

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen  
Stoffen, die in lagermäßiger Anord-  
nung gestapfelt sind,

88

Teil 11: Großbrandversuche VI -  
Brandausbreitung in Palet-  
tenlagern und Vergleich  
mit Gitterbox- und Block-  
lagerung

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

Forschungsbericht Nr. 88

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 11: Großbrandversuche 6 - Brandaus-  
breitung in Palettenlagern und  
Vergleich mit Gitterbox- und  
Blocklagerung.

von  
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
September 1994

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMELZEICHEN	
1. EINLEITUNG	1
2. VERSUCHSPROGRAMM	2
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	3
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN	4
5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE	6
6. ZUSAMMENFASSUNG	17
7. LITERATURVERZEICHNIS	19
8. TABELLEN UND BILDER	24

# Korrekturen

zu

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer  
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"  
Forschungsbericht Nr. 88

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger  
Anordnung gestapelt sind.

Teil 11: Großbrandversuche 6 - Brandausbreitung in Paletten-  
lagern und Vergleich mit Gitterbox- und Blocklagerung.  
von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

## Seite 15:

statt:  $\bar{H}_u = 15,9 \text{ MJ/kg}$  setze:  $\bar{H}_u = 15,8 \text{ MJ/kg}$

setze:  $\bar{H}_u = 17,2 \text{ MJ/kg}$  setze:  $\bar{H}_u = 18,0 \text{ MJ/kg}$

## Seite 16:

statt:

$$\dot{Q}_{fHW,Pal} = 1000/60 * 0,5 * 15,9 * \dot{M} \quad (7)$$

setze:

$$\dot{Q}_{fHW,Pal} = 1000/60 * 0,5 * 15,8 * \dot{M} \quad (7)$$

statt:

$$\dot{Q}_{fPS,Pal} = 1000/60 * 0,5 * 17,2 * \dot{M} \quad (9)$$

setze:

$$\dot{Q}_{fPS,Pal} = 1000/60 * 0,5 * 18,0 * \dot{M} \quad (9)$$

## Seite 25:

statt:  $\bar{H}_{u, HW, Holzpaletten} = 15,9 \text{ MJ/kg}$

setze:  $\bar{H}_{u, HW, Holzpaletten} = 15,8 \text{ MJ/kg}$

statt:  $\bar{H}_{u, PS, Holzpaletten} = 17,2 \text{ MJ/kg}$

setze:  $\bar{H}_{u, PS, Holzpaletten} = 18,0 \text{ MJ/kg}$

statt: Masse je Holzpalette: 43 kg setze: 22 kg

## Seite 25: Bild 17 austauschen

**Bild 17** Mittlere Wärmefreisetzung  $\dot{Q}_f$  bis zum Löscheinsatz  
bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkon-  
figurationen.

## FORMELZEICHEN

Bl	Blocklager
dt	Differentielles Zeitelement
dz <sub>b</sub>	Differentielles Wegelement in vertikaler Richtung
HL	Stapelbezeichnung s. Bild 1
HR	"
H <sub>u</sub>	Heizwert in MJ/kg
$\bar{H}_u$	Gewichteter Heizwert in MJ/kg
HW	Holzwohle
L	Abstand zwischen den Lagersäulen in m
L <sub>A</sub>	Abstand zwischen Lagersäule und Lageratruppe
LI	Linker Stapel s. Bild 2
M(t)	Masse in kg zum Zeitpunkt t
$\dot{M}$	Abbrandrate in kg/min
$\Delta M$	Abbrandmasse in kg
P <sub>i</sub>	Teilmasse eines Stoffes im Brandgut in kg
p <sub>i</sub>	Massenanteil eines Stoffes im Brandgut
PS	Polystyrol-Partikelschaum
$\dot{Q}$	Wärmestrom in kW
$\dot{Q}_f$	Fühlbarer Wärmestrom in kW
RE	Rechter Stapel s. Bild 2
S	Position des Sprinklers
t	Versuchszeit in min
t <sub>0</sub>	Zeitpunkt, bei dem $\Delta M = 1$ kg beträgt
TE	Thermoelement
T <sub>Max</sub>	Maximale Brandtemperatur in °C
t <sub>H</sub>	Horizontale Entzündungszeit in min
t <sub>z</sub>	Zeit, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel (VR, HL, oder HR) durch Flammenübersprung zündet in min
V <sub>V</sub>	Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min
V <sub>H</sub>	Horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min
VL	Stapelbezeichnung s. Bild 1
VR	"
Z	Position der Zündquelle
z <sub>b</sub>	Höhe, die die Flammenwurzel an dem durch die Zündquelle gezündeten Lagerstapel (VL) erreicht hat in m

$z_2$  Höhe, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel (VR, HL, oder HR) durch Flammenübersprung zündet in m

### **Sonstige Zeichen**

3 3 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel

5 5 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel

|| 2 Parallele Gitterboxenstapel

## 1. EINLEITUNG

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßt sich in einem mehrjährigen Forschungsprogramm mit der qualitativen, aber insbesondere quantitativen Beschreibung der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz mit ortsfesten Wasserlöschanlagen bei gestapelten brennbaren Stoffen.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befassen sich bezüglich der Brandausbreitung mit einer Literaturlauswertung des in- und ausländischen Schrifttums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4,5,6/. Der zugehörige Löscheinsatz wird in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13,14,15,16/ untersucht.

Weiterhin werden die Wechselwirkungen von Einzeltropfen /17/ bzw. von Tropfenschwärmen mit einer realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung theoretisch untersucht /18/ und numerisch simuliert /19/. In /20/ wird die Wasserbeaufschlagung verschiedener Sprinklertypen numerisch simuliert und mit Meßergebnissen verglichen. Weiterhin werden hierin Ergebnisse von Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessungen für verschiedene Sprinklertypen und Betriebsdrücke, die mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator ermittelt wurden, wiedergegeben. Diese Meßergebnisse werden als Anfangs- und Randbedingungen für die numerische Simulation verwendet. In /18/ und /21/ wird hierbei ein über die Angaben in /17/ weiterführender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen aufgeführt, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten für die Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Als Weiterführung der Lagerbrandversuche, die 1989 vorläufig ihren Abschluß fanden (Lageraufbauten siehe Bild 2, 3 und 4) wurden Brand- und Löschversuche in Palettenlagern zunächst ohne Regalsystem gemäß Bild 1 durchgeführt. Diese "Quasi-Blocklagerung" stellt ein erhöhtes Gefährdungspotential wegen der Möglichkeit des Zusammenfallens dar. Auf die Unterschiede zum rein aus Kartons aufgebauten Blocklager wird im weiteren noch näher eingegangen.

Bei den Versuchen mit Palettenlagern wurden verschiedene Sprinklertypen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen eingesetzt und die Löschwirkung und Brandausbreitung untersucht. Auf die Ergebnisse der Löschversuche wird in der Arbeit von Schatz /16/ näher eingegangen.

Das Lagergut und die Zündquelle wurde gemäß den bisherigen Lagerbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (siehe z.B. /2/, /3/, /6/), gewählt, um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erzielen und um eine zu große Variationsbreite bei den Versuchsparametern zu vermeiden.

Bei dem Lagergut handelte es sich um Kartons aus einlagiger Wellpappe mit den Abmessungen 58 cm \* 37 cm \* 34 cm, die auf Holzpaletten gelagert wurden. Die Kartons enthielten leere Stahlblechkanister mit einem Volumen von 30 l. Der zwischen dem Stahlblechkanister und dem Karton verbleibende Zwischenraum wurde mit Holzwolle (HW) oder Polystyrol-Partikelschaum (PS), zwei der am häufigsten verwendeten handelsüblichen Stoßschutzmaterialien ausgefüllt.

Als Paletten wurden Euro-Holzpaletten der Größe 800 mm \* 1200 mm verwendet.

Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen aus den früheren Untersuchungen mit anderen Lageraufbauten (Bild 2, 3 und 4) verglichen.



### 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Für die Durchführung der Brandversuche im Realmaßstab wurde ein Versuchsstand in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet. Der prinzipielle Versuchsaufbau und die Abmessungen für den Palettenlageraufbau sind **Bild 1** zu entnehmen.

Bei den Brandversuchen wurde ein Vorversuch (PAL1) mit einem Palettenstapel und 9 Hauptversuche (Versuch PAL2 bis PAL10) mit je vier Palettenstapeln auf einer Abbrandwaage durchgeführt. Jeder Lagerstapel bestand aus 2 Paletten und 24 gefüllten Kartons. In der Tabelle finden sich nähere Angaben zur Brandlast und Zündquelle, wobei zusätzlich der jeweilige Heizwert  $H_u$  der Einzelkomponenten und der gewichtete Heizwert  $H_u$  der zusammengesetzten angegeben wird.

Als Zündquelle wurde ein mit 50 ml Brennspritus getränkter Weichfaserstab (Länge 150 mm, Querschnitt 18 mm \* 30 mm) verwendet.

Die Abbrandwaage mit den Grundflächenabmessungen 4 m \* 4 m besteht aus einer Trägerkonstruktion, einer Gitterauflage sowie 4 Wägezellen.

Gemessen wurden zeitliche Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen sowie der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse. Die Meßstellen sind **Bild 1** zu entnehmen. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit einer Farb-Video-Anlage aufgezeichnet, um eine Aussage über die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit an der Oberfläche machen zu können.

Die Meßwertregistrierung erfolgte mit einer personalcomputer-gesteuerten Datenerfassungsanlage. Mit Hilfe dieses Rechners wurden die Daten nach dem Versuch ausgewertet.

Die Versuche mit Gitterboxlagern und Blocklagern nach **Bild 2, 3 und 4** werden in /5/ und /6/ näher beschrieben.

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN

Die Lagerstapel wurden an der in Bild 1 dargestellten Position gezündet.

Der Abstand L zwischen den Palettenstapeln betrug 0,2 m.

Bei den Versuchen wurden folgende Beobachtungen gemacht:

Die Flammen breiteten sich am gezündeten Stapel VL zunächst hauptsächlich vertikal nach oben bis zur zweiten Palette aus. An dieser Stelle ergab sich eine erhöhte horizontale Brandausbreitung in den Hohlraum der Palette bei gleichzeitiger Verminderung der vertikalen Brandausbreitung. Das gleiche konnte auch bei den Versuchen mit Gitterboxen HW3 und PS3 (3 Kartons/Gitterbox, siehe z.B. /6/) beobachtet werden. Die vertikale Flammenausbreitung wird durch die unterbrochene Kartonfront gehemmt. Die horizontale Brandausbreitung hat zur Folge, daß das Löschwasser der Sprinkleranlage an dieser verdeckten Stelle relativ wenig zu einer Verminderung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit beiträgt.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen an Palettenlagern kam es bei den meisten Versuchen zu keinem vollständigen Zusammenfallen der Stapel im Gegensatz zu den in /6/ beschriebenen Blocklagerversuchen nach Bild 4. Allenfalls fielen einige Kartons der oberen zweiten Palette zu Boden. Die Holzpaletten behalten sehr lange ihre Stabilität und verkohlen zunächst nur auf der Oberfläche. Die 2. Palette hat durch ihre Druckkraft eine gewisse stabilisierende Wirkung auf die darunterstehenden Kartons der 1. Palette, so daß diese trotz brennender Oberfläche und abnehmender Stabilität auf der Vorderseite nicht wie beim Blocklager (Bild 4, /6/) nach vorne fallen. Die Kartons auf der 1. Palette verbrennen relativ langsam im Vergleich zu den Kartons auf der 2. Palette. Durch die erhöhte horizontale Flammenausbreitung in der 2. Palette und gleichzeitig verzögerter vertikaler Flammenausbreitung verbrennen die Kartons im inneren Bereich der Stapel stärker und verlieren dort ihre Stützwirkung. Die auf der 2. Palette gestapelten Kartons neigen sich also im

Gegensatz zum Blocklager (siehe /6/) nicht nach vorne, sondern nach innen und stützen sich bei geringem Lagerabstand gegenseitig ab. Bei großem Lagerabstand ist allerdings anzunehmen, daß diese gegenseitige Stützwirkung aufgrund der größeren Neigung abnimmt und daß Kartons im Zentrum der 4 Lagerstapel nach unten fallen. Falls es sich hierbei um brennende Kartons handelt, wären diese in der Lage, die Stapel im unteren Bereich zu entzünden.

Bei den Blocklagerversuchen nach Bild 4 war zu erkennen, daß bei der Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum die Lagerstapel schneller zusammenfallen als bei Holzwolle. Dies war zum einen auf eine größere und schnellere Wärmefreisetzung bei PS und damit einer größeren Abbrandgeschwindigkeit zurückzuführen. Dadurch wird der Stapel schneller instabil und neigt sich zunächst im Bereich der Zündquelle wegen der relativ großen Wärmeentwicklung nach vorne. Zum anderen könnte das Rückstandsgerüst, das die Holzwolle bildet, stabilisierend auf den Stapel wirken. Diese Tatsachen sind mit die Hauptursache für die Erhöhung des Gefährdungspotentials beim Blocklager, da benachbarte Brandlast durch Umfallen entzündet wird. Die Stützwirkung von Holzwolle könnte auch bei den Palettenlagerversuchen eine Rolle spielen, konnte jedoch durch das gegenseitige Abstützen der Stapel nicht beobachtet werden.

## 5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

Beim Vergleich aller Versuchsergebnisse bei den unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen ist zu berücksichtigen, daß sich veränderliche Umgebungsbedingungen auf den Brandverlauf und die Löschwirksamkeit auswirken können.

Die Brand- und Löschversuche bis 1989 wurden in einer Versuchshalle mit ungünstigen klimatischen und strömungstechnischen Bedingungen durchgeführt. Die hier beschriebenen Palettenversuche wurden in der neuen Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführt. Wie bereits in /4/ und /5/ erläutert wurde, sind vor allem die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Ventilationsbedingungen für Unterschiede bei der Brandausbreitung und Löschwirksamkeit verantwortlich. Eine erhöhte Umgebungstemperatur hat eine stärkere Vorwärmung der Brandlast, eine Verringerung der Lagergutfeuchte und damit eine schnellere Brandausbreitung zur Folge. Eine erhöhte Luftfeuchtigkeit hat eine erhöhte Lagergutfeuchte und damit eine langsamere Brandausbreitung zur Folge. Ein erhöhter Anteil der durch die Verbrennung freigesetzten Wärme wird für die Verdampfung der Lagergutfeuchte verbraucht, bevor durch Pyrolyse brennbare Gase entstehen können, welche für die weitere Brandausbreitung notwendig sind. Eine erhöhte Lagergutfeuchte macht sich vor allem in der Zünd- und Brandentwicklungsphase bemerkbar und dies insbesondere dann, wenn eine relativ kleine Zündquelle mit einer geringen Wärmefreisetzung verwendet wird. Bedingt durch die Größe des Versuchsstandes ist die Feuchte der Brandlast bei den Versuchen nur schwer konstant zu halten. Variierende Ventilationsbedingungen haben einerseits einen Einfluß auf die Flammen- bzw. Brandausbreitung, andererseits einen Einfluß auf die Auslösezeit der Sprinkler. Beim Vergleich von Versuchsergebnissen aus realen Brandversuchen sind diese Tatsachen zu berücksichtigen.

