S.9
- /013/ Look, W. : Brände in Müllbunkern
TÜ Baden, 36 (1995) Nr.4, S.120-124

- /014/ Gebauer, M. : Rohstoffliches Recycling von Altkunststoffen
Kunststoffe 85 (1995) Nr.2, S.214-223
- /015/ Gebauer, M. : Rohstoffliches Recycling von Altkunststoffen durch Visbreaking
Schermaul, D. Science & Technology 48(1995) Nr.1,
S.27-30
- /016/ Gebert, B. : Recycling von gefärbten Kunststoffen
Knittel, D. Kunststoffe 85 (1995) Nr.2, S.224
Schollmeyer, E.
- /017/ Stöcker, M. : Müllberge unter Druck gesetzt
Abfall unter Druck
SCOPE, Industrie Magazin 6(1995)
S.30-33
- /018/ Fischer, R. : Aus Altkunststoffen Platten pressen
Umwelt 25 (1995) Nr.1/2, S. 44-45
- /019/ Wilke, J.P. : Brand in Altpapierlager
UB, (1995) 2, S.2-8
- /020/ Felsch, : Brand eines Papierlagers
Florian Hessen (1995) 2, S.6-8
- /021/ Wirsig, G. : Restmüll trocken stabilisieren
Umwelt 26 (1996) 6, S.34-35
- /22/ Schatz, H. : Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen
Brandschutz durch ortsfeste Löschanlagen
unter Berücksichtigung der Brandent-
stehung und Brandausbreitung über die
Oberfläche und des Eindringens in das
Innere des Lagergutes
Teil 1. Literatúrauswertung und Brand-
versuche an Sekundär-Rohstoffen
Brandschutzforschung der Bundesländer
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brand-
schutztechnik (1996) Nr.102, 39 S.
- /23/ Schatz, H. : Brand- und Löschversuche mit Sprinklern
und Sprühdüsen an Sekundär-Rohstoffen
(Kunststoffballen)
VFDB-Zeitschrift (1997) Nr.1

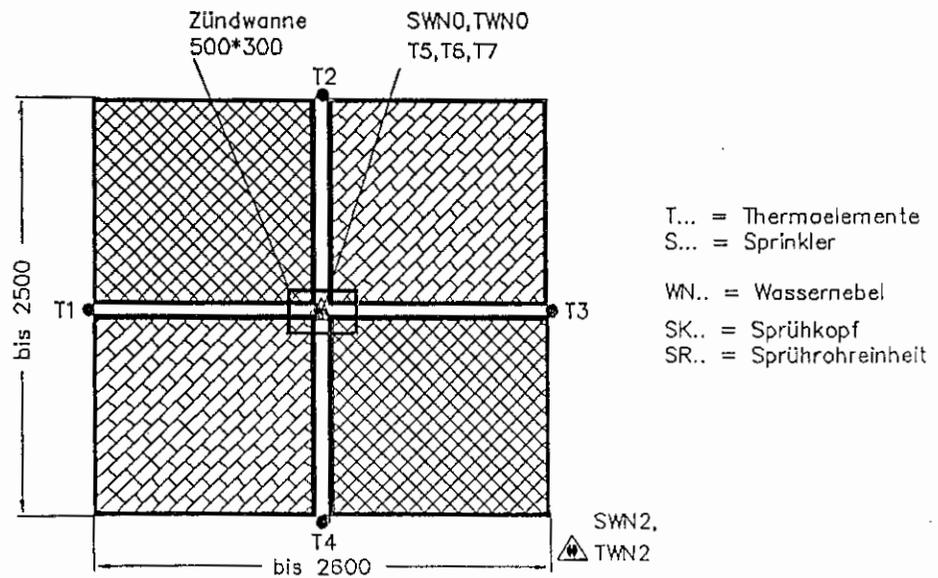
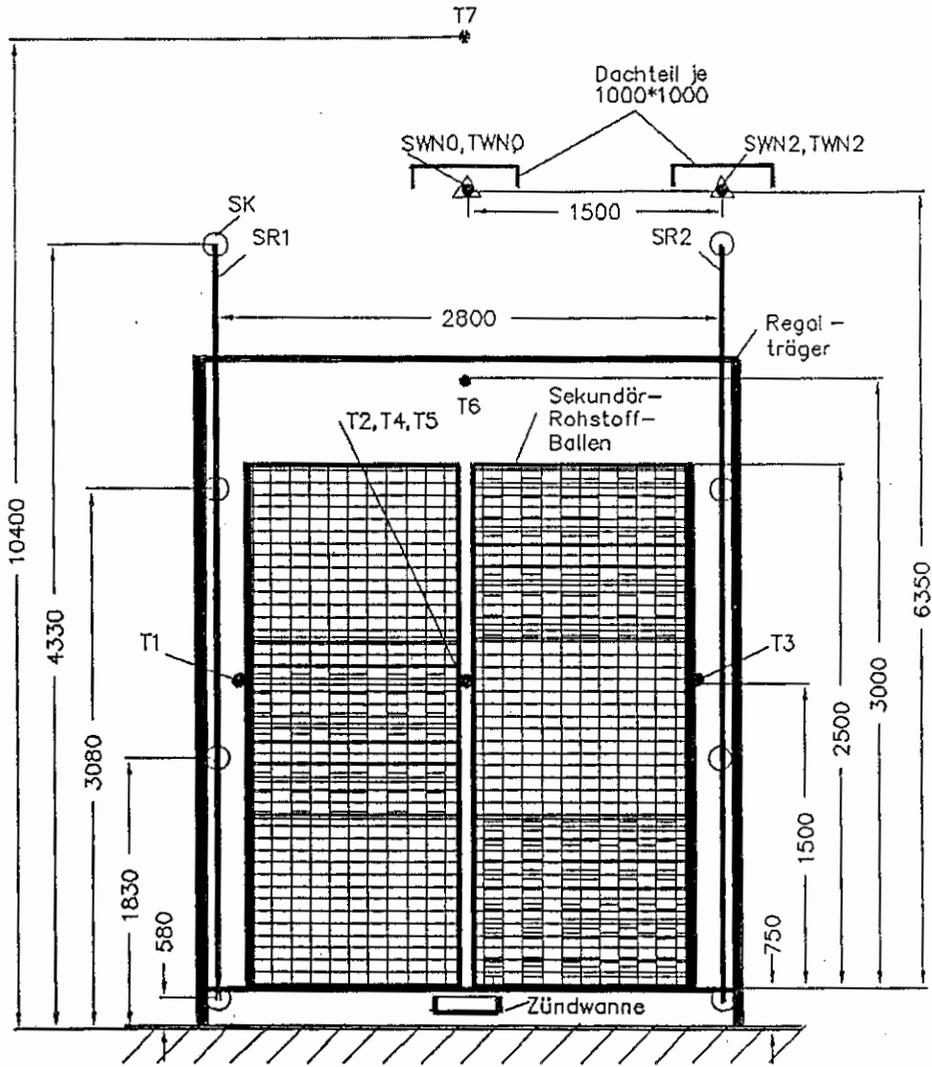
7. BILDER



T... = Thermoelemente
 S... = Sprinkler
 B... = Brandmelder

Maße in mm

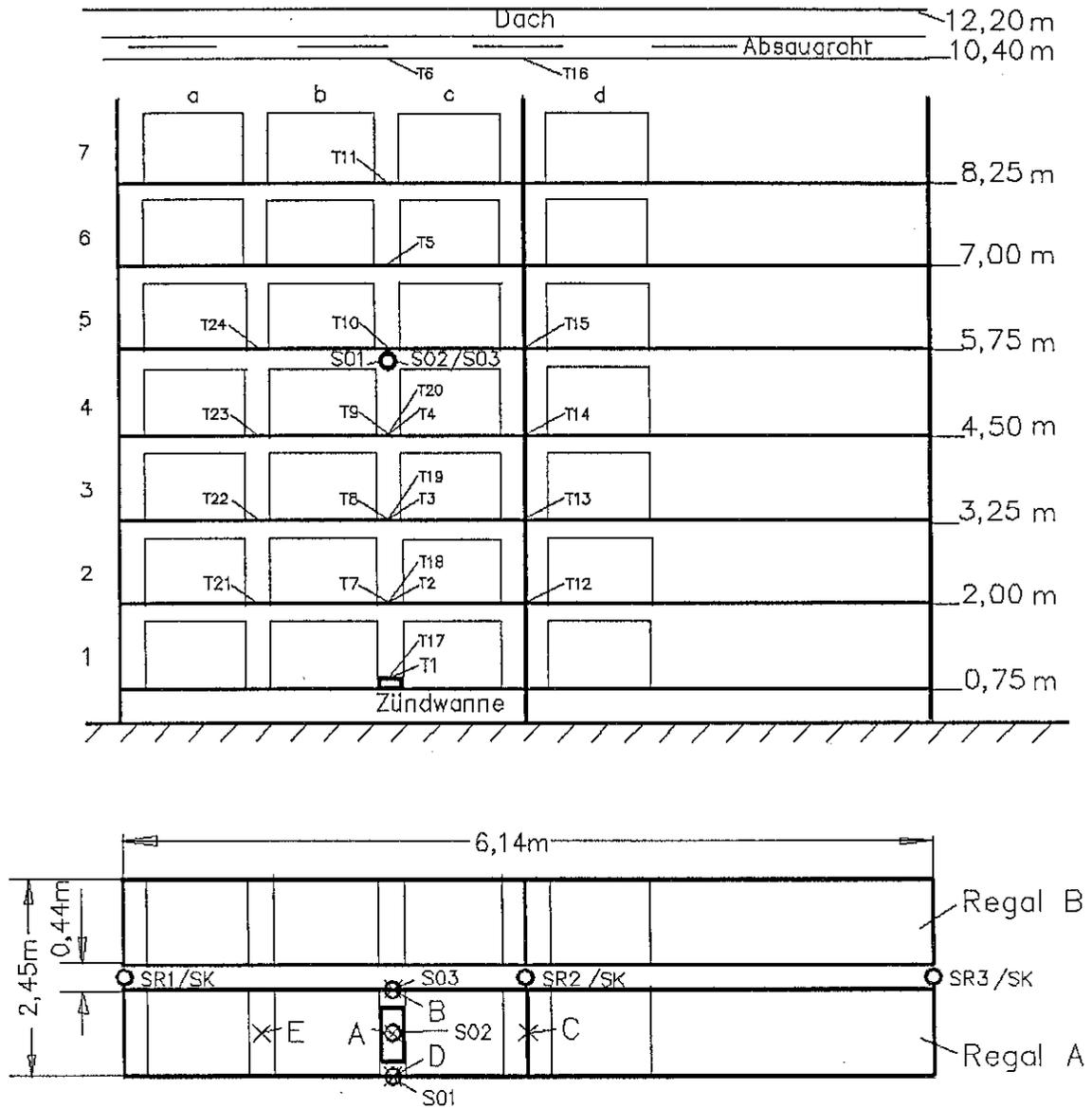
Bild 1: Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus



- T... = Thermoelemente
- S... = Sprinkler
- WN.. = Wassernerbel
- SK.. = Sprühkopf
- SR.. = Sprührohrreinheit

Maße in mm

Bild 2: Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus



Position: Temperaturmeßstellen

- A T1, T2, T3, T4, T5, T6
 B T7, T8, T9, T10, T11
 C T12, T13, T14, T15, T16
 D T17, T18, T19, T20
 E T21, T22, T23, T24

SK: Sprühkopf

- SR1, SR2, SR3: Sprührohreinheit
 S01, S02, S03: Glasfaser-Sprinkler
 ohne Wasseranschluß
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7: Regalebene
 a, b, c, d: Stellplatz

Bild 3: Seitenansicht und Grundriß des Versuchsaufbaus Pappkarton oder Kunststoffkästen auf Holzpaletten im Hochregal

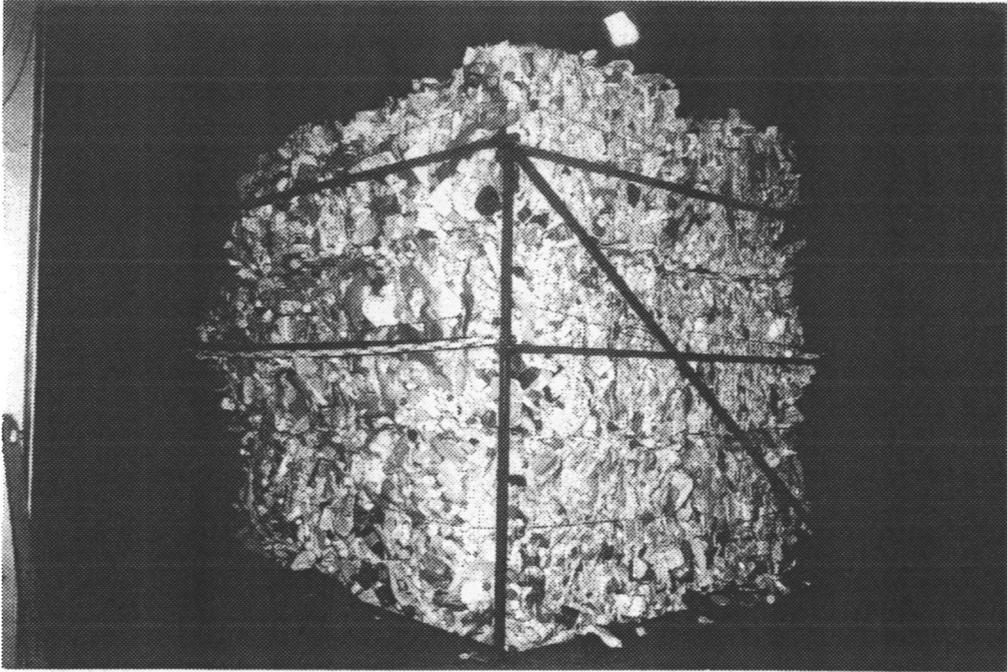


Bild 4: Frontseite (links) und rechte Seite (rechts) des Versuchsaufbaus (Flaschenfraktion).