Um eine Aussage über die Brandausbreitung in einem Lager machen zu können, ist es notwendig, die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit an der Oberfläche und den zeitlichen Verlauf der Abbrand-

masse bzw. die Wärmefreisetzung zu ermitteln.

Analog zu den Untersuchungen in /4/, /5/ und /6/ wird die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit  $v_v$  auf der Oberfläche des Lagergutes in der Weise bestimmt, daß der Zeitpunkt  $t$ , bei dem die Flammenwurzel eine bestimmte Höhe  $z_b$  erreicht hat, anhand der Video-Aufnahmen visuell erfaßt wird.

In **Bild 5** ist die Höhe der Flammenwurzel  $z_b$  an dem mit der Zündquelle gezündeten Stapel als Funktion der Zeit bei den verschiedenen Lagerarten und Lagerkonfigurationen (siehe Tabelle 2) dargestellt.

Zunächst kann man folgende Reihenfolge der Zeiten für  $z_b$  erkennen

$$t_{PS\parallel} < t_{HW\parallel} < t_{PS,Block} \approx t_{HW,Block} < t_{PS5} \approx t_{HW5} < t_{PAL} \ll t_{PS3} < t_{HW3}$$

Man erkennt, daß bei einer geschlossenen Kartonfront wie in den Versuchen  $PS\parallel$  (s. **Bild 2**),  $HW\parallel$  (s. **Bild 2**),  $PS(Block)$  (s. **Bild 4**),  $HW(Block)$  (s. **Bild 4**),  $PS5$  (s. **Bild 3**) und  $HW5$  (s. **Bild 3**) sich zum einen die Flammen am schnellsten ausbreiten zum anderen das Stoßschutzmaterial einen nur sehr geringen Einfluß auf die Flammenausbreitung hat, da sich die Flammen relativ schnell auf der Kartonoberfläche ausbreiten und das Stoßschutzmaterial noch wenig zur Brandausbreitung beiträgt. Allerdings ist eine geringfügig schnellere Flammenausbreitung bei Polystyrol-Partikelschaum gegenüber Holzwolle bedingt durch den höheren Heizwert und die damit verbundene größere Wärmefreisetzung erkennbar. Die Unterschiede zwischen den Versuchen mit 5 Kartons pro Gitterbox ( $HW5$ ,  $PS5$ ) und den Blocklagerversuchen ( $HW(Block)$ ,  $PS(Block)$ ) sind hierbei sehr gering. Bisher nicht zu erklären ist, daß bei den Palettenversuchen die Flammenausbreitung bei Holzwolle in einem Versuch ( $PAL5$ ) langsamer, in zwei Versuchen ( $PAL8$ ,  $PAL9$ ) schneller als bei Polystyrol-Partikelschaum ist. Eine möglich Ursache hierfür ist eine evtl. unterschiedliche Feuchte der Brandlast. Wie Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gezeigt haben, ist

insbesondere die Feuchte von Holz eine nur schwer kalkulierbare Größe. Bei den Versuchen PS|| und HW|| machen sich besonders die längere Zündquelle (600 mm), die Zündung zwischen den Stapeln sowie die stärkere Aufheizung des Luftvolumens im Zwischenbereich in einer schnelleren Flammenausbreitung bemerkbar. Bei den Versuchen mit unterbrochener Kartonfront (PAL2 bis PAL10, HW3, PS3, siehe Tabelle 2) wird die vertikale Flammenausbreitung an diesen Stellen deutlich behindert. Am deutlichsten tritt dieses bei den Versuchen HW3 und PS3 auf, zum einen wegen des großen freien Abstandes, zum anderen wegen der Gitterboxen, die die Wärme ableiten. Bei den Palettenversuchen ergibt zum einen der kleinere freie Abstand gegenüber den Versuchen mit Gitterboxen, zum anderen das brennbare Holz eine schnellere Flammenausbreitung. Bei allen Versuchen ist erkennbar, daß die Kurven mit zunehmender Höhe schneller ansteigen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die heißen aufsteigenden Rauchgase die Oberfläche im oberen Bereich vorheizen, so daß es zu einer schnelleren Flammenausbreitung kommt.

Deutlich wird dies auch bei der Auswertung der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit  $v_v$ , d.h. der Geschwindigkeit, mit der sich die Flammenwurzel auf der Kartonoberfläche ausbreitet. Diese ergibt sich durch Differentiation zu

$$v_v = dz_b/dt . \quad (1)$$

Es wurden die Differenzenquotienten jeweils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wertepaaren explizit ausgerechnet. Aus diesen Differenzenquotienten wurden für die jeweiligen Versuche arithmetische Mittelwerte ermittelt und in **Bild 6** dargestellt. Diese Werte wurden wiederum für die Palettenversuche und diversen Gitterboxversuche (s. Tabelle 2) in arithmetischen Mittelwerten zusammengefaßt:

Mittelwert:	PS  , HW	= 6,1 m/min
"	PS(Block), HW(Block)	= 1,7 m/min
"	HW5, PS5	= 1,6 m/min
"	Palettenversuche	= 1,4 m/min
"	HW3, PS3	= 1,2 m/min

Auch durch diese Werte werden die obigen Aussagen bestätigt, daß die höchste vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei einer geschlossenen Kartonfront auftritt. Einen bedeutenden Einfluß hat die Lage der Zündquelle, wie aus den Versuchen PS|| und HW|| erkennbar ist.

Die Zeit  $t_z$ , bei der sich die angrenzenden Lagerstapel durch Wärmeübertragung (Strahlung, Konvektion) oder Flugfeuer in der Höhe  $z_z$  bei den verschiedenen Lagerarten und Lagerkonfigurationen entzünden, ist für den Stapel HL in Bild 7, für den Stapel VR in Bild 8 und für den Stapel HR in Bild 9 dargestellt. Bei früheren Untersuchungen hat sich gezeigt, daß z.B. ein brennendes wegfliegendes Kartonstück nur dann in der Lage ist, einen benachbarten Stapel an der vertikalen Fläche zu entzünden, wenn durch Strahlungs- und Konvektionswärme der Stapel soweit aufgeheizt worden ist, daß brennbare Zersetzungsprodukte entstehen. Zum Vergleich wurden zusätzlich auch die Versuche mit nur zwei Gitterboxenstapeln (PS||, HW||) aufgeführt. In den Diagrammen bedeutet der Wert Null, daß keine Zündung erfolgte. Bei den Versuchen ergeben sich bezüglich der Zeiten und Höhen für die Brandausbreitung auf den angrenzenden Stapel folgende Reihenfolgen:

Stapel HL:

Zeit:

$$t_{Z,PS||} < t_{Z,HW||} < t_{Z,PS,PAL} < t_{Z,PS3} < t_{Z,PS5} < t_{Z,HW,PAL} < t_{Z,HW5} < t_{Z,HW3}$$

Höhe:

$$z_{Z,PS||} = z_{Z,HW||} < z_{Z,PS5} < z_{Z,PS3} < z_{Z,PS,PAL} \approx z_{Z,HW,PAL} < z_{Z,HW5} < z_{Z,HW3}$$

Stapel VR:

Zeit:

$$t_{Z,PS||} < t_{Z,HW||} < t_{Z,HW,PAL} \approx t_{Z,PS,PAL} < t_{Z,PS3} < t_{Z,PS5} < t_{Z,HW3} < t_{Z,HW5}$$

Höhe:

$$z_{Z,PS||} < z_{Z,HW||} < z_{Z,PS3} < z_{Z,HW3} < z_{Z,HW,PAL} \approx z_{Z,PS,PAL} < z_{Z,PS5} = z_{Z,HW5}$$

Stapel HR:

Zeit:

$$t_{Z,PS||} < t_{Z,HW||} < t_{Z,PS,PAL} < t_{Z,HW,PAL}$$

Höhe:

$$z_{Z,PS\parallel} = z_{Z,HW\parallel} < z_{Z,PS,PAL} = z_{Z,HW,PAL}$$

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, wird bei den hier durchgeführten Versuchen und der dabei angewendeten Zündung vorwiegend der Stapel HL und der Stapel VR, mit geringerer Wahrscheinlichkeit der Stapel HR entzündet. Aus allen Versuchen mit 4 Stapeln wurde aus den Zeiten und Höhen jeweils der arithmetische Mittelwert gebildet. Für die einzelnen Stapel ergeben sich hierbei folgende Werte:

Stapel	Zeit [min]	Höhe [m]
VR	4,91	1,8
HL	5,23	1,8
HR	5,24	1,7

Es zeigt sich weiterhin, daß der Zündort, die Lagerart und die stoffliche Zusammensetzung des Lagers für die Schnelligkeit der Zündung der einzelnen Stapel von Bedeutung ist. Dies zeigt sich besonders beim schnellen Flammenübersprung bei den Versuchen PS $\parallel$  und HW $\parallel$ . Hier macht sich besonders die Lage der Zündquelle zwischen den Stapeln und die höhere Wärmefreisetzung bei Polystyrol-Partikelschaum bemerkbar. Dies zeigt sich auch in der von allen Versuchen geringsten Höhe  $z_z$ . Allgemein ist eine Tendenz bei allen Versuchen erkennbar, daß bei Polystyrol-Partikelschaum eine schnellerer Flammenübersprung erzielt wird. Weiterhin besteht eine Tendenz, daß bei den Palettenversuchen kürzere Zeiten  $t_z$  bis zum Flammenübersprung als bei den Gitterboxversuchen auftreten. Bedingt durch die Hohlräume in den Paletten ist eine relativ schnelle Flammenausbreitung in horizontaler Richtung möglich. Auch wird hierdurch die Strömung der heißen Rauchgase begünstigt, wodurch benachbarte Stapel durch Konvektion aufgeheizt werden. Gegenüber den Gitterboxversuchen HW3 und PS3 sind bei den Palettenversuchen die vertikalen freien Abstände geringer, so daß es auch zu einer schnelleren Flammenausbreitung in vertikaler Richtung kommt. Einen weiteren Einfluß haben die brennbaren Paletten gegenüber den nichtbrennbaren Gitterboxen. Alle diese Einflüsse machen sich auch in geringeren



Zündhöhen bei den Palettenversuchen gegenüber den Gitterboxversuchen bemerkbar.

**Bild 10** zeigt die horizontale Ausbreitung der Flammen im Zwischenraum der 2. Palette als Funktion der Zeit beim Stapel VL, **Bild 11** nach dem Flammenübersprung beim Stapel HL. Die Flammen breiten sich hierbei zunächst hauptsächlich auf der Unterseite der auf der Palette stehenden Kartons aus, wobei jedoch auch das etwas später sich entzündende Holz der Palette einen Einfluß auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. Da diese Zeiten rein visuell über Videoaufnahmen bestimmt worden sind, ergaben sich besonders beim Stapel HL durch Sichtbehinderung nach dem Öffnen des Sprinklers Probleme bei der Zeitnahme. Hierdurch werden auch nur wenige Kurven, die teilweise unvollständig sind, dargestellt. Man erkennt, daß die Kurven relativ linear ansteigen. Dies bedeutet ein relativ konstante Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung. Bezüglich des Einflusses des Stoßschutzmaterials ist kein gravierender Unterschied zwischen Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum zu erkennen.

Wie bei der Bestimmung der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit wurden auch für die Berechnung der horizontalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit die Differenzenquotienten jeweils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wertepaaren explizit ausgerechnet. Aus diesen Differenzenquotienten wurden für die jeweiligen Versuche arithmetische Mittelwerte ermittelt und in **Bild 12** für den Stapel VL und in **Bild 13** für den Stapel HL dargestellt. Man erkennt, daß die horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit aufgrund des fehlenden thermischen Auftriebes wesentlich niedriger als die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (siehe **Bild 6**) ist. Bezüglich Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum können keine eindeutigen Unterschiede festgestellt werden. Der dominierende Effekt für die horizontale Flammenausbreitung ist hierbei das Fortschreiten der Pyrolysefront zwischen Kartonunterseite und Holzpalette, wobei das Stoßschutzmaterial fast keinen Einfluß hat. Man erkennt weiterhin, daß nach dem Flammenübersprung auf den Stapel HL (**Bild 13**) die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit niedriger als beim Stapel

VL (Bild 12) ist. Wie Bild 7 zeigt, erfolgt der Flammenübersprung des Stapels HL oberhalb der 2. Palette bei der Höhe  $z_2$  von ca. 1,8 m. Wie die Auswertung der Videoaufnahmen gezeigt hat, dauert es mehr oder weniger lange, bis sich die Flammen von dieser Stelle aus nach unten bis zur 2. Palette (Höhe 1,32 m) ausgebreitet haben. Dies geschieht um so schneller, je stärker die Oberfläche durch die bereits brennenden Stapel aufgeheizt wurde und je mehr brennbare Pyrolysegase bereits gebildet wurden. Die horizontale Flammenausbreitung im Hohlraum der 2. Palette des Stapels HL wird weiterhin dadurch behindert, daß dieser Stapel zunächst vorwiegend oberhalb der 2. Palette brennt. Die thermische Auftriebsströmung im Kamin zwischen den Stapeln bewirkt, daß ein Unterdruck entsteht, der der Ausbreitung der heißen Rauchgase in diesem Zwischenraum entgegenwirkt.

Ein weiteres Maß für die Ausbreitung eines Brandes ist die zeitliche Massenabnahme des Lagergutes während der Verbrennung. In den folgenden Untersuchungen wird vorwiegend der Zeitraum bis zum Löscheinsatz der Sprinkleranlage betrachtet. Die Abbrandmasse  $\Delta M$  ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse  $M_a$  und der noch nicht verbrannten Masse der gelagerten Stoffe zum Zeitpunkt  $t$  zu

$$\Delta M = M_a - M(t) . \quad (2)$$

Um die einzelnen Versuche bzgl. des zeitlichen Verlaufes der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung vergleichen zu können, wird analog zu den früheren Untersuchungen von Brein /2, 3/ und Kunkelmann /5, 6/ die Änderung der obengenannten Werte auf den Zeitpunkt  $t_0$  bezogen.  $t_0$  ist hierbei der Zeitpunkt, bei dem die Abbrandmasse  $\Delta M = 1$  kg beträgt. Nach diesem Zeitpunkt kann die unregelmäßige Zündphase näherungsweise als abgeschlossen betrachtet werden.

Die aus den Versuchen ermittelten Werte für die Zeit  $t_0$  sind in Bild 14 für die verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien aufgetragen. Die Zeiten liegen im Bereich zwischen 1,18 min und 4,2 min, wobei die niedrigsten Werte bei

den Untersuchungen nach /5/ (Versuchsdurchführung entsprechend Bild 2) aufgrund der größeren Zündquelle, der Zündung zwischen den Stapeln und der damit verbundenen schnelleren Abbrandgeschwindigkeit auftreten. Aus Bild 14 ergibt sich folgende Reihenfolge der Zeit  $t_0$  für die verschiedenen Lagerkonfigurationen:

$$t_{0,PS\parallel} < t_{0,HW\parallel} < t_{0,HW,Block} < t_{0,HW5} < t_{0,PS,PAL} \approx t_{0,HW,PAL} < t_{0,PS,Block} < t_{0,PS3} < t_{0,PS5} < t_{0,HW3}$$

Die Bilder 15.1 und 15.2 zeigen den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten. Bild 15.2 stellt hierbei eine Ausschnittsvergrößerung von Bild 15.1 dar, da vor allem die Palettenversuche in diesem Bereich relativ dicht beieinander liegen. Die teilweise recht unterschiedliche Größe der Abbrandmasse hängt hauptsächlich von der Lagerkonfiguration, der stofflichen Zusammensetzung, dem Zündort, den Ventilationsbedingungen und dem Löscheintritt des jeweiligen Sprinklers ab. Wie bereits erwähnt, wird der Löscheintritt in den Arbeiten von Schatz (s. Literaturverzeichnis) näher untersucht.

An dieser Stelle soll daraufhingewiesen werden, daß es ohne Löscheintritt zum einen zu einem vollständigen Abbrand des Lagerstapels kommt, zum anderen ergeben sich abweichende Verläufe von Temperatur- und Abbrandkurven. Dies hat Auswirkungen auf die errechneten Mittelwerte, wie z.B. auf die mittlere Abbrandrate oder die Wärmefreisetzung.

Aus Bild 15.1 ist eine Tendenz für die folgende Reihenfolge der zeitlichen Verläufe der Abbrandmasse zu erkennen:

$$PS\parallel < HW\parallel < PS(Block) \approx PAL < HW(Block) < PS3 < PS5 < HW3 < HW5$$

Die zeitliche Abbrandrate ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \frac{dM}{dt} = \dot{M} \quad (3)$$

Aus den Meßwerten für den zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse wurden die Differenzenquotienten jeweils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wertepaaren explizit ausgerechnet. Aus diesen Differenzenquotienten (Abbrandrate) werden für die jeweiligen Versuche die arithmetischen Mittelwerte ermittelt und in Bild 16 dargestellt.

Man erkennt, daß die beiden höchsten Werte bei der Anordnung nach Bild 2 mit 2 parallelen Gitterboxen, sowie den Bocklagerversuchen nach Bild 4 auftreten. Im mittleren Bereich bewegen sich die Palettenlager, am geringsten ist die Abbrandrate bei den Gitterboxlagern.

Nach Brein /2/ ergibt sich der Zusammenhang zwischen der in der Zeiteinheit freigesetzten Wärmemenge, d.h. dem Wärmestrom  $\dot{Q}$  und der Abbrandrate  $\dot{M}$  für einen homogenen Stoff bei vollständiger, also stöchiometrischer Verbrennung bei Ausnutzung des gesamten zur Verfügung stehenden Heizwertes  $H_u$  zu

$$\dot{Q} = \dot{M} \cdot H_u \quad (4)$$

Bei einer aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Brandlast sind die Massenströme und Heizwerte der Einzelkomponenten zu berücksichtigen, was aber insbesondere in einem fortgeschrittenen Brandstadium nicht mehr möglich ist. Auf dieses Problem und auf die Betrachtung der Wärmebilanz am brennenden Lagerstapel wird in /2/ näher eingegangen. Die gemessenen Abbrandkurven charakterisieren daher das Abbrandverhalten der gesamten Brandlast, da schon nach kurzer Zeit die Trennung der Vorgänge auf die verschiedenen Komponenten nicht mehr möglich ist.

Für den Heizwert wird daher näherungsweise der gewichtete Heizwert aus den Komponenten der Brandlast eingesetzt. Dieser ergibt sich nach folgender Beziehung

$$\bar{H}_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i H_{u,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n p_i H_{u,i} \quad (5)$$

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist wesentlich geringer als der nach der Formel errechnete Wärmestrom. Die Heizwerte  $H_{u,i}$  werden wegen Rußbildung, hervorgerufen durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung sowie durch Sauerstoffmangel und durch nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe nicht erreicht. Zusätzlich wird Wärme an die Umgebung in Form von Strahlung abgeführt. Der Restwärmestrom (fühlbarer Wärmestrom)  $\dot{Q}_f$  beträgt nach /2/ je nach verwendetem Lagergut und geometrischer Anordnung ca. 35 % bis 50 % des theoretischen Wertes. Der fühlbare Wärmestrom ist der Wärmestrom, der oberhalb des brennenden Lagerstapels auftritt und der im wesentlichen sowohl für das Ansprechen von thermisch wirkenden Auslöseelementen einer Löschanlage verantwortlich ist als auch bei der thermischen Auslegung von Decken oder Dächern von Lagergebäuden berücksichtigt werden muß.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 1 angegebenen Massen  $P_i$  und Heizwerte  $H_{u,i}$  erhält man für den Lageraufbau mit Gitterboxen, Kartons und Holzwolle einen Wert von  $\bar{H}_u = 15,4$  MJ/kg bzw. bei Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum einen Wert von  $\bar{H}_u = 22,0$  MJ/kg. Die gleichen Werte gelten für die durchgeführten Blocklagerversuche. Bei den Palettenversuchen macht sich der erhöhte Anteil von Holz beim Heizwert bemerkbar. Bei Verwendung des Stoßschutzmaterialies Holzwolle ergibt sich hierbei ein Wert von  $\bar{H}_u = 15,9$  MJ/kg bzw. bei Polystyrol-Partikelschaum ein Wert von  $\bar{H}_u = 17,2$  MJ/kg. Für die Abminderung des theoretischen Wärmestromes wird nach /2/ ein Wert von 50 % angenommen. Damit ergibt sich der fühlbare Wärmestrom bei Verwendung von Holzwolle als Stoßschutzmaterial bei Gitterboxlagerung bzw. Blocklagerung

$$\dot{Q}_{fHW,G,BI} = 1000/60*0,5*15,4*\dot{M} \quad (6)$$

bzw. bei Palettenlagerung

$$\dot{Q}_{fHW,Pal} = 1000/60*0,5*15,9*\dot{M} \quad (7)$$

Für Polystyrol-Partikelschaum ergeben sich die entsprechenden Gleichungen

$$\dot{Q}_{fPS,G,BI} = 1000/60*0,5*22,0*\dot{M} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{fPS,Pal} = 1000/60*0,5*17,2*\dot{M} \quad (9)$$

mit  $\dot{Q}_f$  in kW und  $\dot{M}$  in kg/min.

Aus der mittleren Abbrandgeschwindigkeit nach Bild 16 ergibt sich damit die mittlere Wärmefreisetzung  $\dot{Q}_f$  nach Bild 17. Auch hierbei ergeben sich die gleichen Tendenzen wie bei der mittleren Abbrandgeschwindigkeit. Durch den Einfluß des Heizwertes ergeben sich die größeren Wärmefreisetzungen bei Lagern mit Polystyrol-Partikelschaum.

Bild 18 zeigt die maximalen Brandtemperaturen, die bei den jeweiligen Versuchen aufgetreten sind sowie den dazugehörigen Zeitpunkt. Weiterhin wird die Temperaturmeßstelle TE (s. Bild 1, 2, 3 und 4) sowie der jeweilige Stapel aufgeführt. Man erkennt, daß in den Palettenlagern die höchste Temperatur vorwiegend am Stapel VR und hier insbesondere im oberen Bereich (TE23 bis TE 25), bei den Gitterboxlagern vorwiegend am Stapel VL und HL auftritt. Bei den Gitterboxlagern dauert es am längsten, bis diese Temperatur erreicht wird. Bei den parallelen Gitterboxensäulen treten die höchsten Temperaturen innerhalb kurzer Zeit im oberen Bereich der Stapel auf. Bei den Blocklagern ist keine eindeutige Aussage möglich. Die Zeiten liegen hier im Bereich der Zeiten der Palettenlager.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Als Fortsetzung der bisherigen Lagerbrandversuche wurde in der neuen Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik damit begonnen, Brand- und Löschversuche mit Palettenlagern durchzuführen.

Für den Aufbau der Palettenlager wurden Euro-Holzpaletten verwendet. Das Lagergut und die Zündquelle wurde gemäß den bisher durchgeführten Lagerbrandversuchen gewählt, um einen Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen zu ermöglichen.

Gemessen wurden zeitliche Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen sowie der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit einer Farb-Video-Anlage aufgezeichnet, um eine Aussage über die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit an der Oberfläche machen zu können.

Die Meßwertregistrierung erfolgte mit einer personalcomputer-gesteuerten Datenerfassungsanlage. Mit Hilfe dieses Rechners wurden die Daten nach dem Versuch ausgewertet.

Bezüglich der Flammenausbreitung auf der Oberfläche konnte hierbei folgendes festgestellt werden: Die Flammenausbreitung auf der Oberfläche in vertikaler Richtung erfolgt am schnellsten, wenn es sich um eine nicht durch Zwischenräume, wie z. B. leere Gitterboxen oder Paletten unterbrochene Oberfläche handelt. Sind Zwischenräume vorhanden, breiten sich die Flammen verstärkt in horizontaler Richtung aus. Die Flammenausbreitung in horizontaler Richtung erfolgt jedoch, bedingt durch den fehlenden thermischen Auftrieb, wesentlich langsamer als in vertikaler Richtung.

Als ein weiteres Maß für die Brandausbreitung dient der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse und die hieraus ermittelte Abbrandrate und Wärmefreisetzung. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Parameter bis zum Löscheinsatz betrachtet. Der teilweise recht unterschiedliche Verlauf der Abbrandmasse sowie deren Größe hängt hauptsächlich von der Lagerkonfiguration, der stoff-

lichen Zusammensetzung, dem Zündort, den Ventilationsbedingungen und dem Löscheintritt ab. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die Abbrandrate bei der Zündung zwischen zwei parallelen Gitterboxen und bei Blocklagerung am größten ist. Am geringsten ist die Abbrandrate bei der Gitterboxlagerung. Die Abbrandrate bei der Palettenlagerung liegt zwischen diesen Lagerarten.



## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 1: Literaturlauswertung.  
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /2/ Brein, D.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 2: Großbrandversuche 1.  
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986)
- /3/ Brein, D.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 3: Großbrandversuche 2.  
Forschungsbericht Nr. 64 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)
- /4/ Kunkelmann, J.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 4: Großbrandversuche 3.  
Forschungsbericht Nr. 65 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)
- /5/ Kunkelmann, J.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 5: Großbrandversuche 4.  
Forschungsbericht Nr. 68 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien

der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1989)

- /6/ Kunkelmann, J.:  
Brandausbreitung bei verschiedenen  
Stoffen, die in lagermäßiger An-  
ordnung gestapelt sind.  
Teil 6: Großbrandversuche 5.  
Forschungsbericht Nr. 72 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1989)
- /7/ Schatz, H.:  
Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 1: Literaturlauswertung und  
Errichtung der Versuchsanlage.  
Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik 1985.
- /8/ Schatz, H.:  
Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 3: Entwicklung und Einsatz von  
Sprinklern.  
Forschungsbericht Nr. 57 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1986)
- /9/ Schatz, H.:  
Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 4: Löscheversuche mit Sprinklern 1.  
Forschungsbericht Nr. 62 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1987)
- /10/ Schatz, H.:  
Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 5: Löscheversuche mit Sprinklern 2.  
Forschungsbericht Nr. 67 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1988)

/11/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 6: Löschversuche mit Sprinklern 3.  
Forschungsbericht Nr. 70 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1989)

/12/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 7: Literaturlauswertung und  
Simulation der Wasserbeaufschlagung.  
Forschungsbericht Nr. 74 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1990)

/13/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 8: Literaturlauswertung und  
Simulation der Wasserbeaufschlagung.  
Forschungsbericht Nr. 78 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß  
Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1991)

/14/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 9: Messung und Simulation der  
Wasserbeaufschlagung - Flüssigkeits-  
verteilungen - Bestimmung von Tropfen-  
größen.  
Forschungsbericht Nr. 82 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-  
wehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1992)

/15/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 10: Literaturlauswertung -  
Tropfenverteilungen - Löschversuche.  
Forschungsbericht Nr. 85 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-  
wehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für

Brandschutztechnik (1993)

- /16/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen. Teil 11: Literaturlauswertung - Sprinklereinsatz bei Palettenlagern. Forschungsbericht Nr. 87 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1994)
- /17/ Schatz, H.  
Kunkelmann, J.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen. Teil 2: Literaturübersicht und Berechnungsgrundlagen für die Wärmeübertragung bei Tropfen in einer Heißgasströmung. Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /18/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 7: Literaturübersicht über die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung. Forschungsbericht Nr. 76 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1990)
- /19/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung. Forschungsbericht Nr. 80 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)
- /20/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.