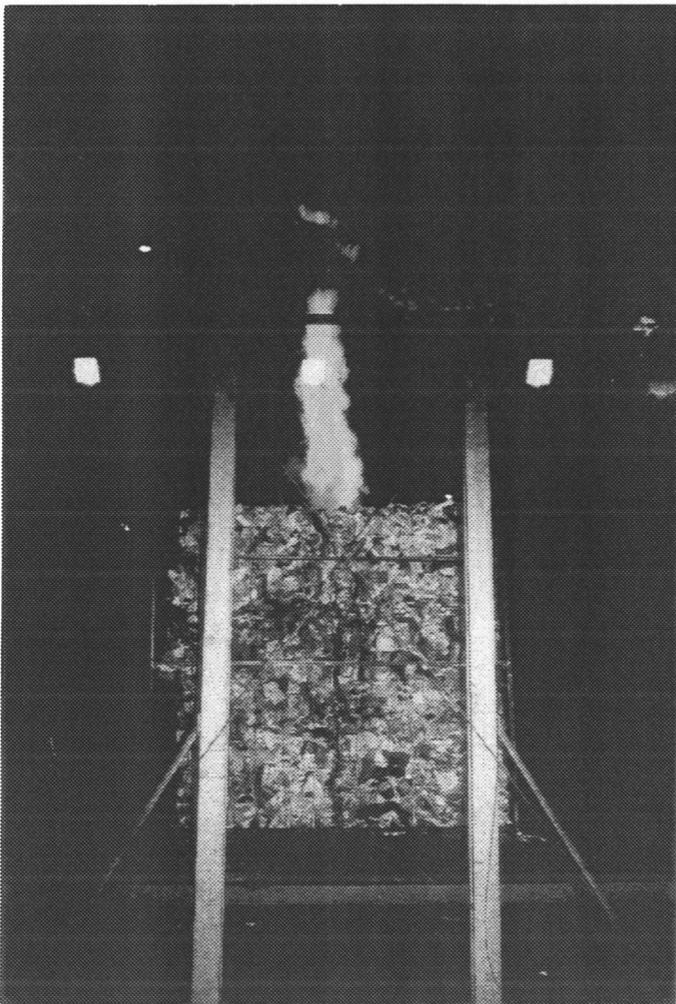


Bild 5: Brandentwicklung nach einer Versuchszeit von 3 min.

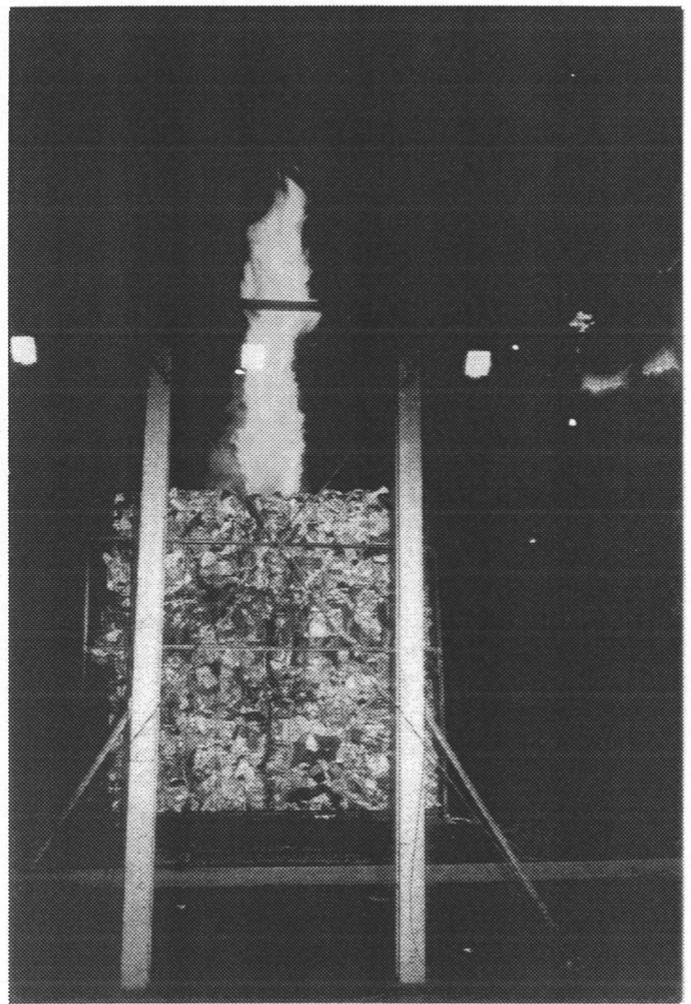


Bild 6: Brandentwicklung nach einer Versuchszeit von 3 min 30 s.

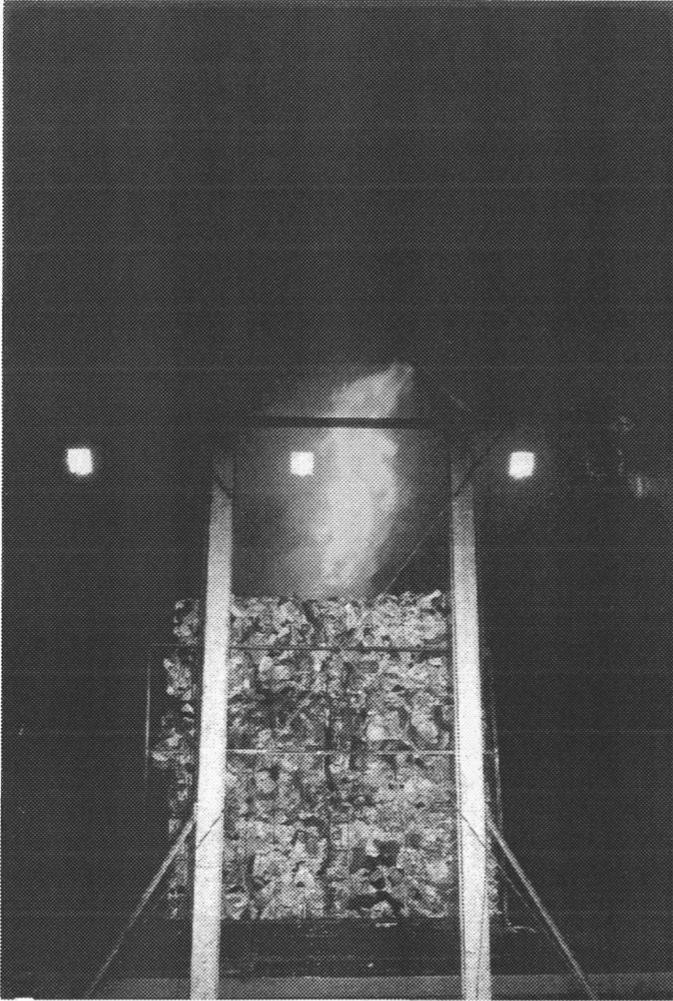


Bild 7:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
4 min 30 s.

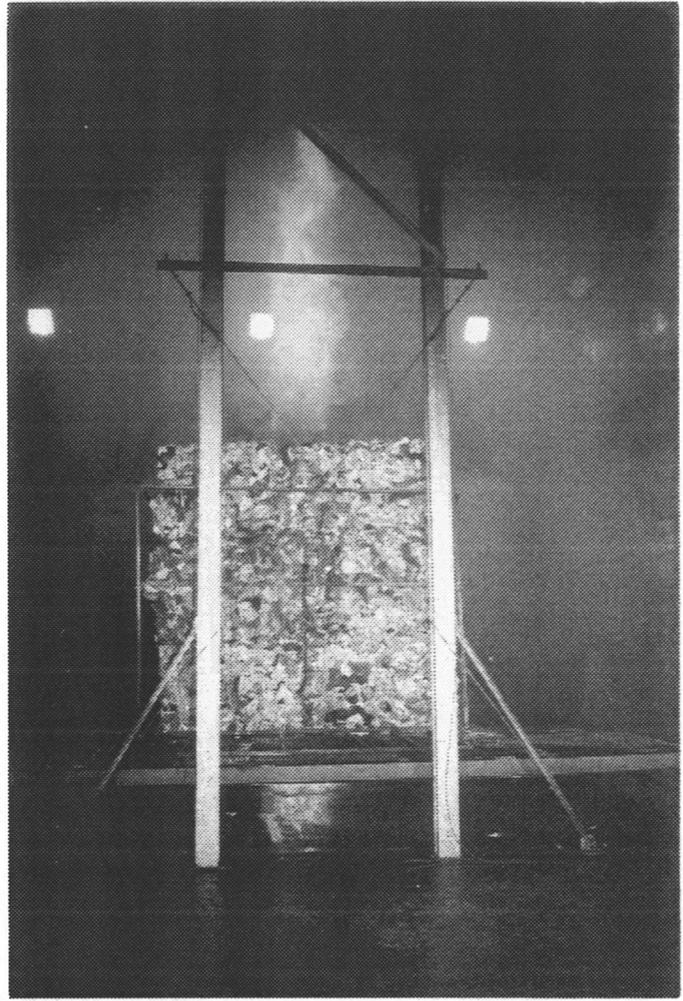


Bild 8:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
5 min 35 s.

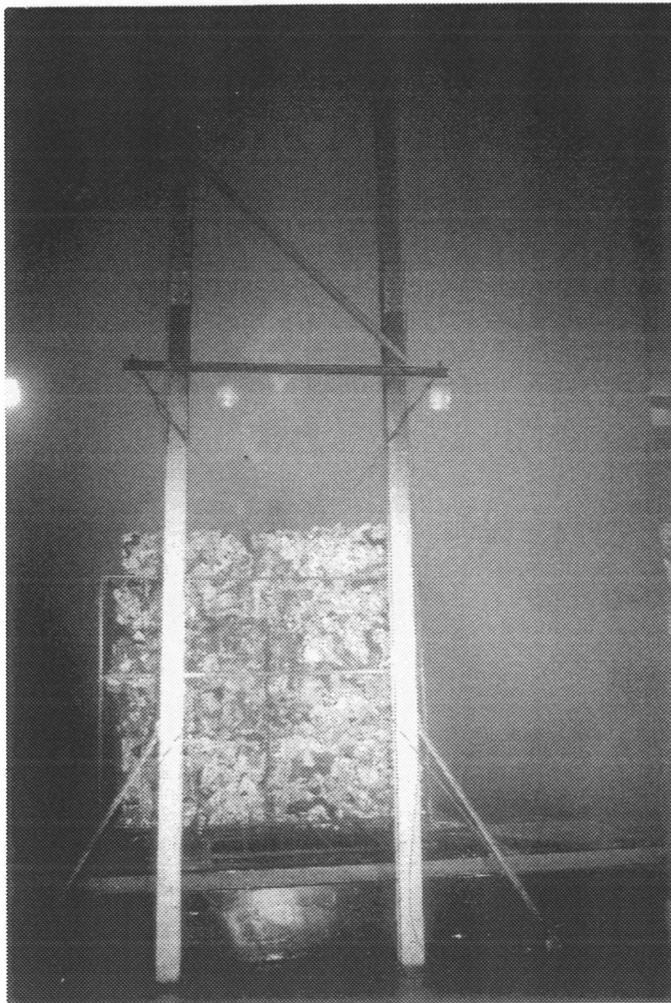


Bild 9:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
6 min 23 s.

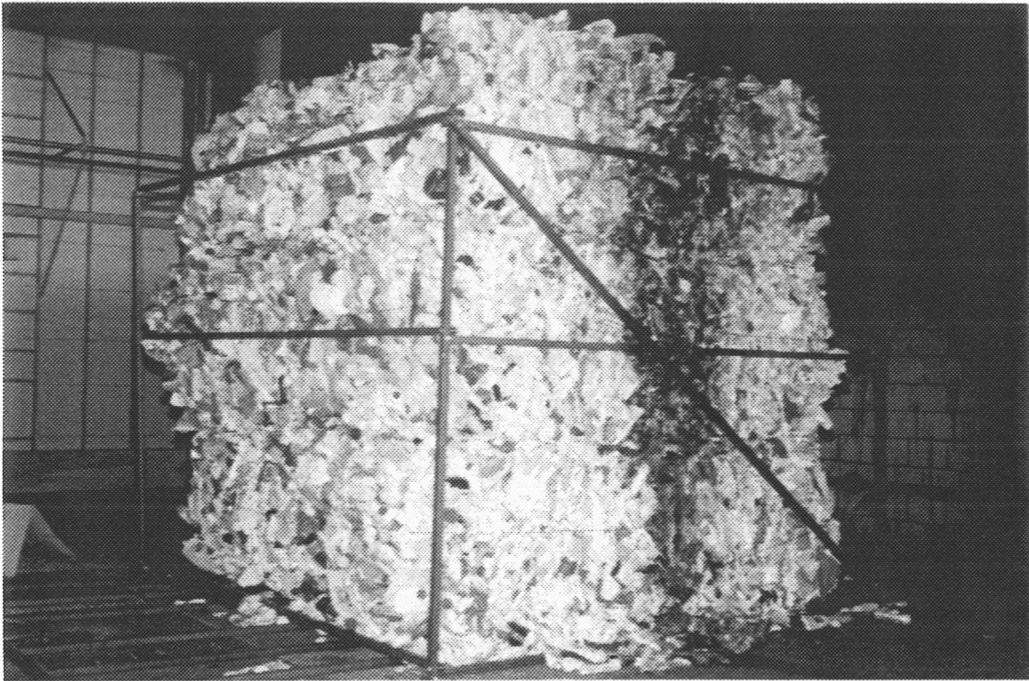


Bild 10: Frontseite (links) und rechte Seite (rechts)
nach dem Versuch.