Teil 9: Simulation der Wasserbeaufschlagung eines Sprinklers.  
Forschungsbericht Nr. 83 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)

/21/ Kunkelmann, J.:

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 10: Weiterführende Literaturübersicht über die Brandausbreitung sowie über die Wechselwirkungen des Tropfenschwarmes eines Sprinklers mit einer Heißgasströmung.  
Forschungsbericht Nr. 84 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1993)

**8. TABELLEN UND BILDER**

**Tabelle 1: Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes**

Heizwerte der Einzelkomponenten:

H <sub>u</sub> Weichfaser	16 MJ/kg
H <sub>u</sub> Äthylalkohol	25 MJ/kg
H <sub>u</sub> Karton	15 MJ/kg
H <sub>u</sub> Polystyrol	40 MJ/kg
H <sub>u</sub> Holzwolle	16 MJ/kg
H <sub>u</sub> Holz	16 MJ/kg

Gewichtete Heizwerte bei den Lageraufbauten:

$\bar{H}_u$ , HW, Gitterbox	15,4 MJ/kg
$\bar{H}_u$ , PS, Gitterbox	22,0 MJ/kg
$\bar{H}_u$ , HW, Block	15,4 MJ/kg
$\bar{H}_u$ , PS, Block	22,0 MJ/kg
$\bar{H}_u$ , HW, Holzpaletten	15,9 MJ/kg
$\bar{H}_u$ , PS, Holzpaletten	17,2 MJ/kg

Massen pro Karton:

Kanister aus Weißblech	1,71 kg
Karton	0,64 kg
Holzwolle	0,38 kg
Polystyrol	0,25 kg

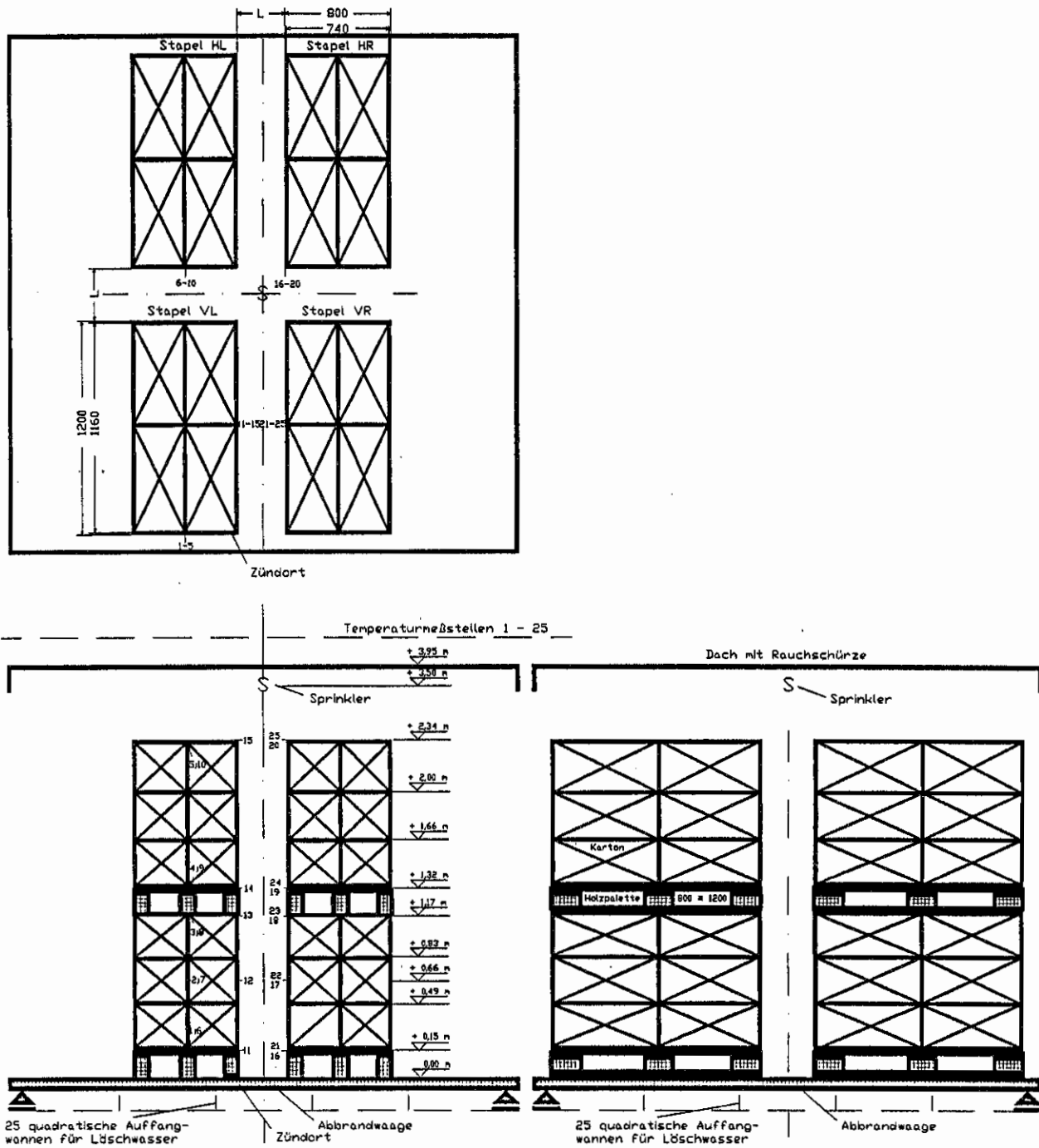
Masse je Holzpalette: 43 kg

Masse Weichfaserstab: 0,02 kg zuzüglich 50 ml Äthylalkohol

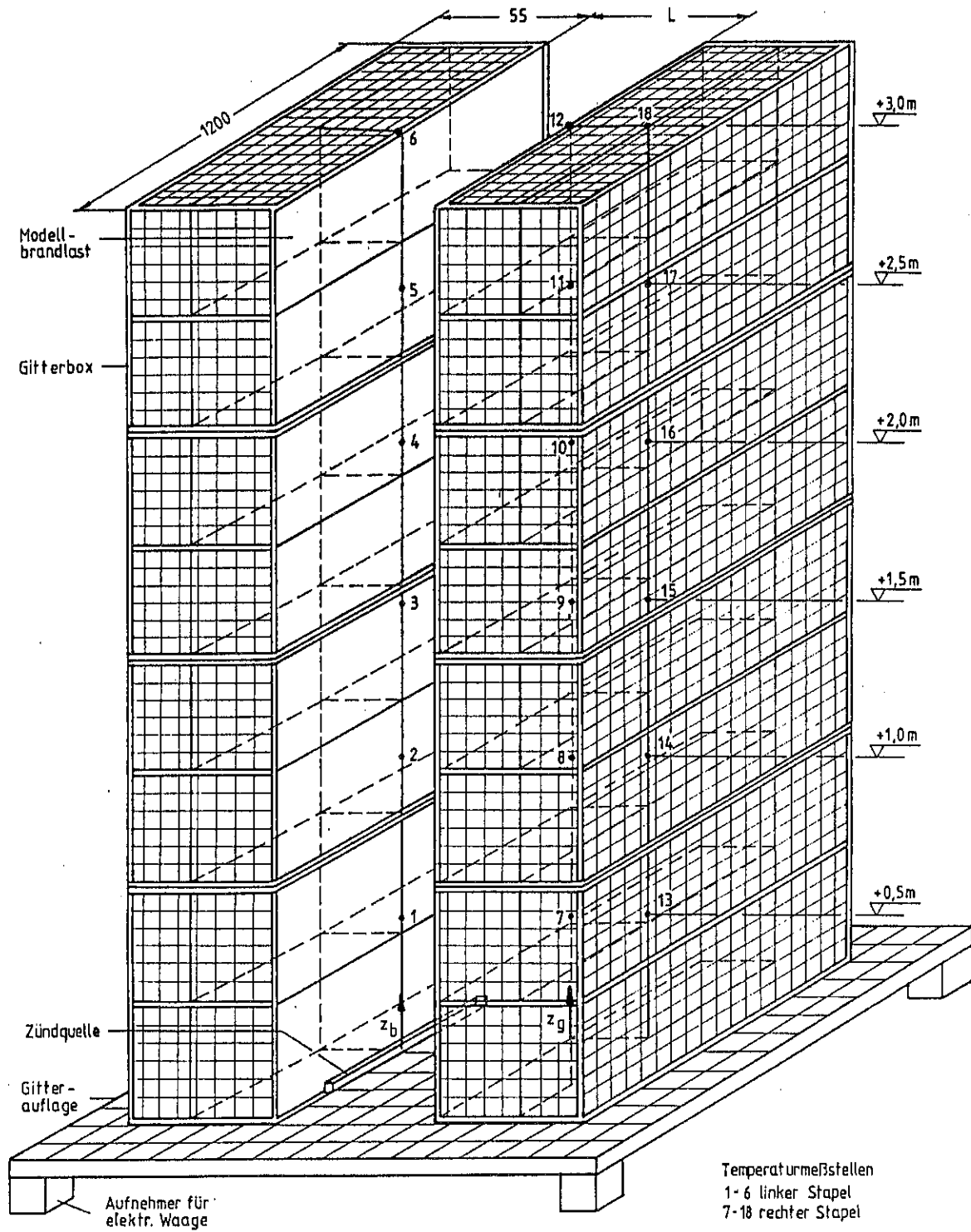
**Tabelle 2: Zusammenstellung der Lagerarten und Lagerkonfigurationen**

Versuchsbezeichnung	Forschungsbericht Nr./Literaturangabe
PS	68 /5/
HW	68 /5/
PS3	72 /6/
PS5	72 /6/
HW3	72 /6/
HW5	72 /6/
HW,Block	72 /6/
PS,Block	72 /6/
PAL2 (PS)	88
PAL3 (PS)	88
PAL4 (PS)	88
PAL5 (HW)	88
PAL6 (PS)	88
PAL7 (PS)	88
PAL8 (HW)	88
PAL9 (HW)	88
PAL10 (PS)	88

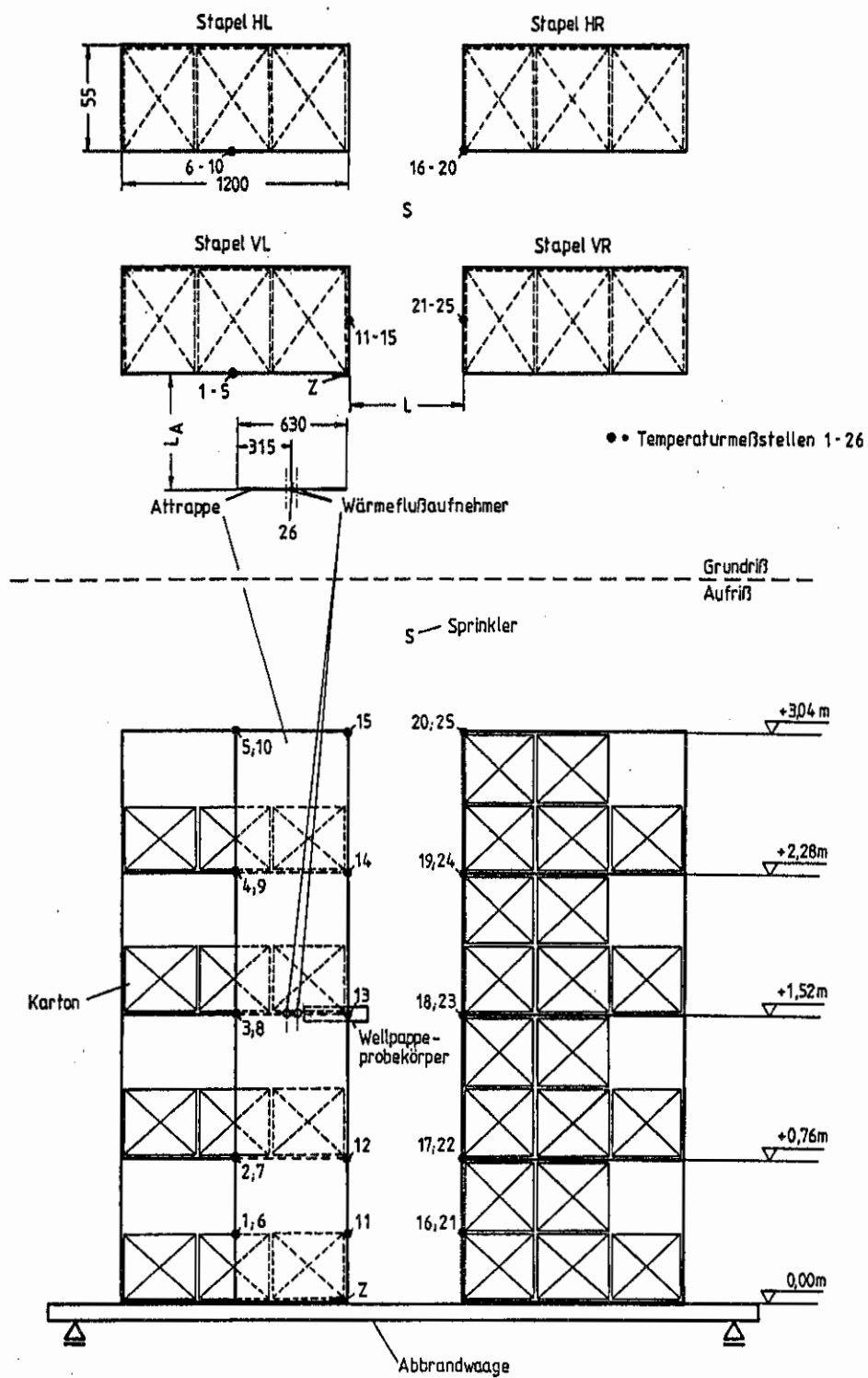




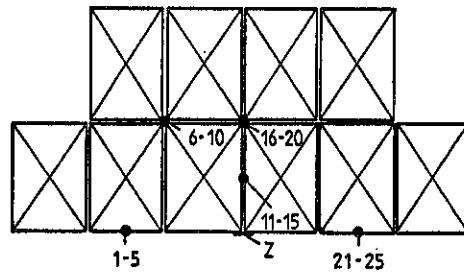
**Bild 1** Palettenlager (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen).



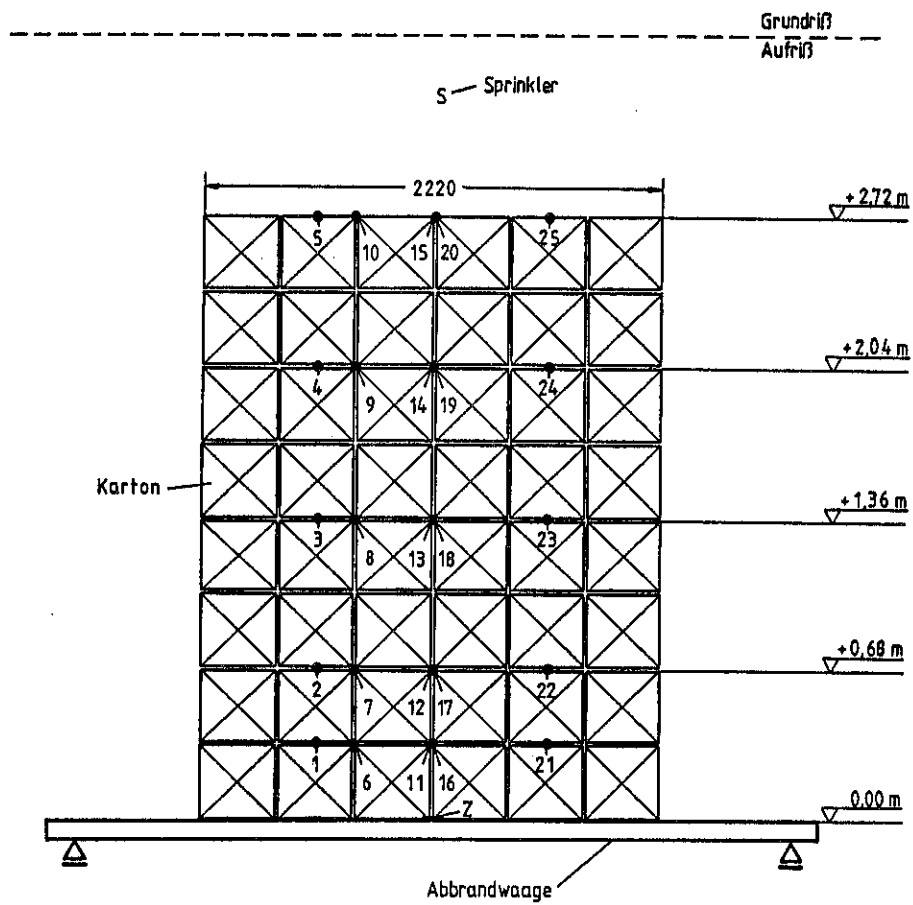
**Bild 2** Gitterboxlager - 2 Stapel (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /5/.



**Bild 3** Gitterboxlager - 4 Stapel (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /6/.



• Temperaturmeßstellen 1-25



**Bild 4** Blocklager (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /6/.

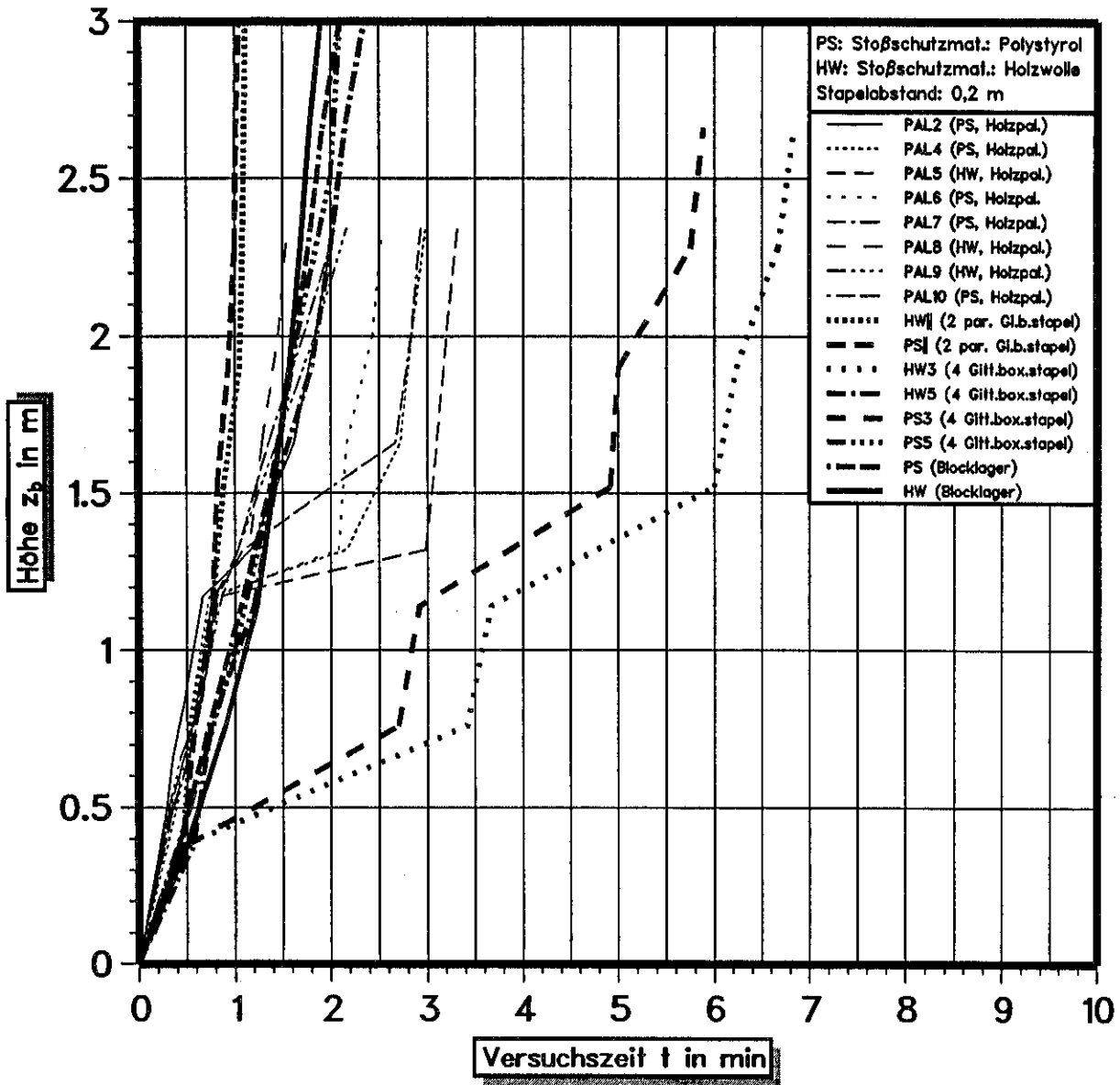


Bild 5 Höhe der Flammenwurzel  $z_b$  an dem mit der Zündquelle gezündeten Stapel als Funktion der Zeit  $t$  bei den verschiedenen Lagerarten und Lagerkonfigurationen.

Mittlere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in m/min

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle  
Stapelabstand: 0,2 m

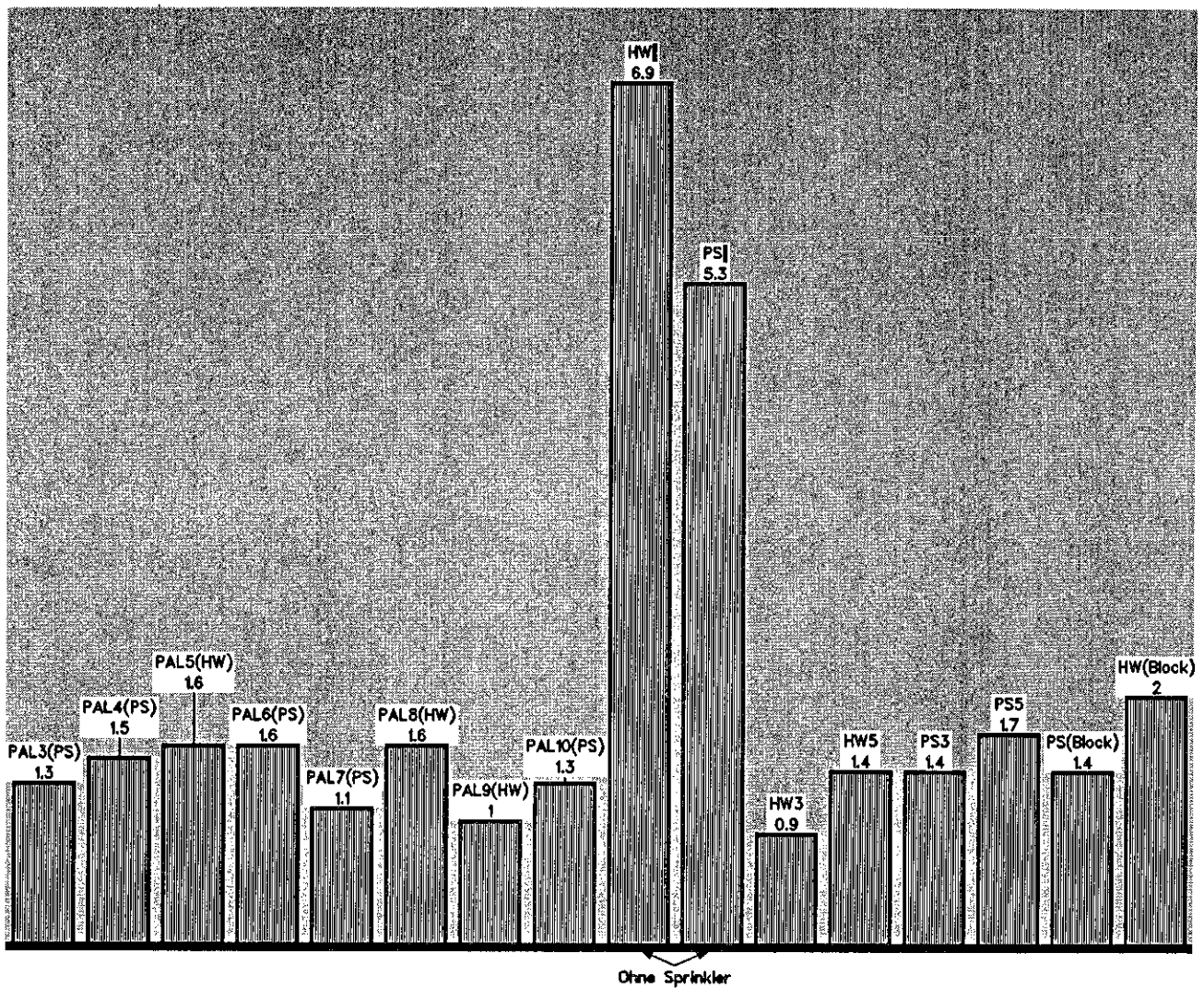
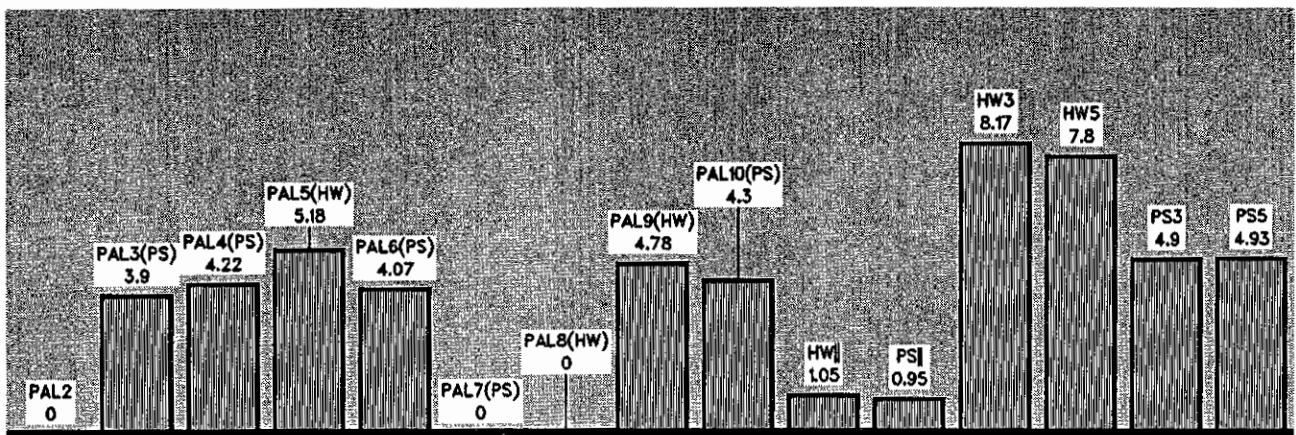


Bild 6 Mittlere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Lagerarten und Lagerkonfigurationen.