Bild 11: Rückseite (links) und linke Seite (rechts)
nach dem Versuch.

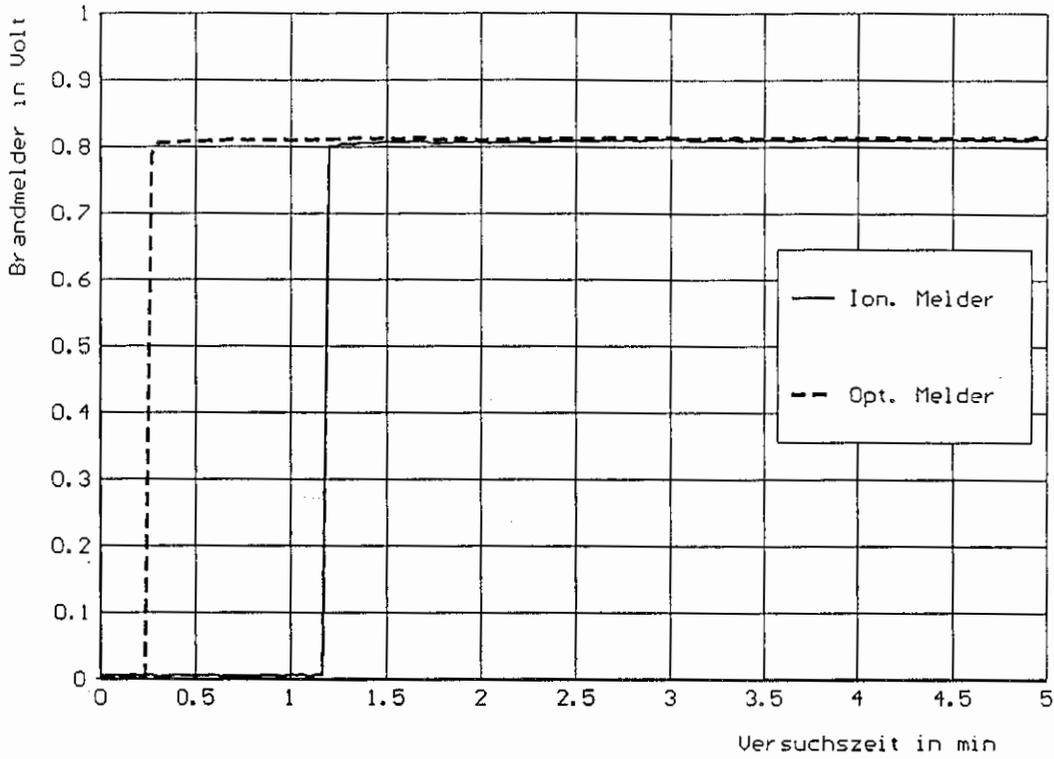


Bild 12: Auslösen der zentralen Brandmelder.

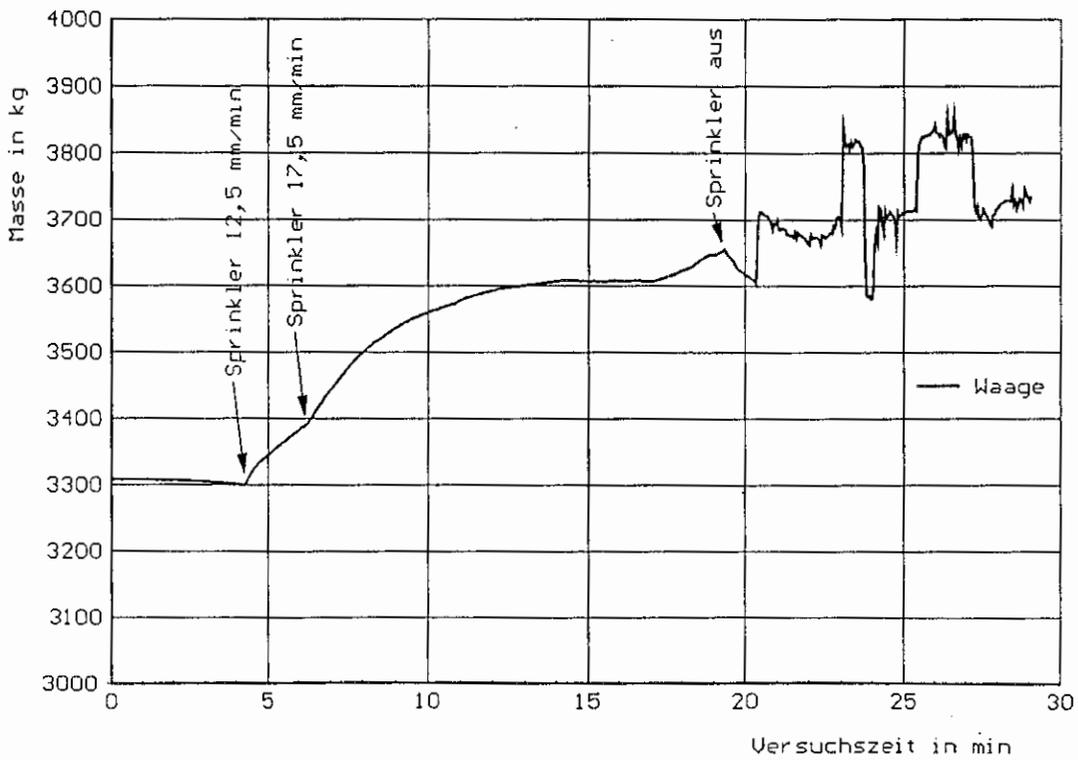


Bild 13: Vorhandene Masse in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

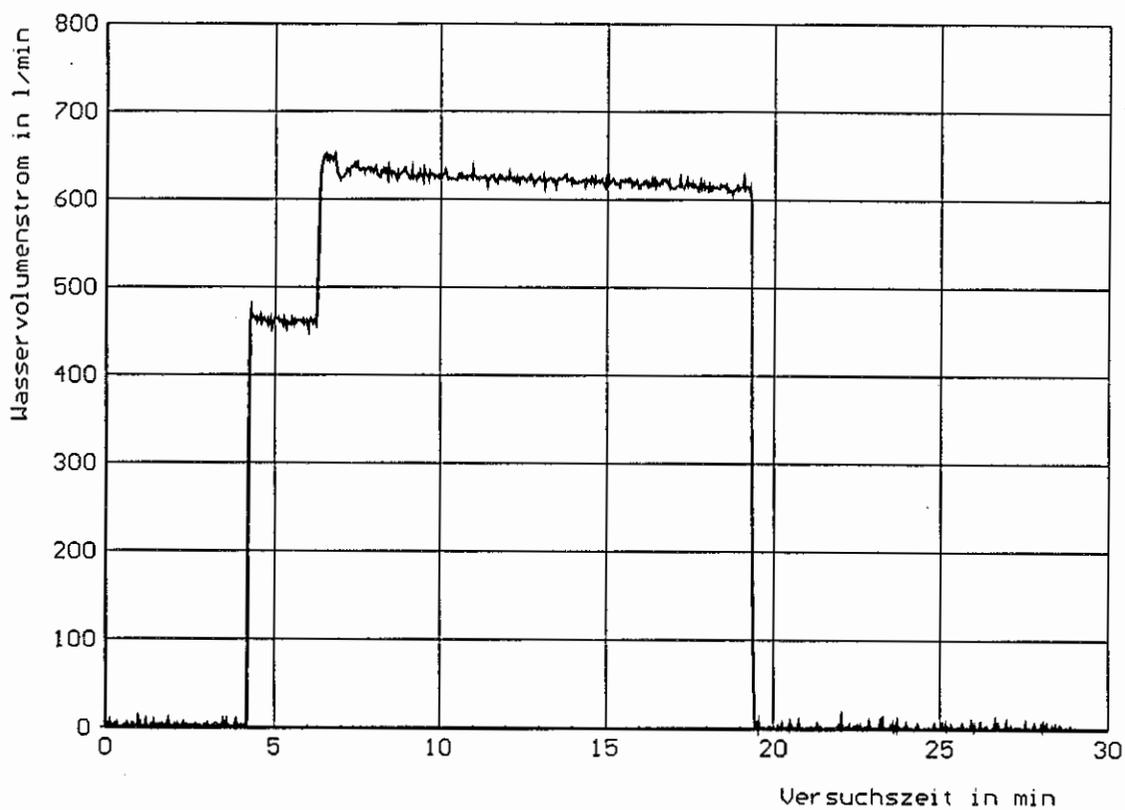


Bild 14: Wasservolumenstrom bei Löschbeginn (460 l/min) und Erhöhung (630 l/min) nach ca. 2 min.

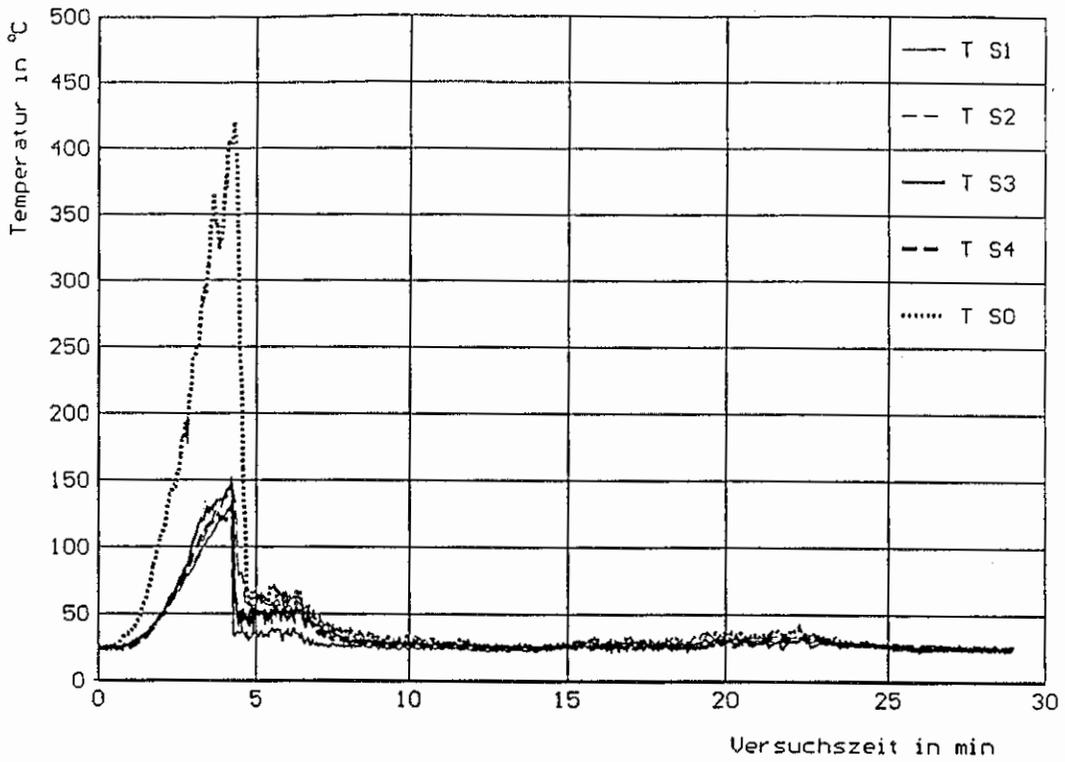


Bild 15: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TS0 bis TS4.

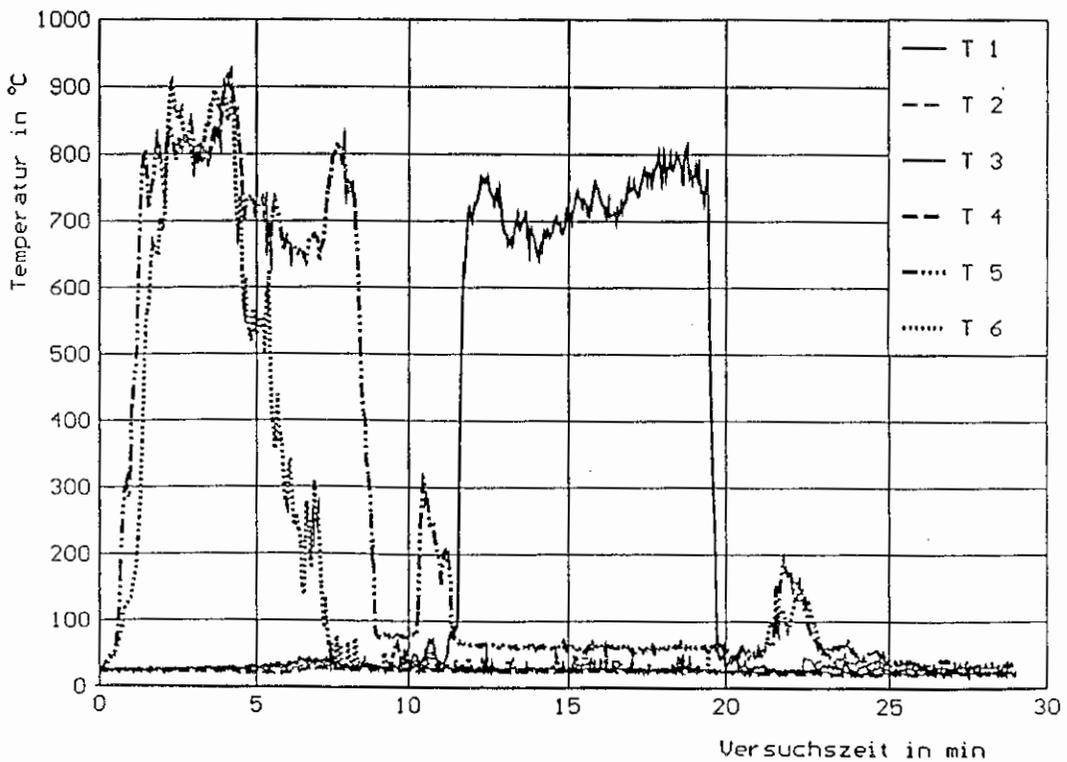


Bild 16: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6.