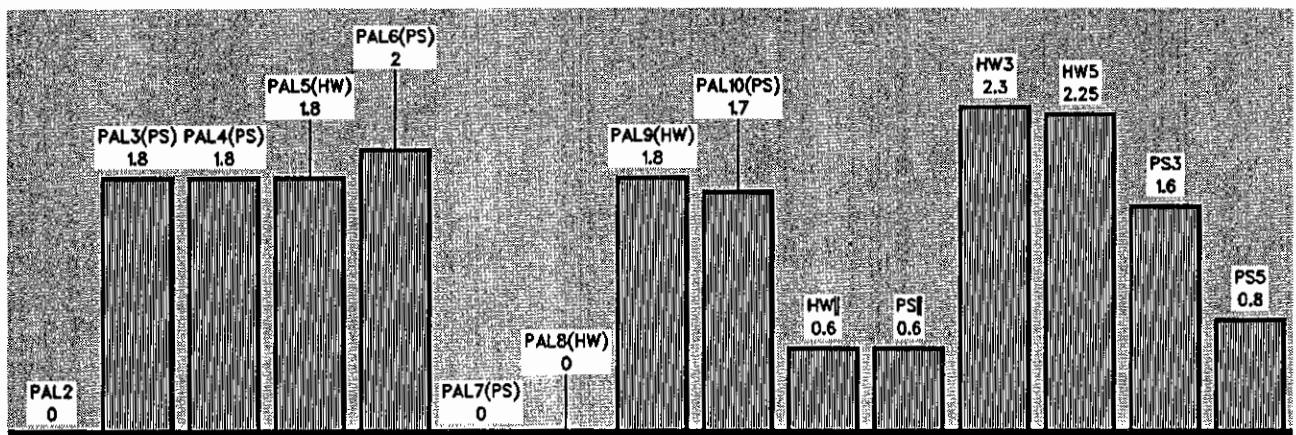
Zeit  $t_z$  – Stapel HL



Ohne Sprinkler

Höhe  $z_z$  in m

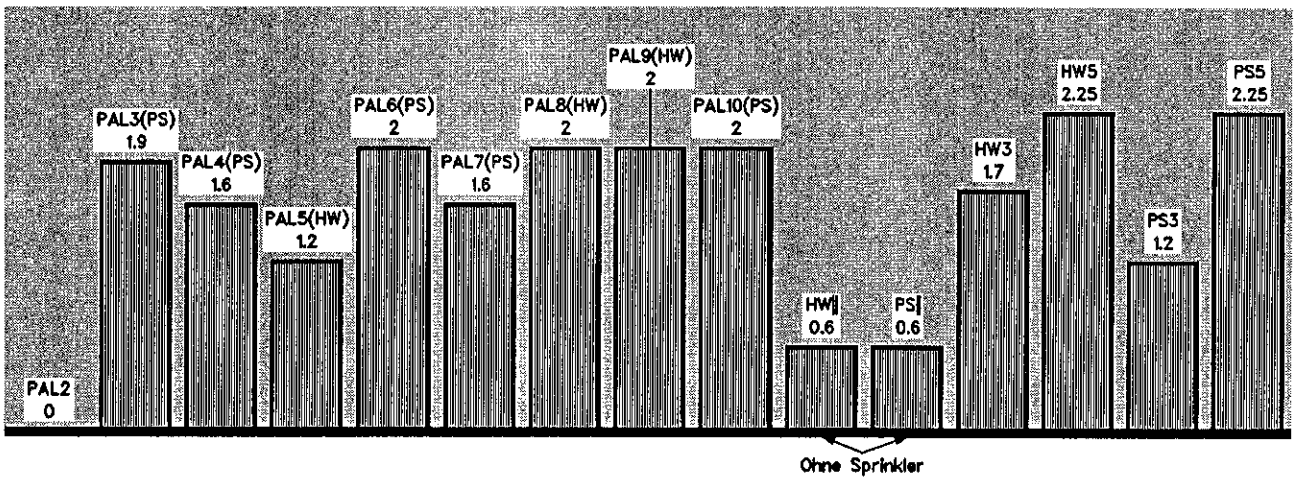
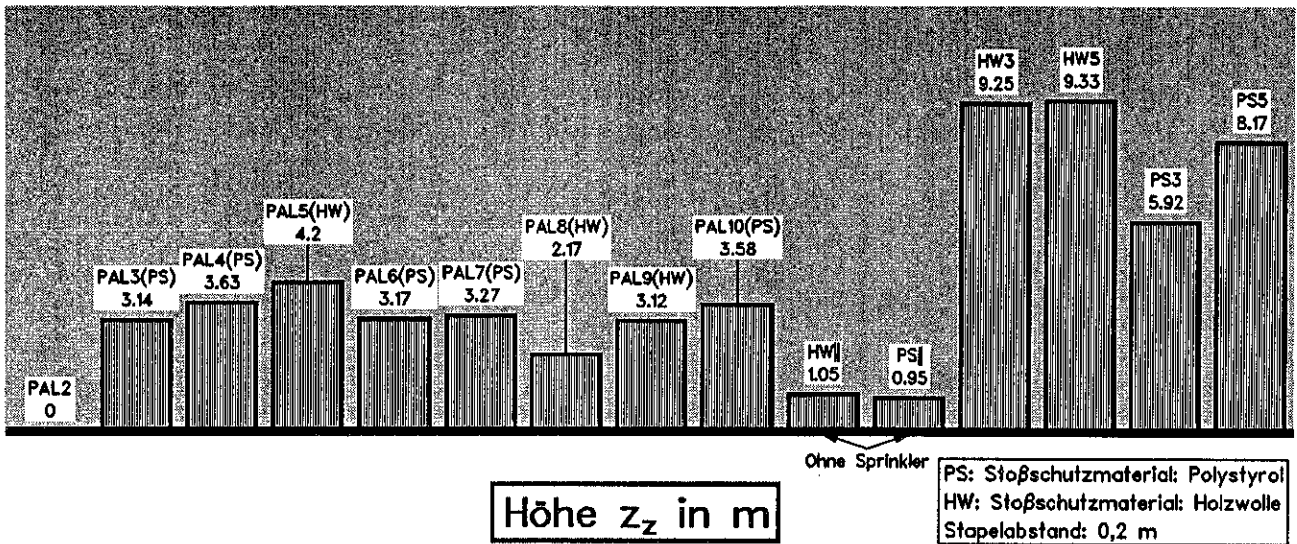
PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
 HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle  
 Stapelabstand: 0,2 m



Ohne Sprinkler

**Bild 7** Zeit  $t_z$ , bei der sich der **Stapel HL** in der Höhe  $z_z$  durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet.

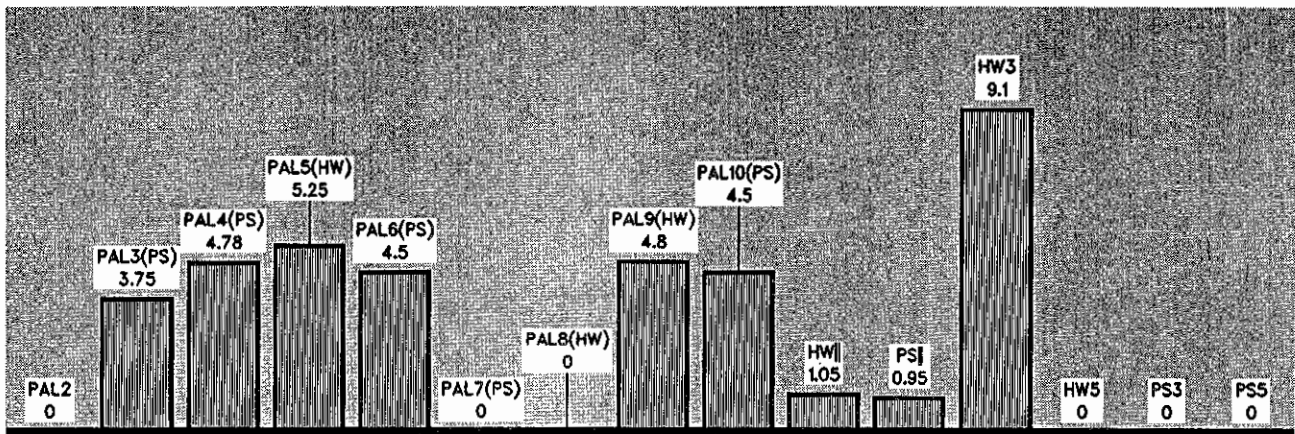
Zeit  $t_z$  – Stapel VR



**Bild 8** Zeit  $t_z$ , bei der sich der Stapel VR in der Höhe  $z_z$  durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet.



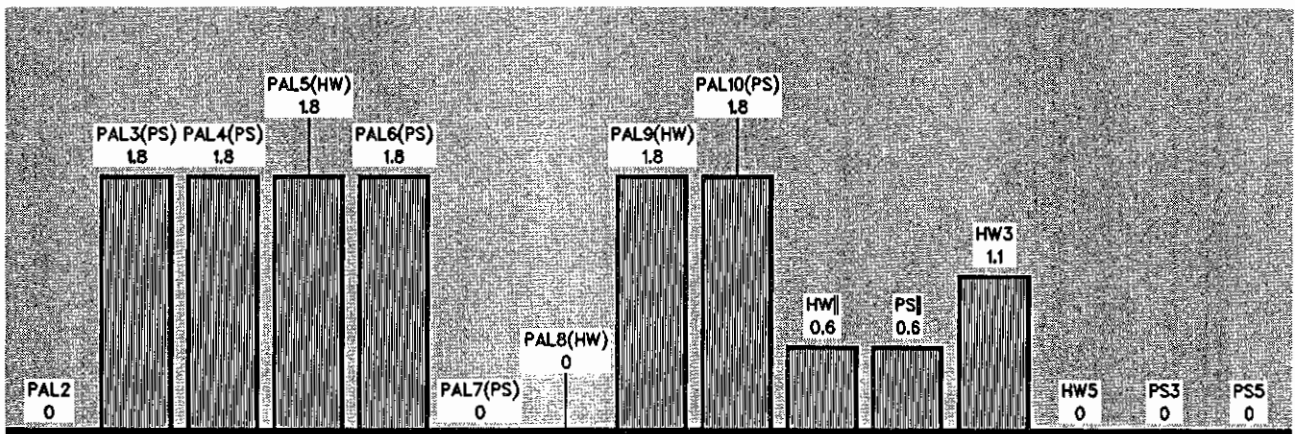
Zeit  $t_z$  – Stapel HR



Ohne Sprinkler

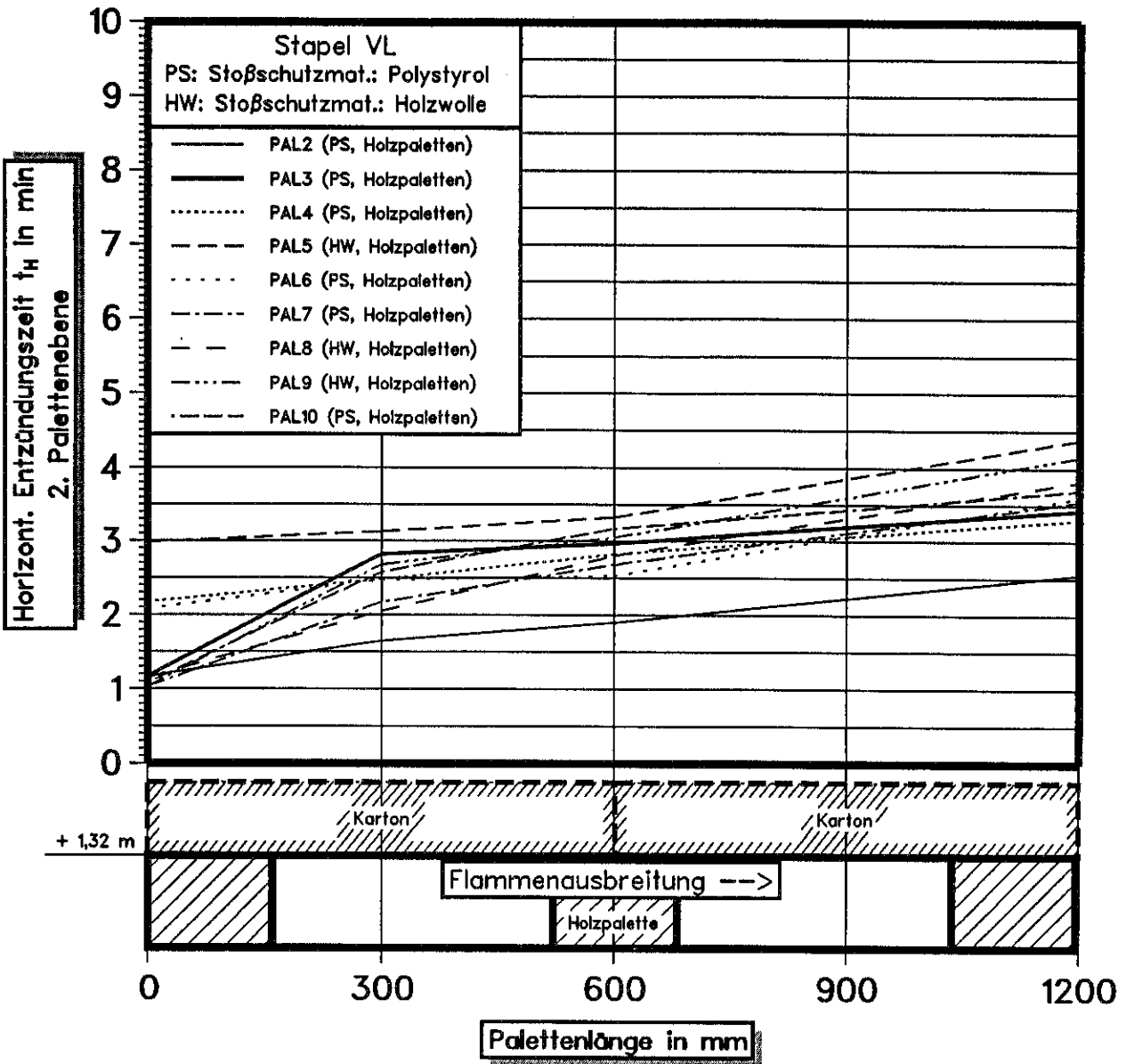
Höhe  $z_z$  in m

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
 HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle  
 Stapelabstand: 0,2 m

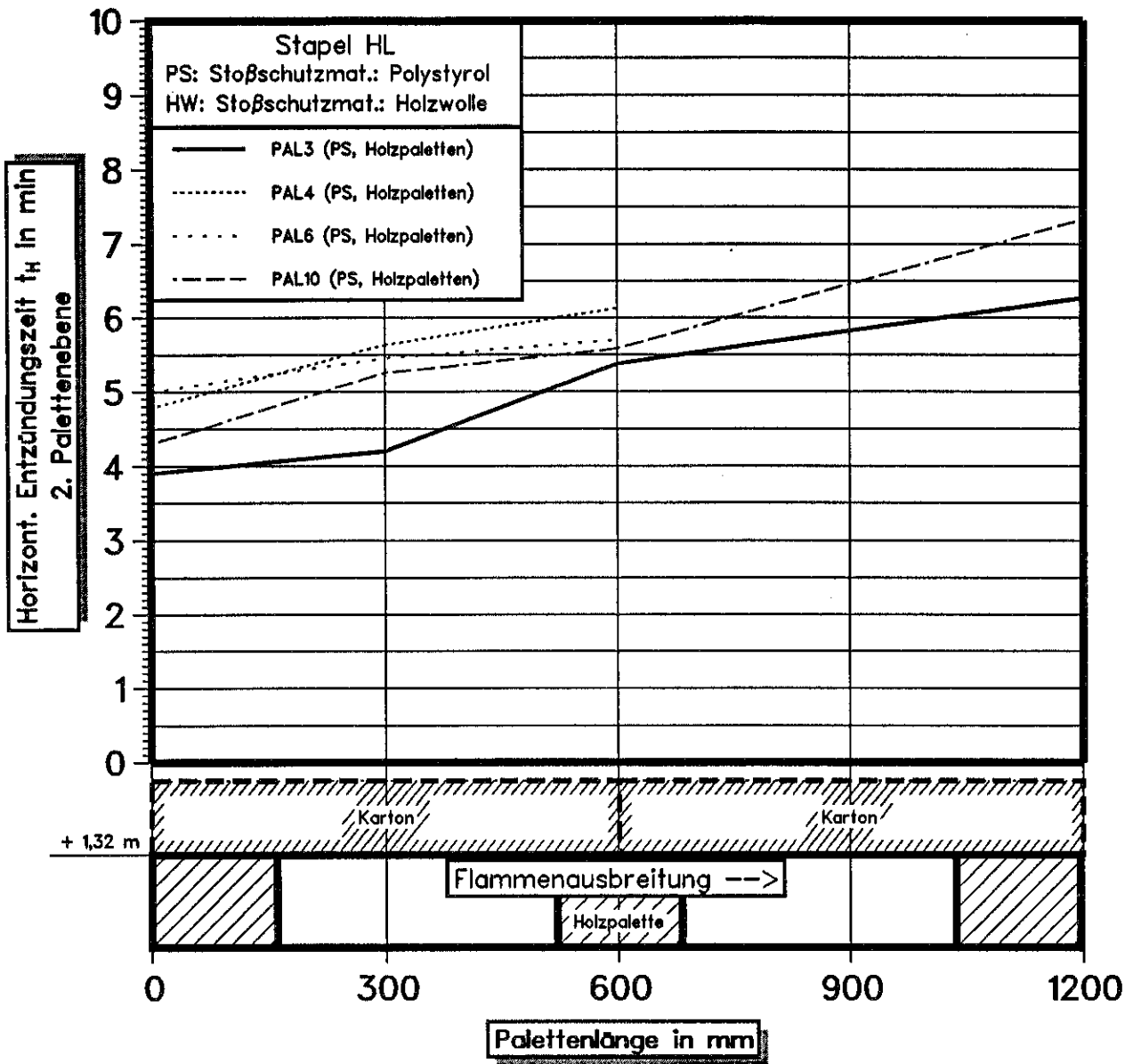


Ohne Sprinkler

**Bild 9** Zeit  $t_z$ , bei der sich der Stapel HR in der Höhe  $z_z$  durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet.



**Bild 10** Horizontale Ausbreitung der Flammen im Zwischenraum der 2. Palette als Funktion der Zeit.  
 - Stapel VL



**Bild 11** Horizontale Ausbreitung der Flammen im Zwischenraum der 2. Palette als Funktion der Zeit.  
- Stapel HL

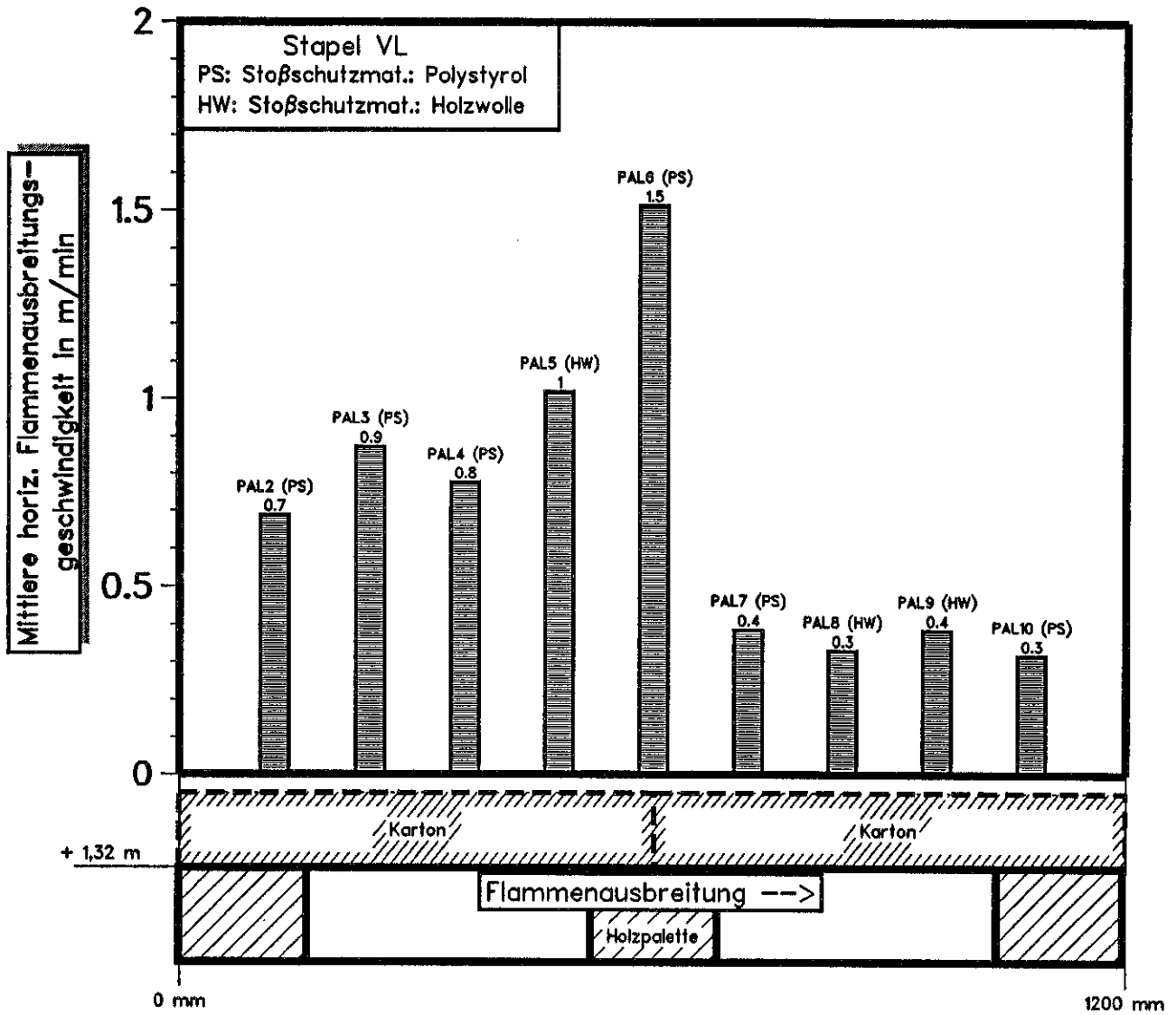


Bild 12 Mittlere horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im Zwischenraum der 2. Palette.  
- Stapel VL

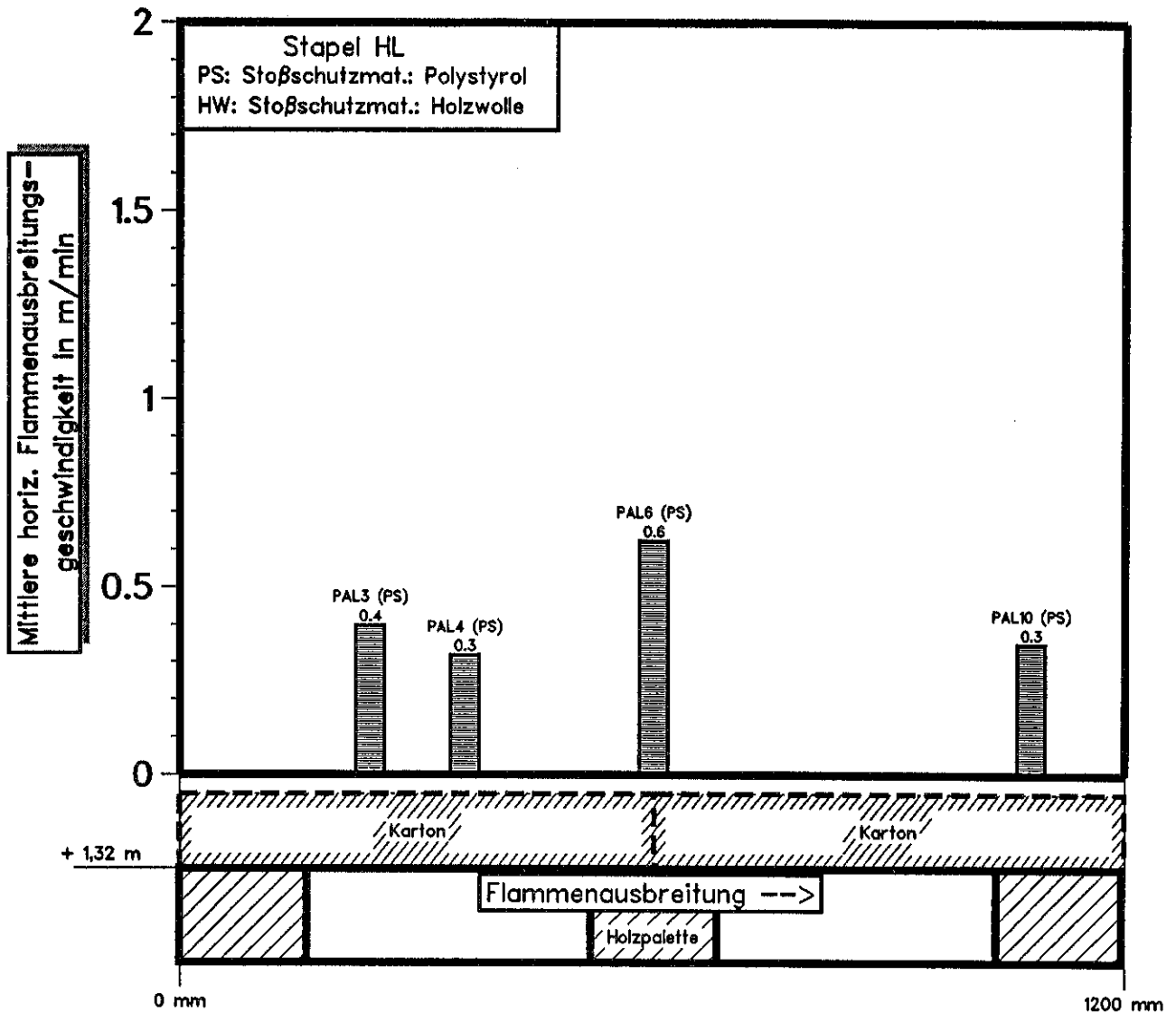


Bild 13 Mittlere horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im Zwischenraum der 2. Palette.  
- Stapel HL.

Zeit  $t_0$  in min

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwole  
Stapelabstand: 0,2 m

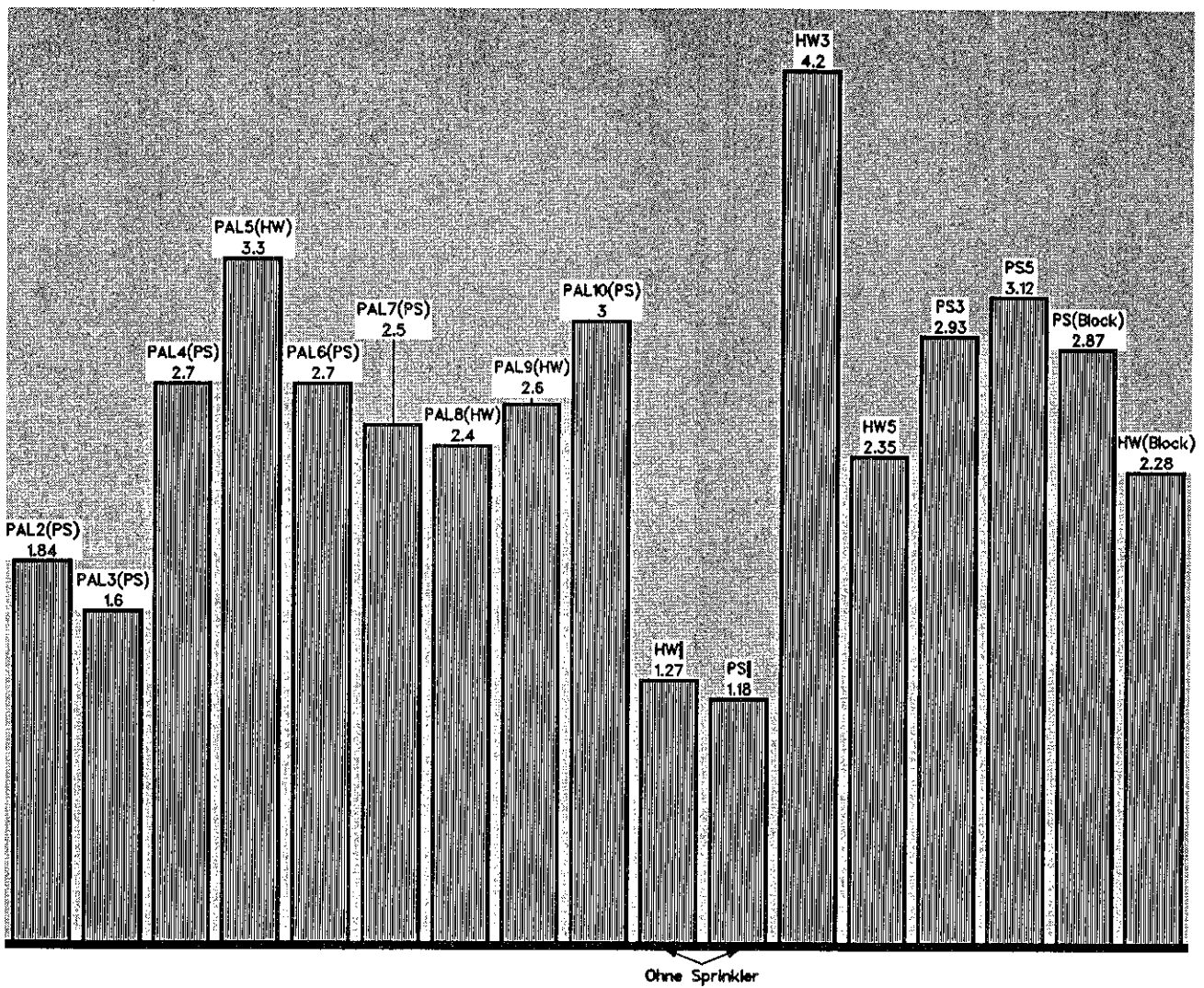


Bild 14 Versuchszeit  $t_0$  als Funktion der verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien.