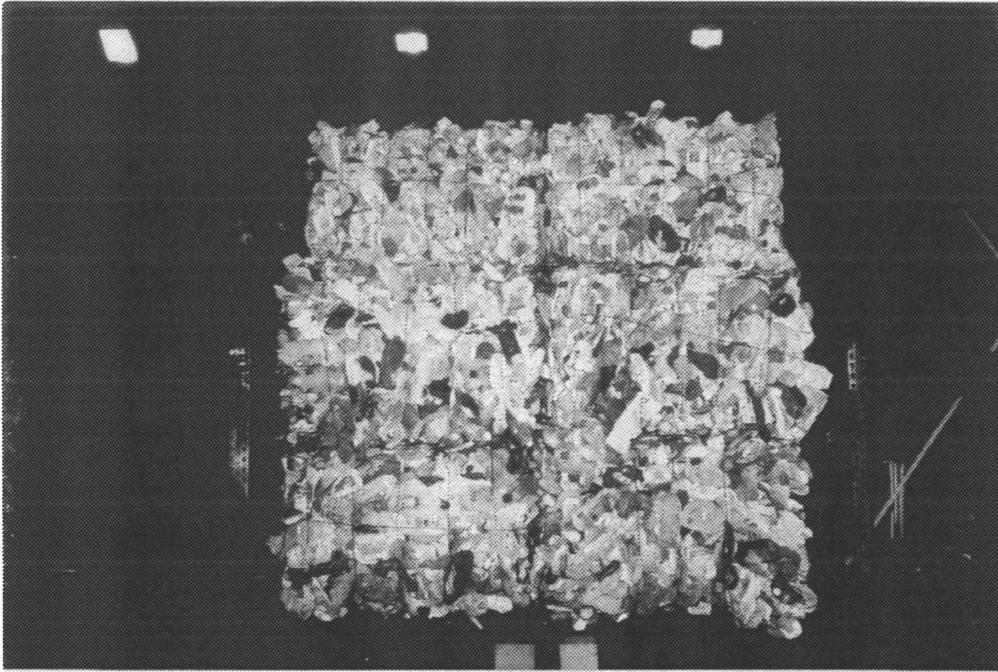


Bild 17:
Frontseite des
Versuchsaufbaus
(Flaschenfraktion)

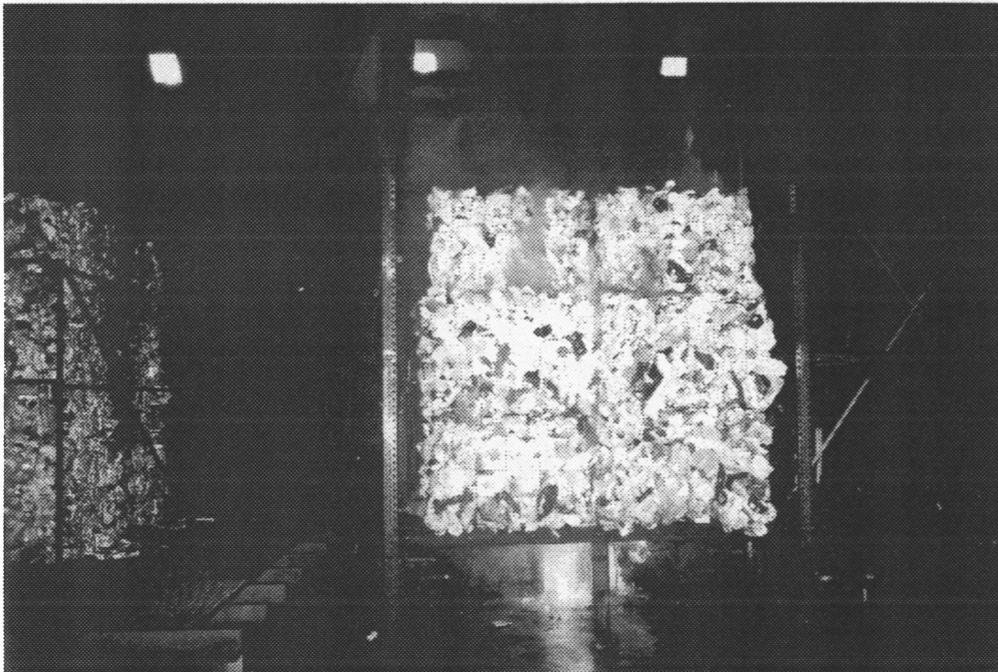


Bild 18:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
3 min 6 s.

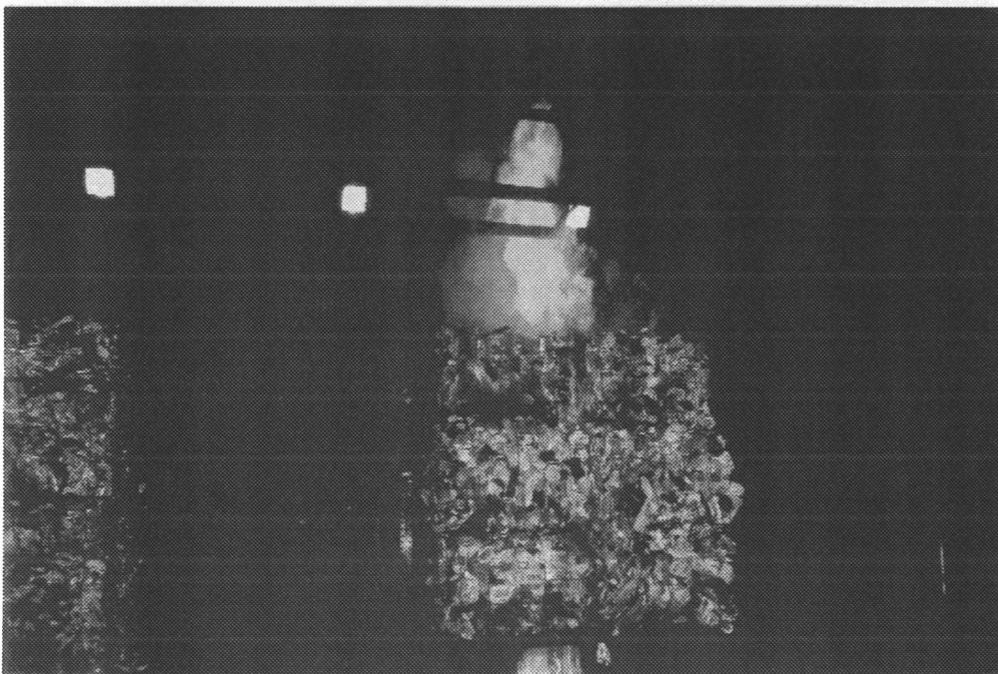


Bild 19:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
3 min 23 s.

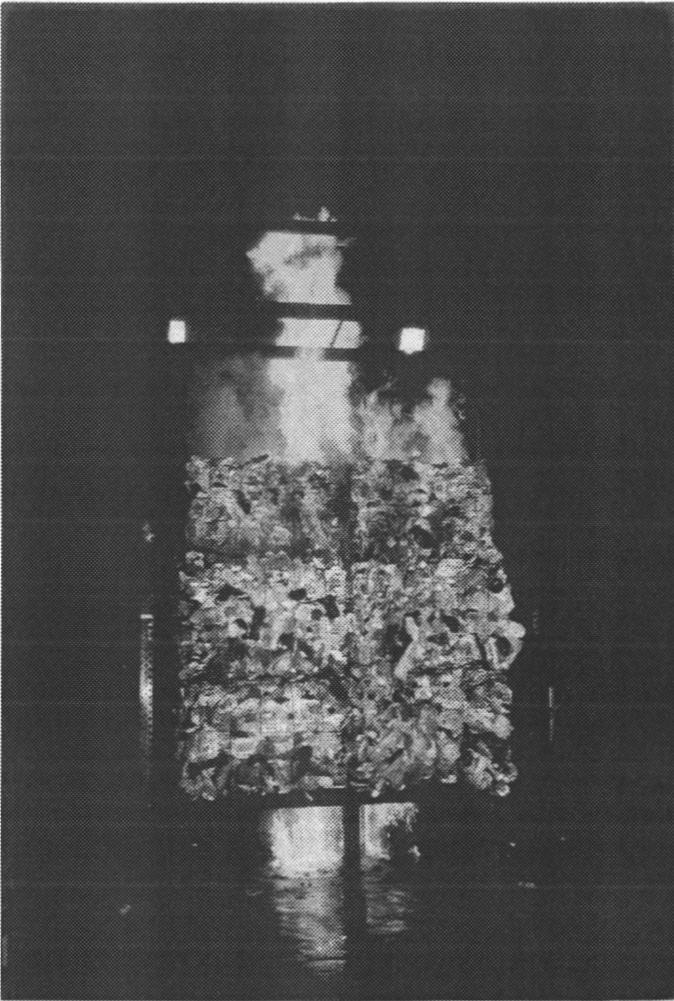


Bild 20:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
3 min 54 s.

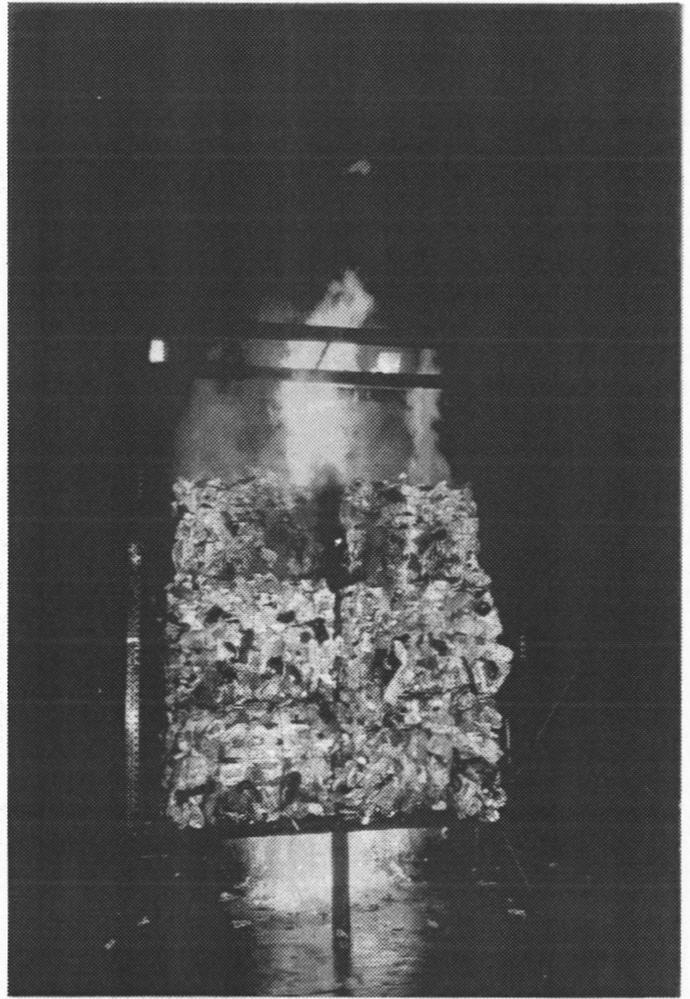


Bild 21:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
4 min 32 s.

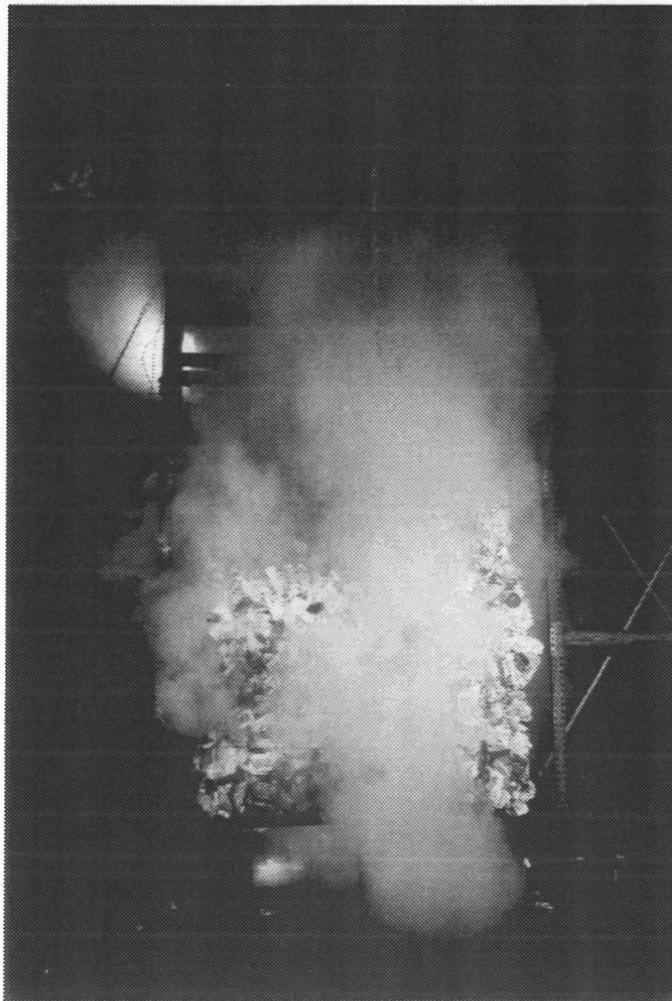


Bild 22:
Brandentwicklung
nach einer
Versuchszeit von
4 min 42 s.

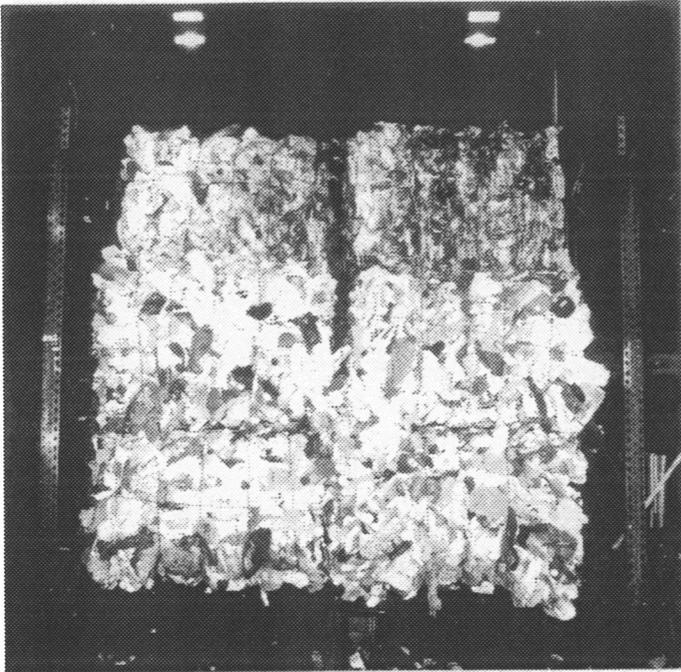


Bild 23:
Frontseite nach dem
Versuch
(oben rechts angebrannt)

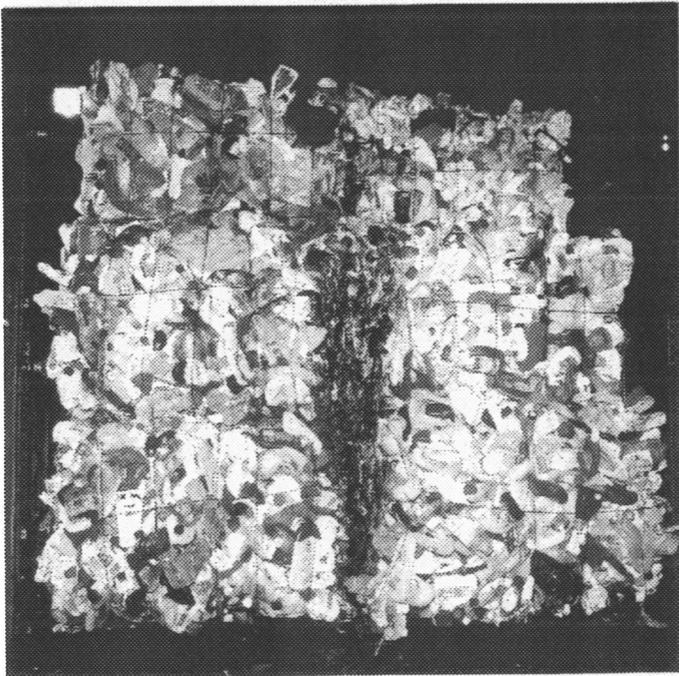


Bild 24:
Rückseite nach dem
Versuch
(Stapelmitte angebrannt)

Bild 25:
Angebrannte innere
Seiten nach dem
Versuch.



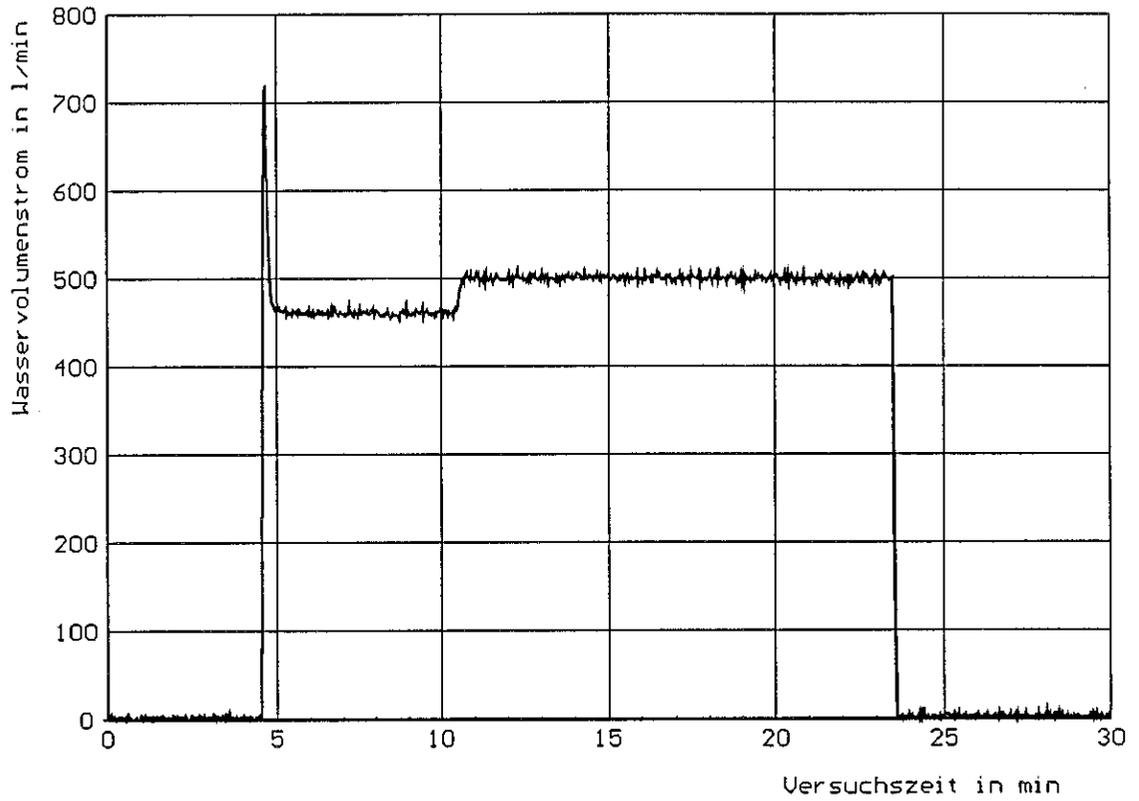


Bild 26: Wasservolumenstrom bei Löschbeginn (460 l/min) und Erhöhung (500 l/min) nach 6 min.

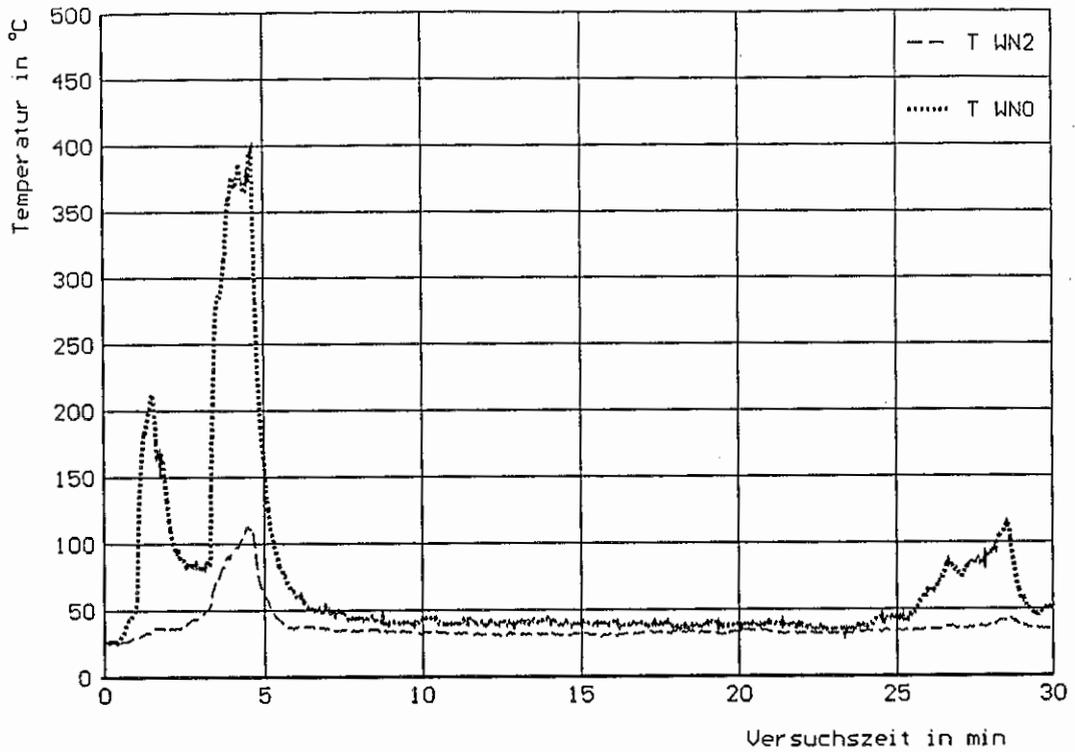


Bild 27: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T WN0 und T WN2.

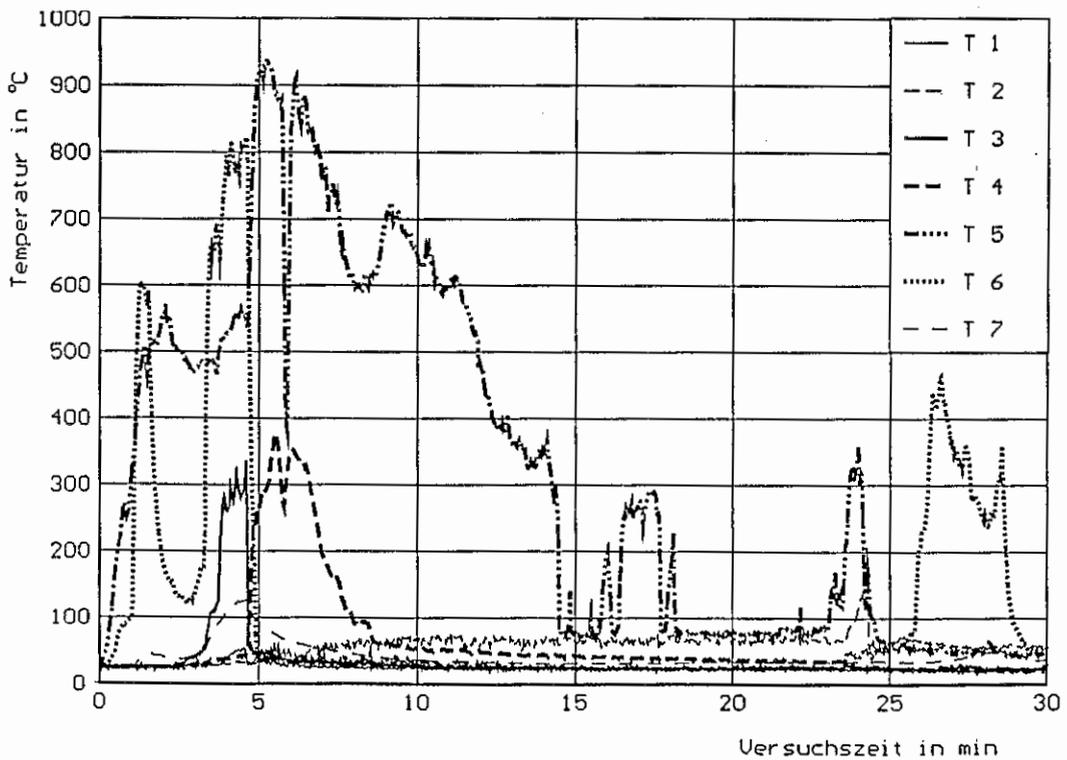


Bild 28: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T 1 bis T 7.

	a	b	c	d	e	f	Höhe
7	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	8,25 m
	4 PP	PP	PP	PP	—	—	
6	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	7,00 m
	4 PP	PP	PP	PP	—	—	
5	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	5,75 m
	4 PP	PP	PP	PP	—	—	
4	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	4,50 m
	4 PP	PP	PP +Kunst	PP +Kunst	—	—	
3	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	3,25 m
	4 PP +Kunst	PP +Kunst	PP +Kunst	PP +Kunst	—	—	
2	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	2,00 m
	4 PP +Kunst	PP +Kunst	PP +Kunst	PP	—	—	
1	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	0,75 m
	4 PP	PP +Kunst	PP +Kunst	PP	—	—	

Bild 29: Aufbau des Brandgutes im Regal A

1...7: Regalebene, a...f: Stellplatz, V: Versuch 3 bzw. 4

	a	b	c	d	e	f	Höhe
7	3 —	—	—	—	—	—	8,25 m
	4 —	—	—	—	—	—	
6	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	7,00 m
	4 PP	PP	PP	PP	—	—	
5	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	5,75 m
	4 PP	PP	PP	PP	—	—	
4	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	4,50 m
	4 PP	PP	PP	PP +Metall	—	—	
3	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	3,25 m
	4 PP	PP	PP	PP +Metall	—	—	
2	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	2,00 m
	4 PP	PP +Kunst	PP +Metall	PP +Metall	—	—	
1	3 Karton	Karton	Karton	Karton	—	—	0,75 m
	4 PP +Metall	PP +Metall	PP	PP +Metall	—	—	

Bild 30: Anordnung des Brandgutes im Regal B

1...7: Regalebene, a...f: Stellplatz, V: Versuch 3 bzw. 4

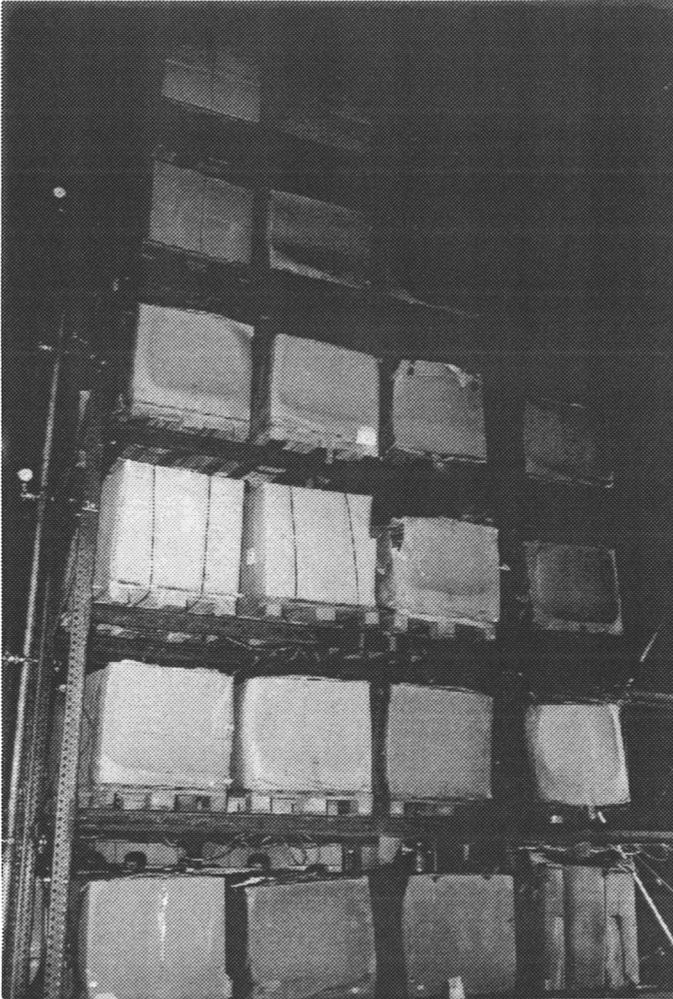


Bild 31:
Frontseite Regal A
Pappkarton auf Holz-
paletten im Hochregal.

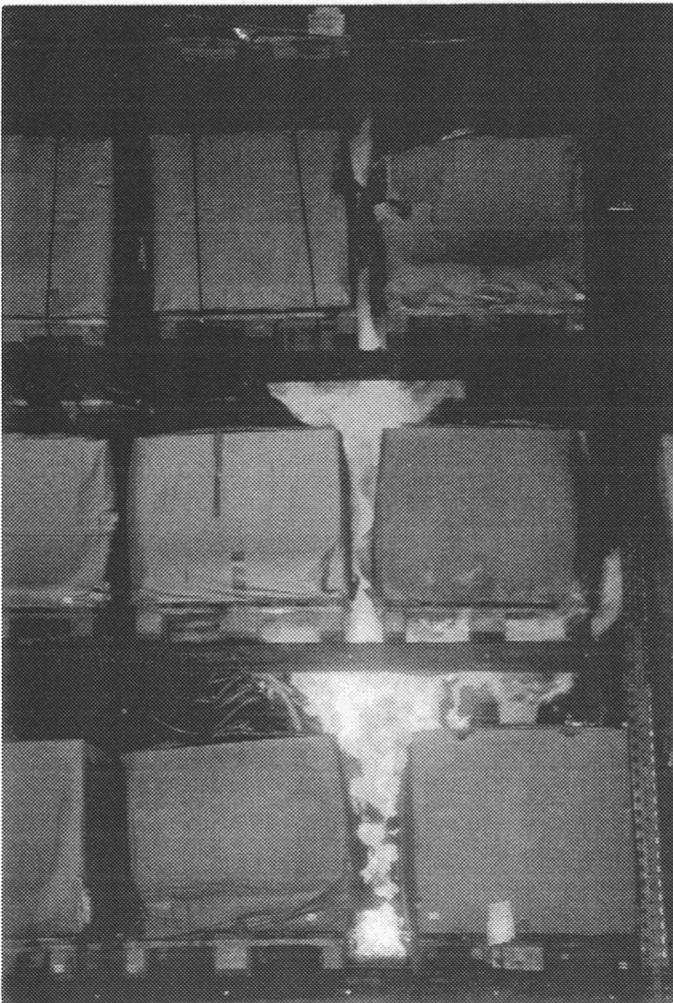


Bild 32:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von 27 s.

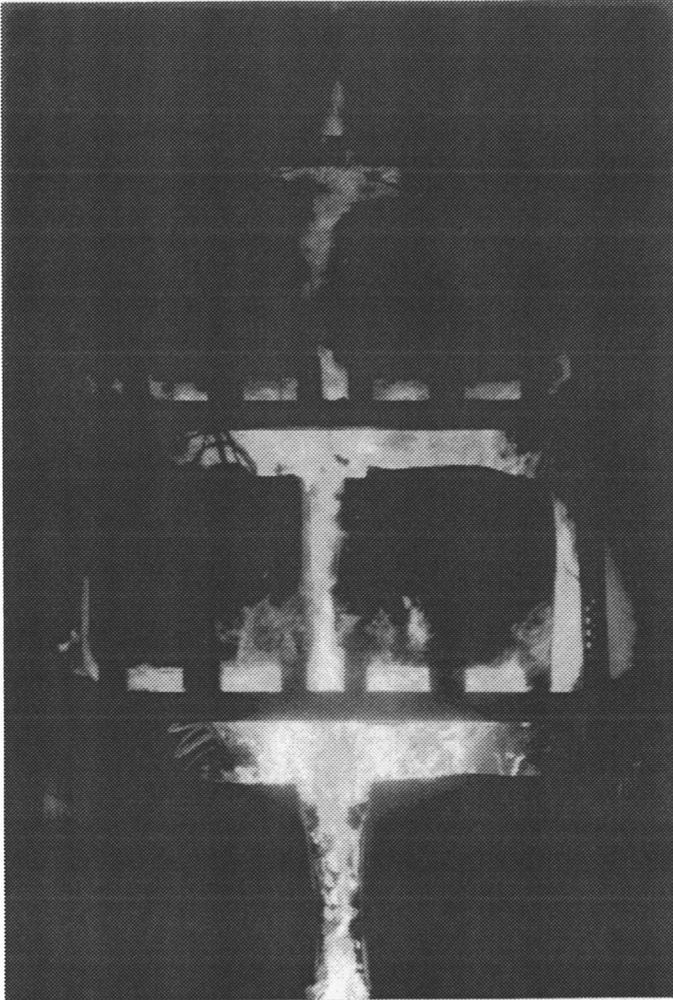


Bild 33:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von 42 s
(1. bis 4. Regalebene).



Bild 34:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von 54 s
(2. bis 5. Regalebene).



Bild 35:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
2 min 2 s
(3. bis 7. Regalebene).



Bild 36:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
1 min 59 s
(1. bis 3. Regalebene).

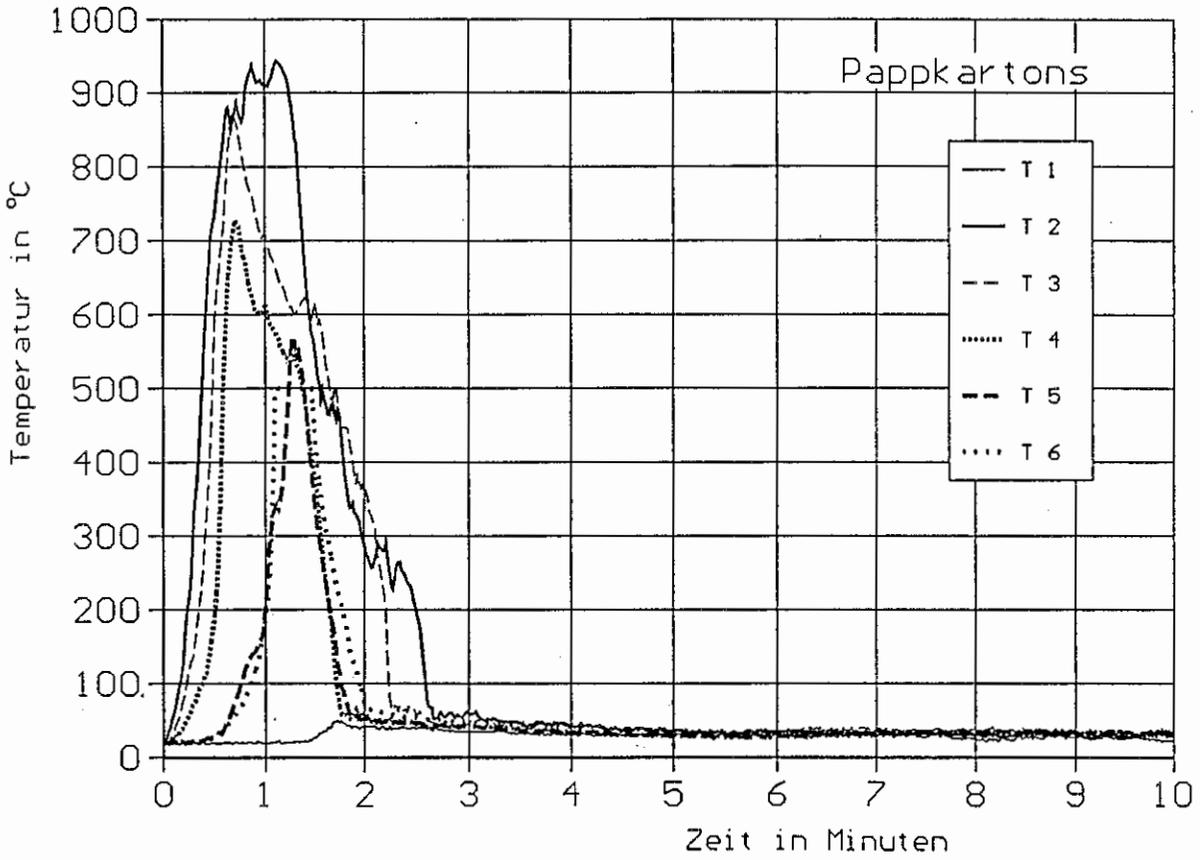


Bild 37: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6.

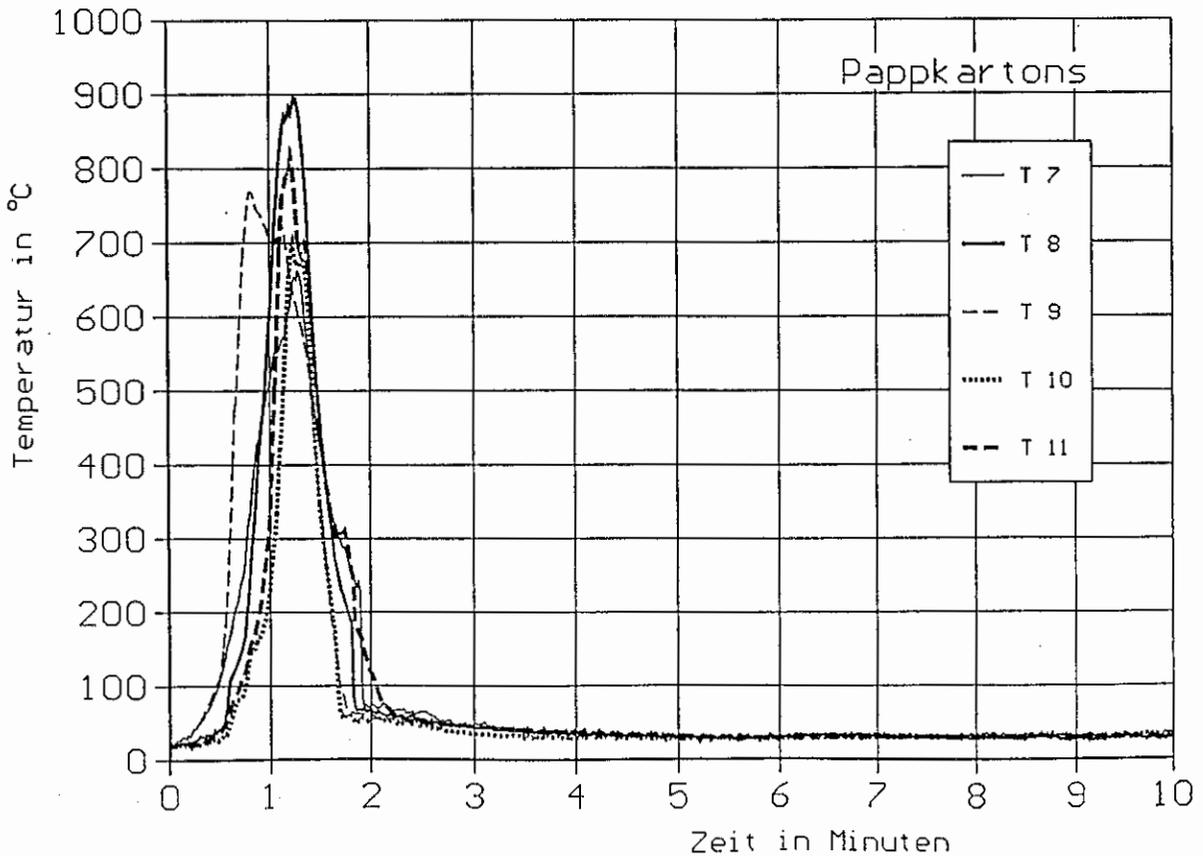


Bild 38: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T7 bis T11.

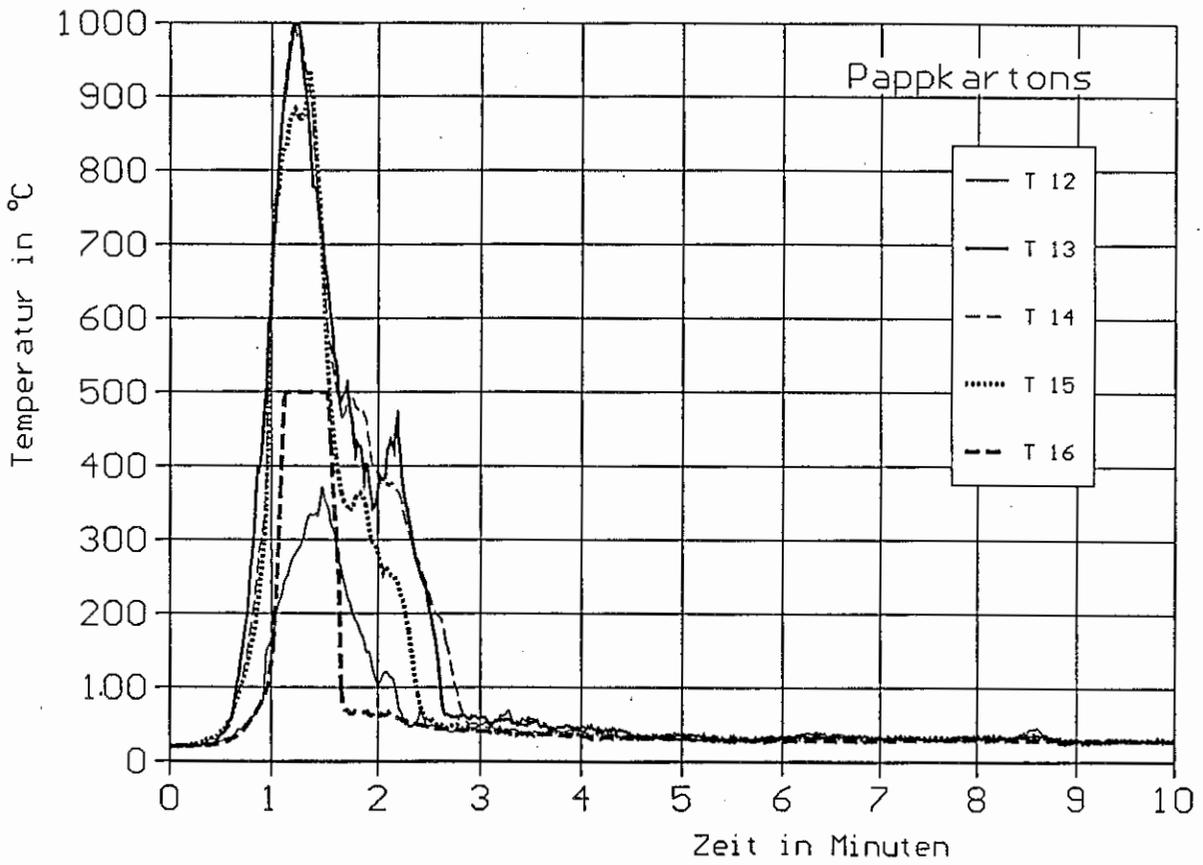


Bild 39: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T12 bis T16.

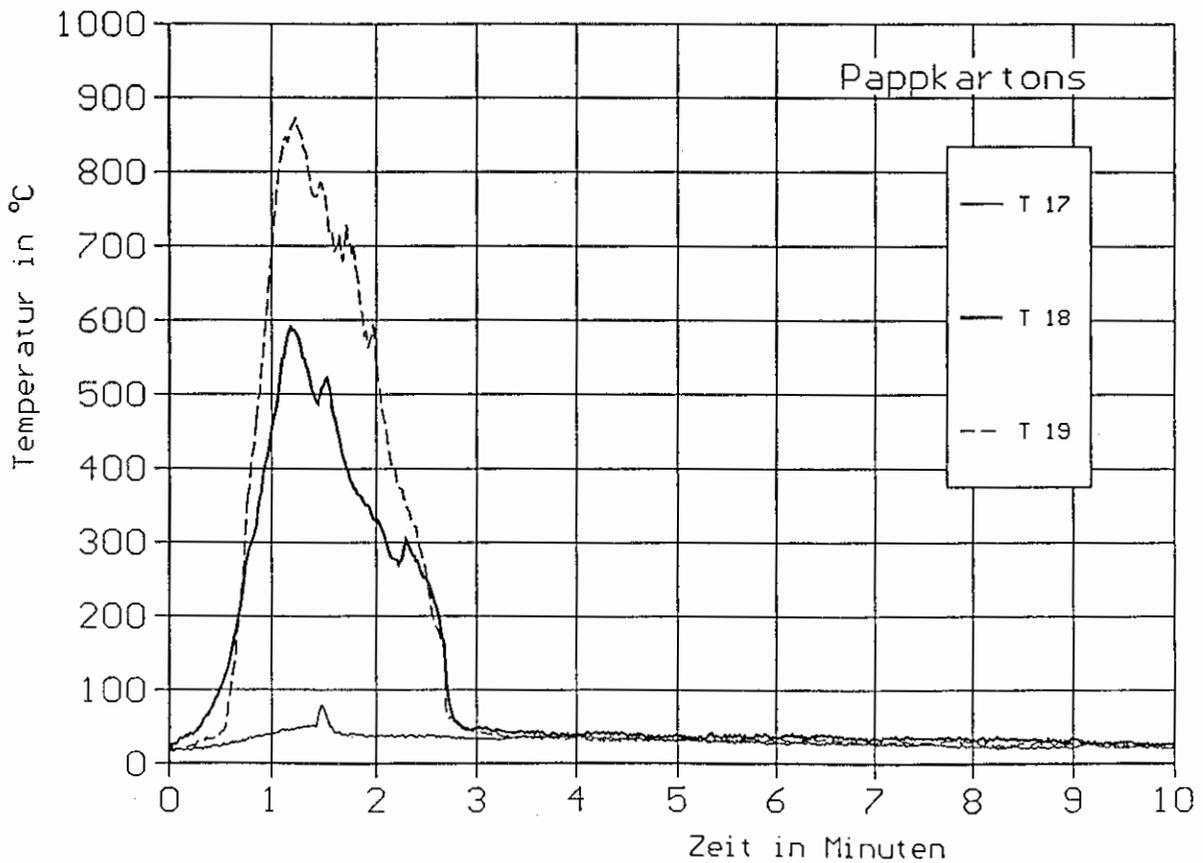


Bild 40: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T17 bis T19.

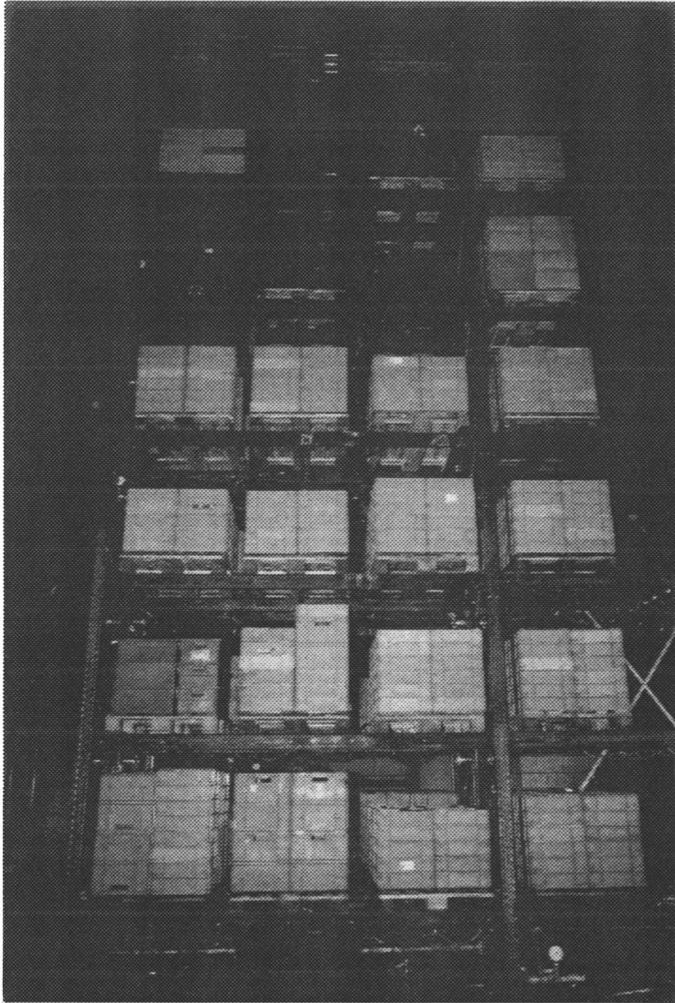


Bild 41:
Frontseite Regal A
Kunststoffkästen auf
Holzpaletten im
Hochregal.



Bild 42:
Rückseite Regal B
Kunststoffkästen auf
Holzpaletten im
Hochregal.

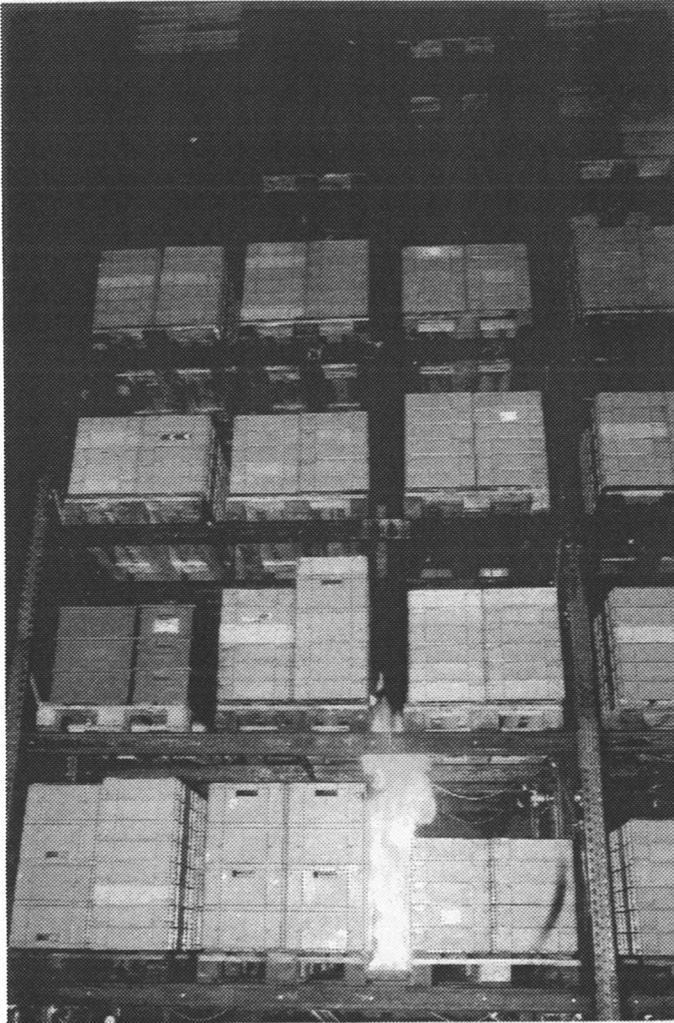


Bild 43:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
1 min 3 s (Frontseite
1. bis 6. Regalebene).



Bild 44:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
1 min 20 s.

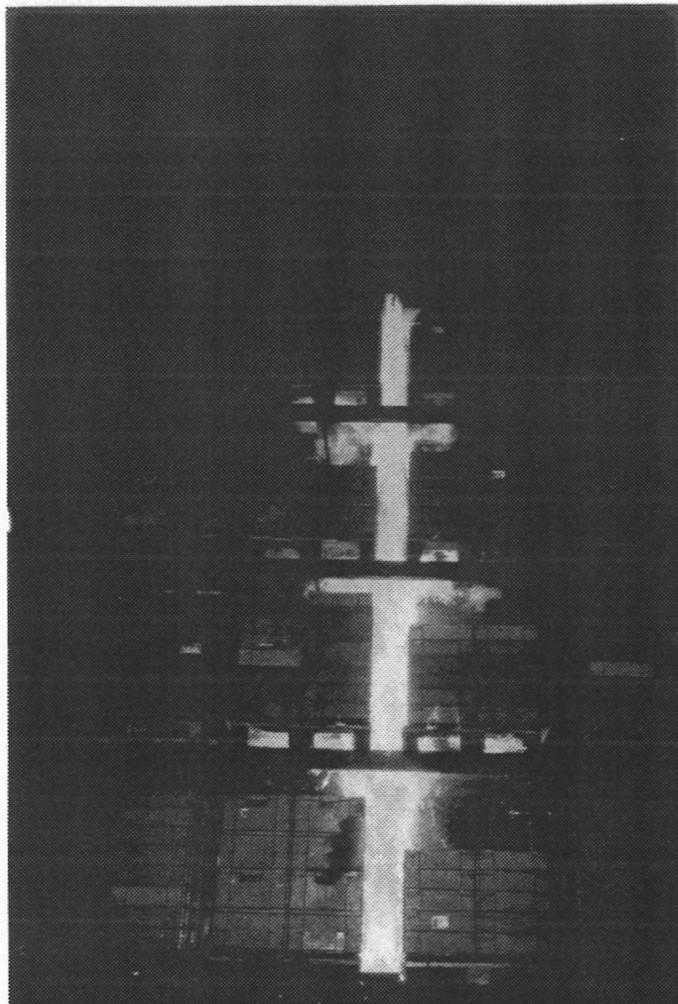


Bild 45:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
2 min 2 s (Löschbeginn).



Bild 46:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
2 min 43 s.



Bild 47:
Brandverlauf nach einer
Versuchszeit von
3 min 44 s.



Bild 48:
1. bis 4. Regalebene
nach dem Brand.

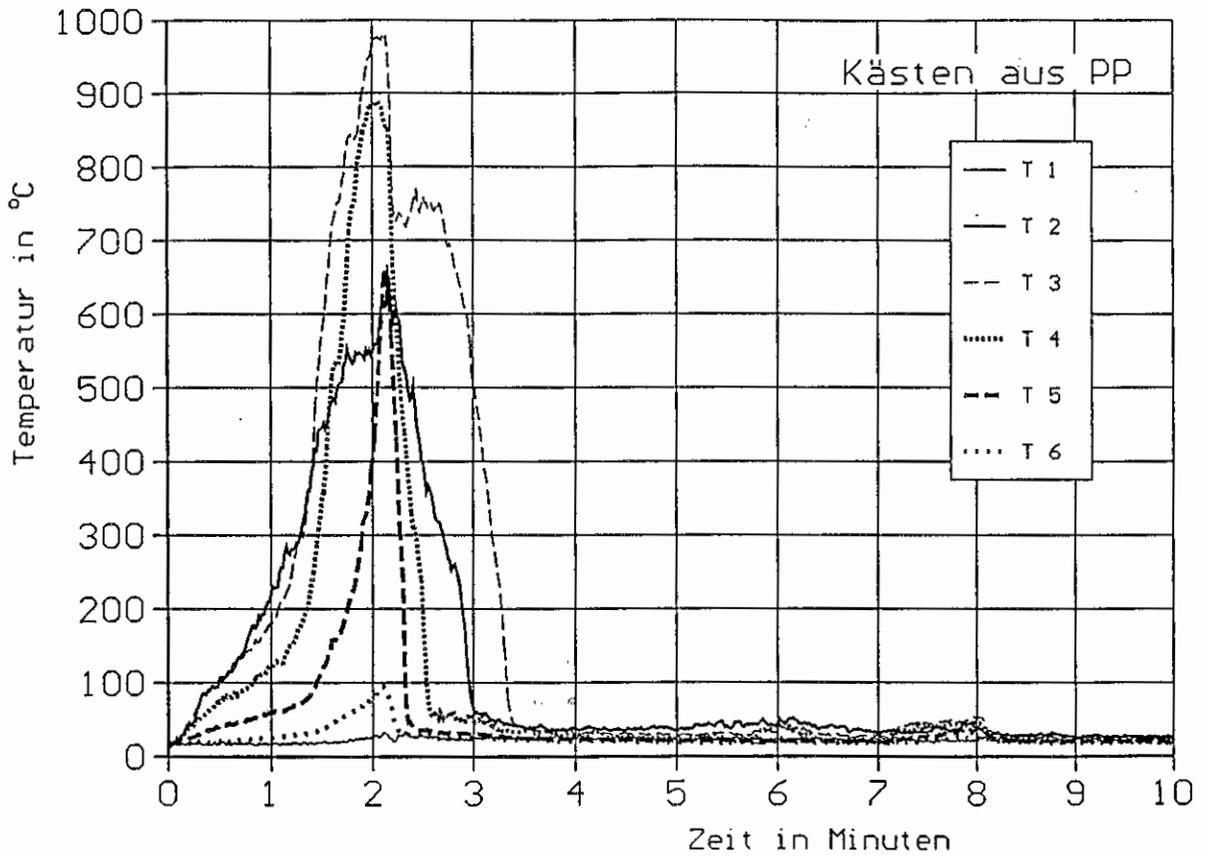


Bild 49: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T1 bis T6.

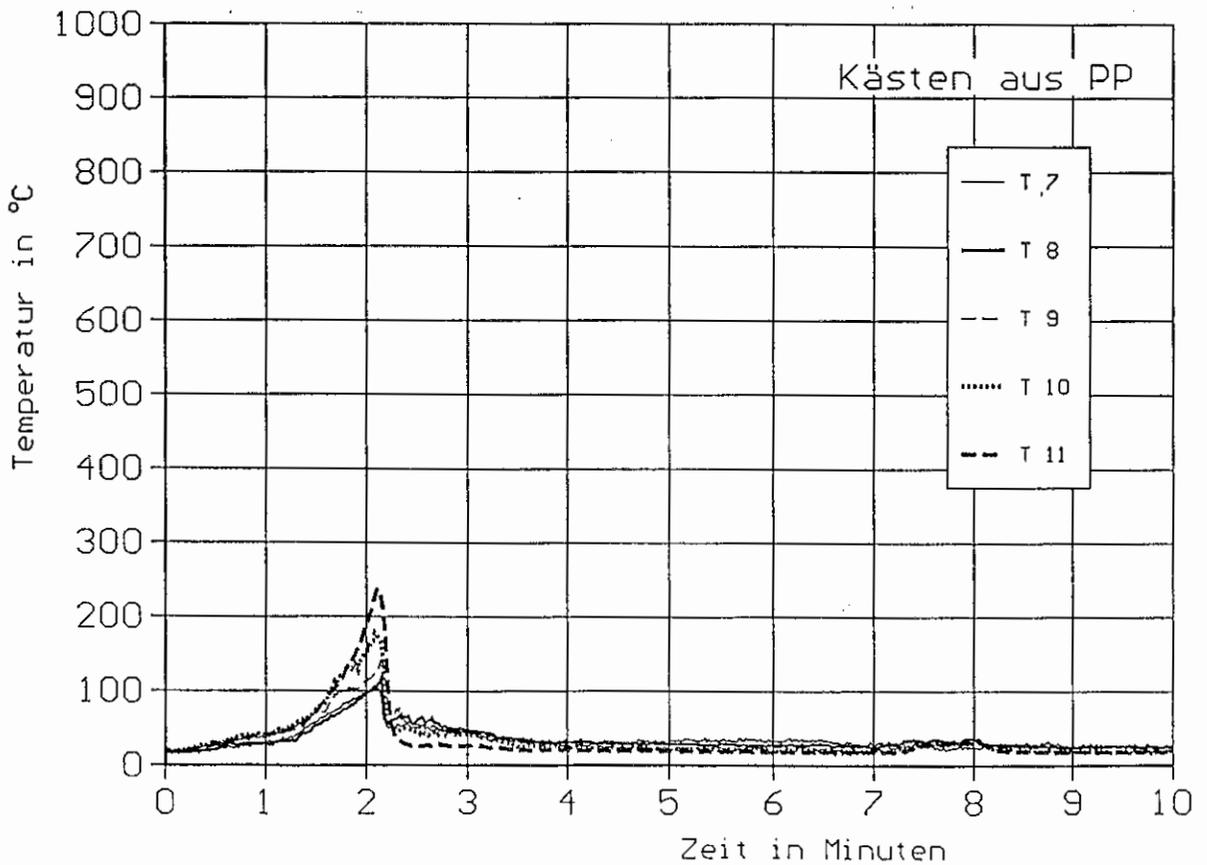


Bild 50: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T7 bis T11.

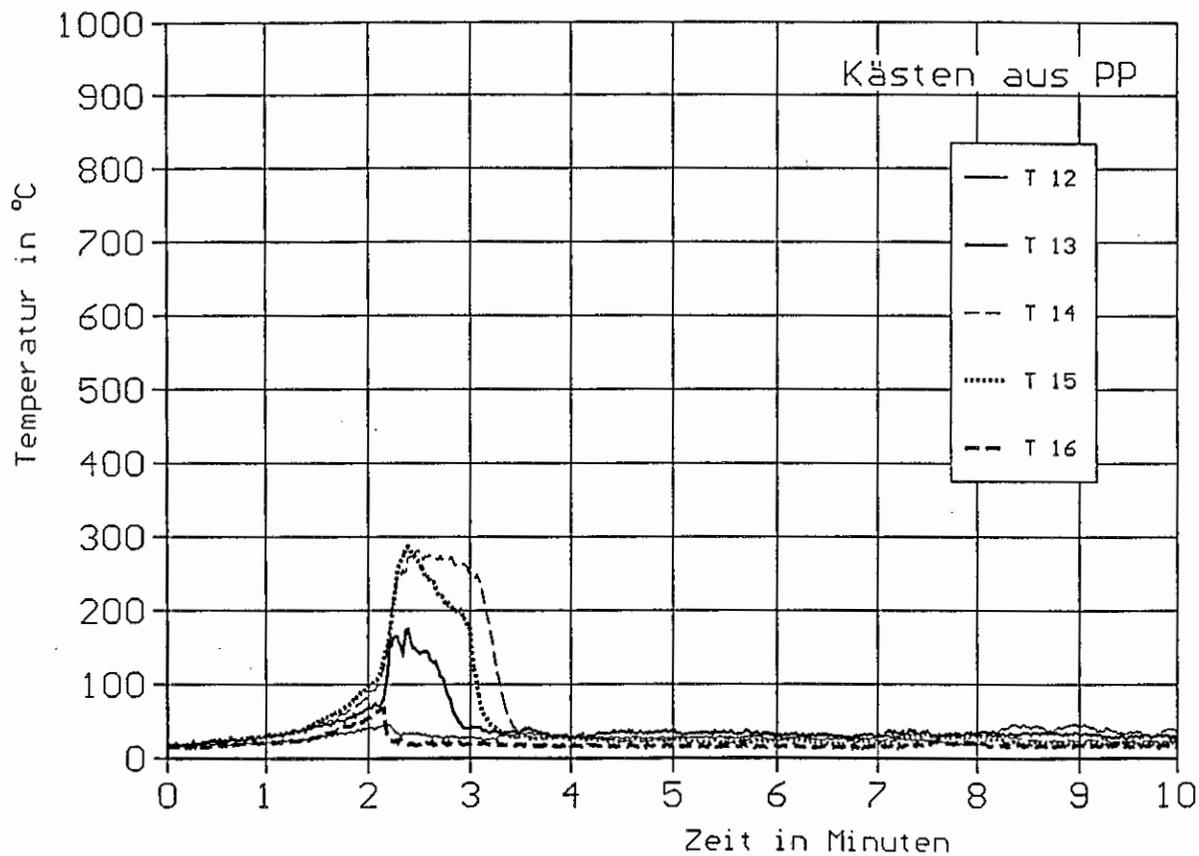


Bild 51: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T12 bis T16.

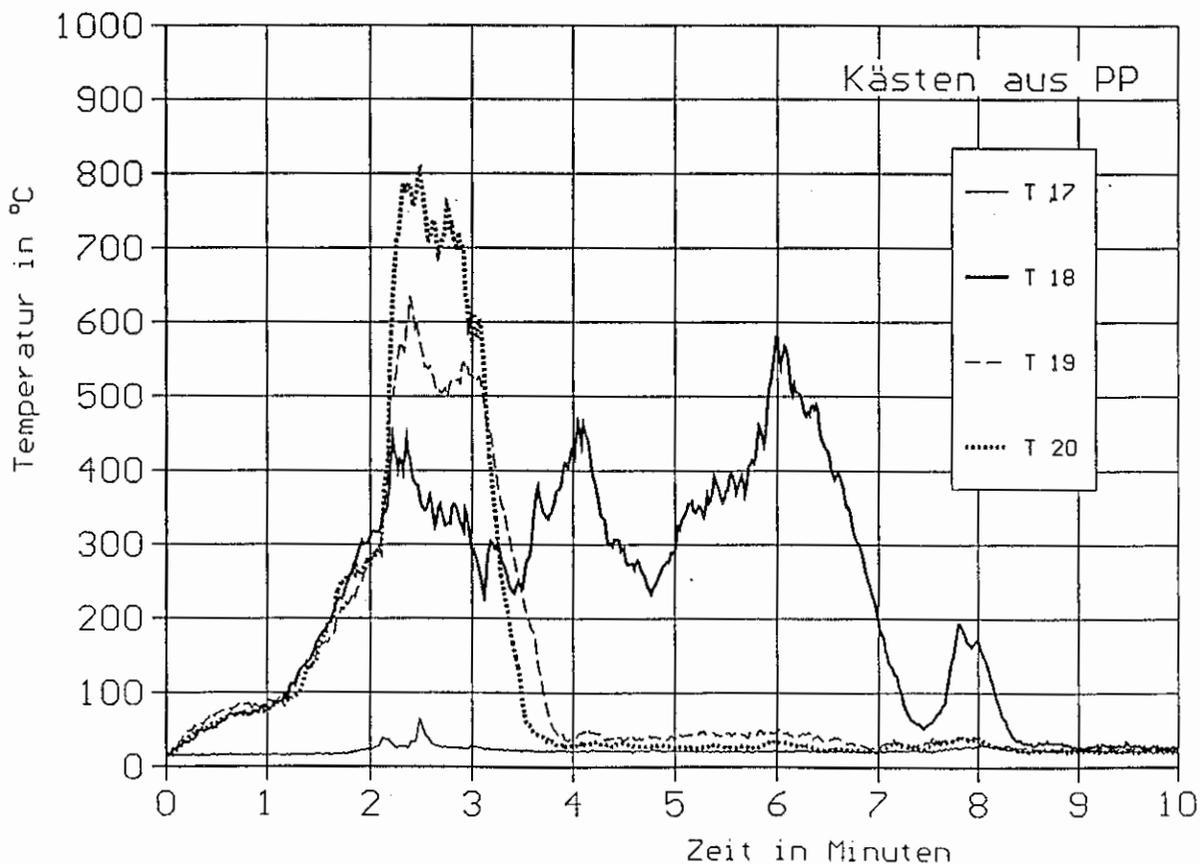


Bild 52: Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen T17 bis T20.