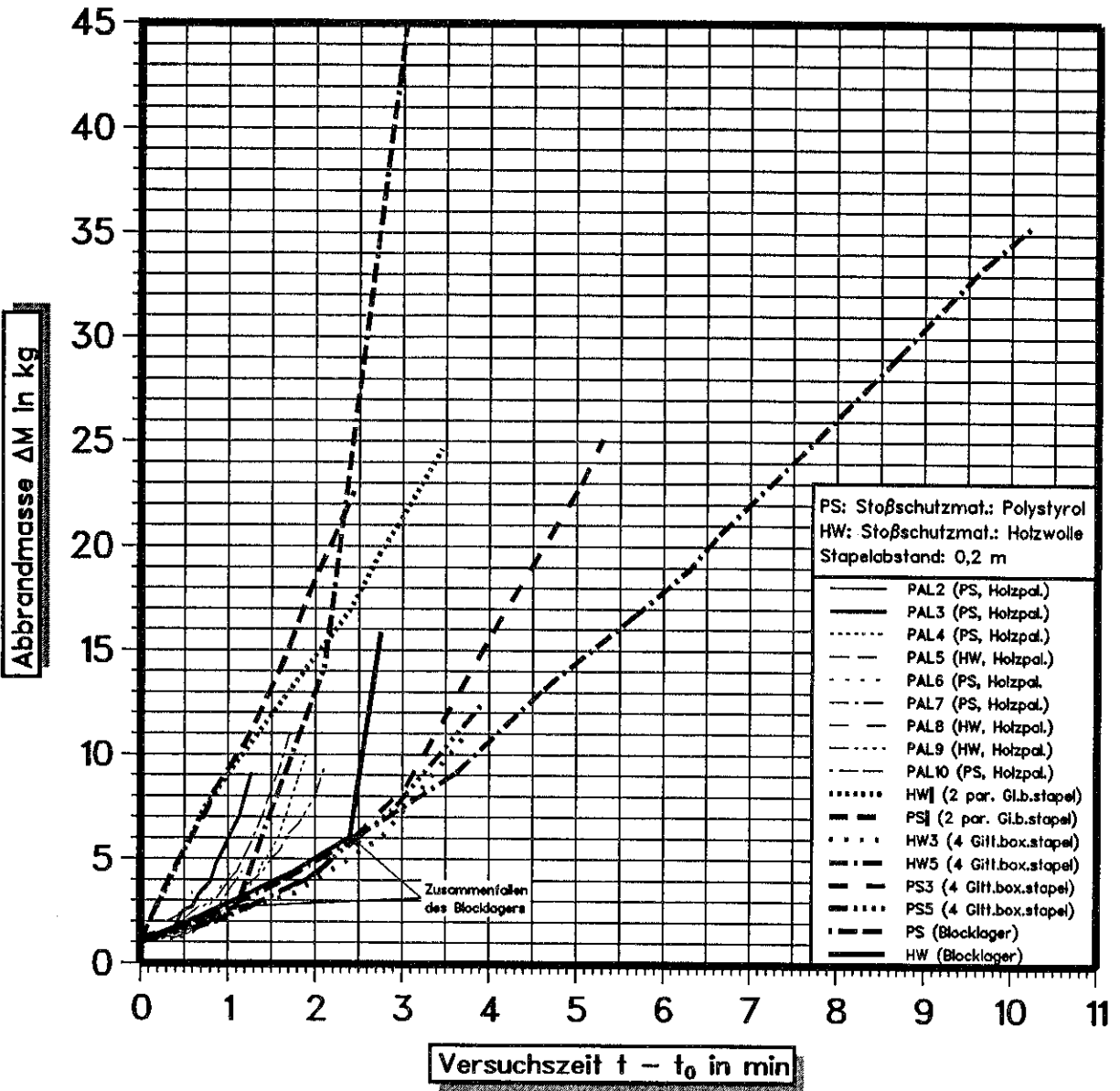


Bild 15.1 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten in Abhängigkeit von der Zeit ( $t - t_0$ ).

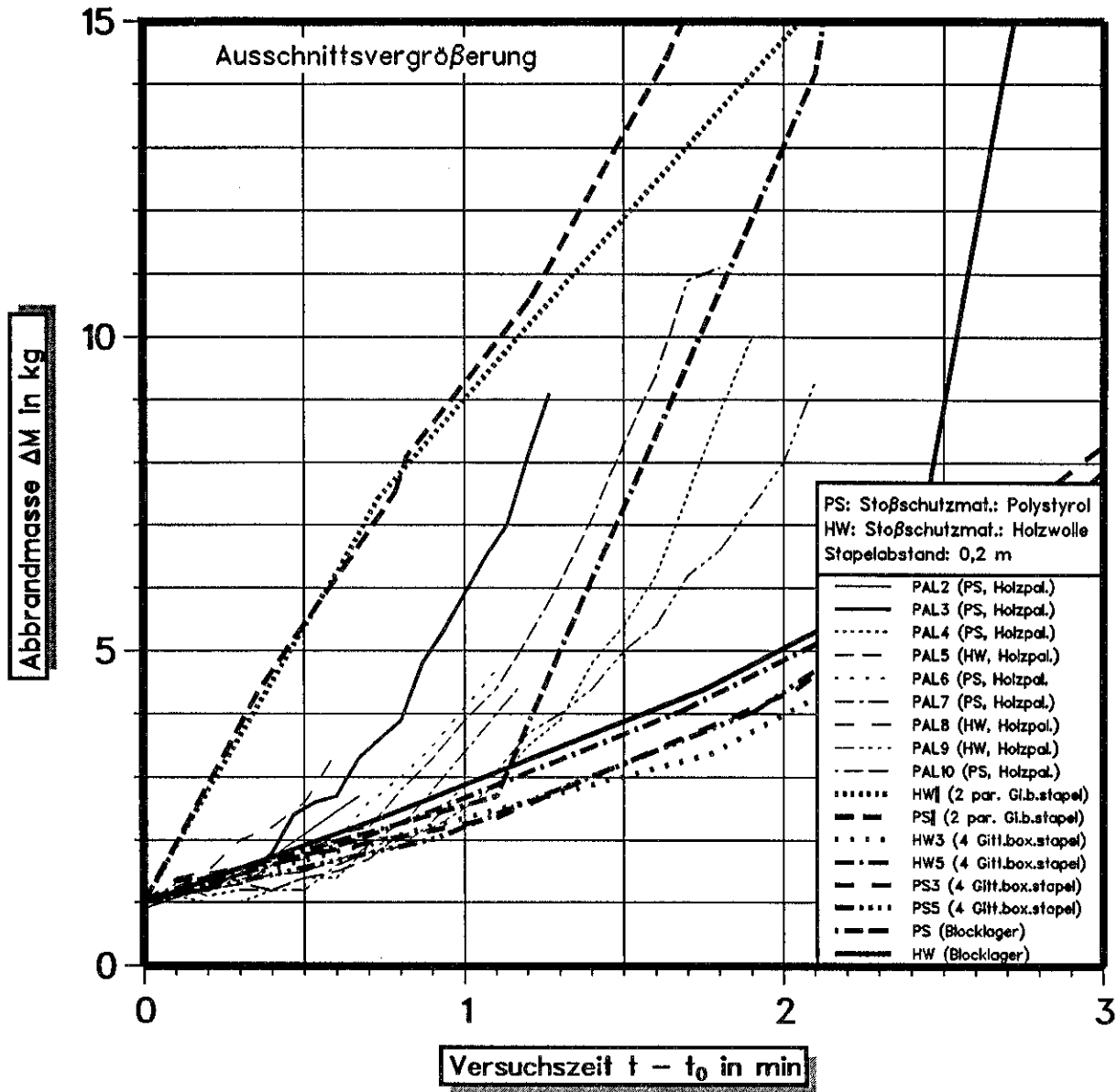
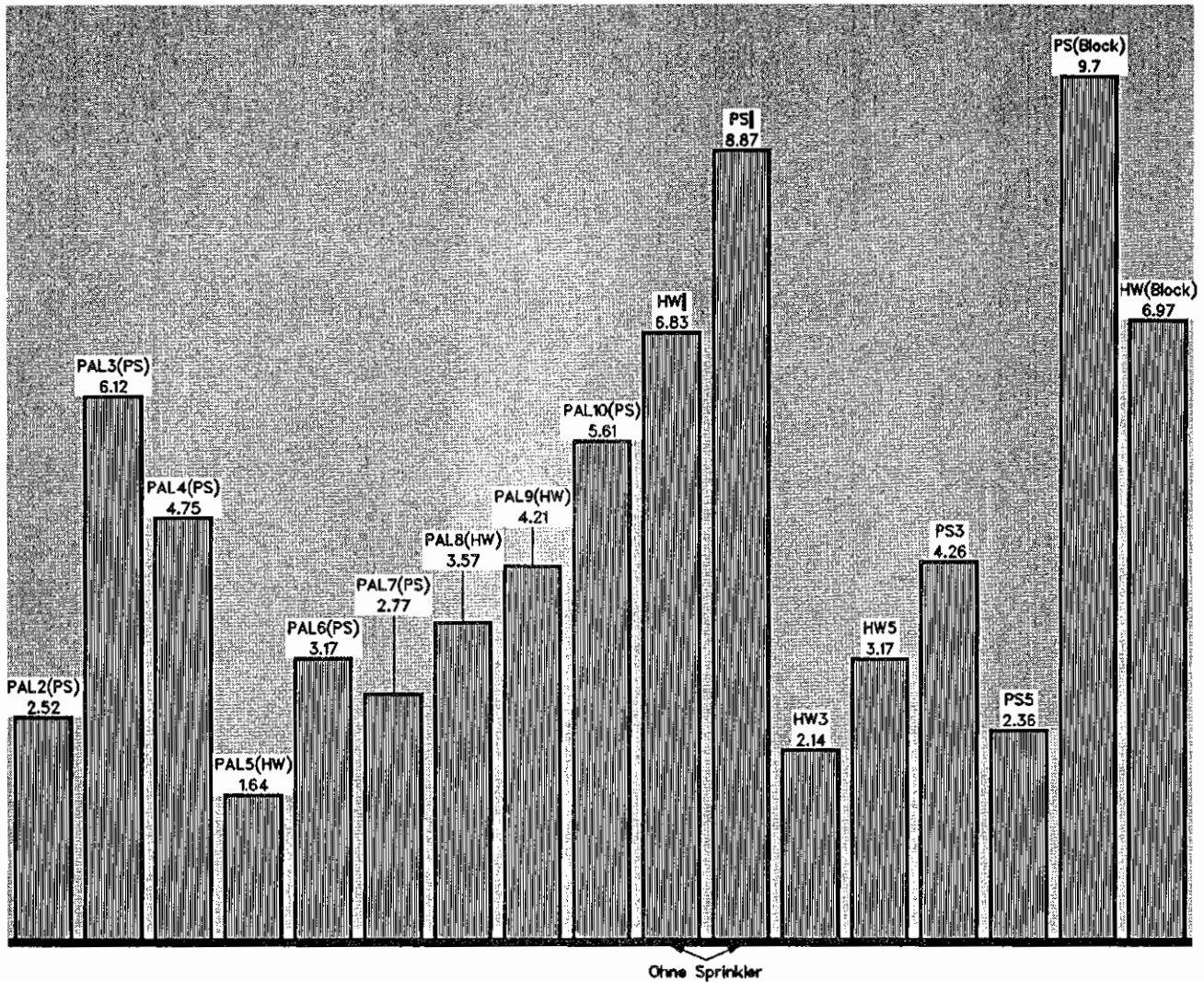


Bild 15.2 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse bis zum Löscheintritt bei unterschiedlichen Lagerarten in Abhängigkeit von der Zeit ( $t - t_0$ ) - Ausschnittsvergröß..



### Mittlere Abbrandrate in kg/min

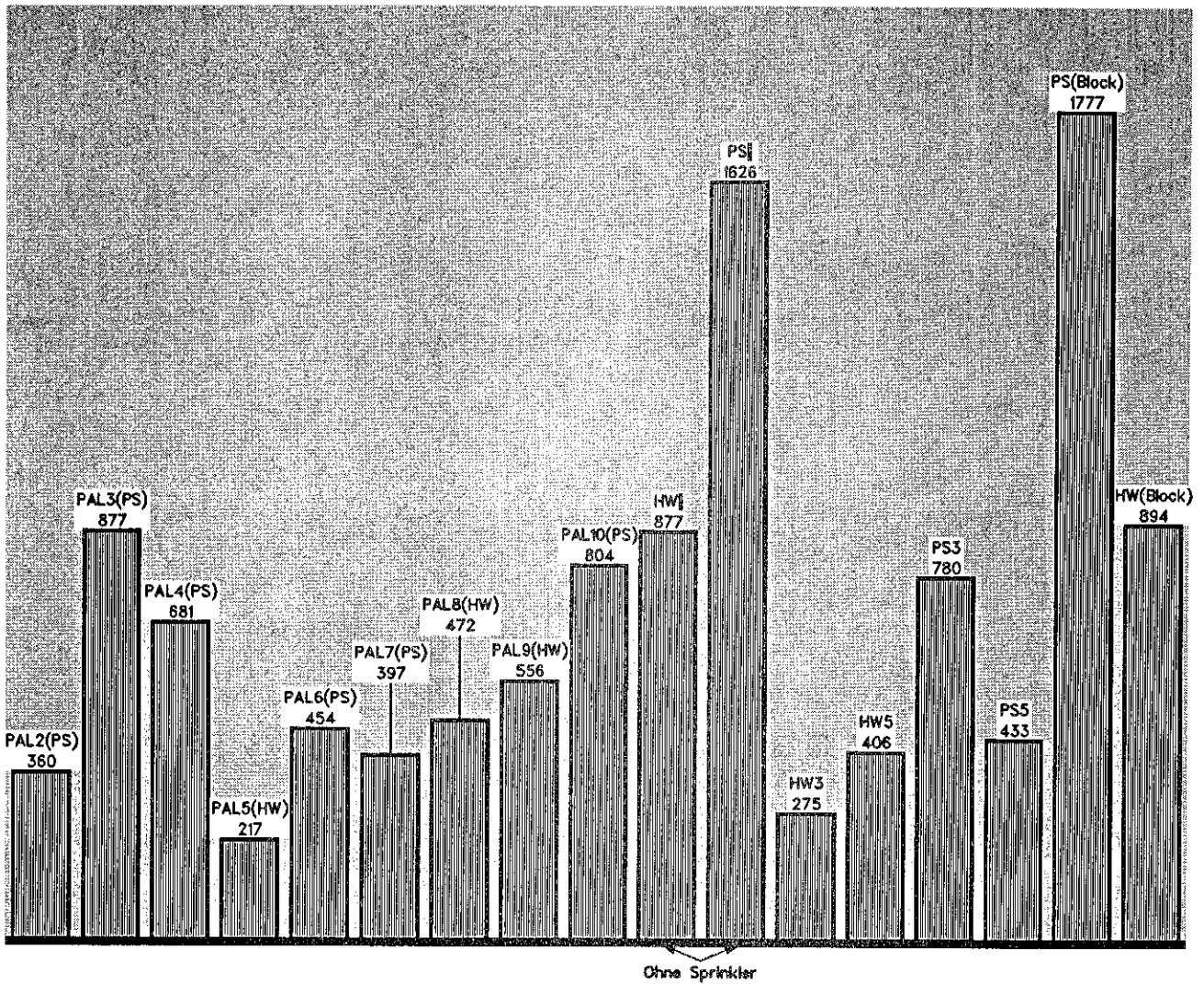
PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle  
Stapelabstand: 0,2 m



**Bild 16** Mittlere Abbrandrate bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen.

### Mittlere Wärmefreisetzung in kW

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol  
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwole  
Stapelabstand: 0,2 m



**Bild 17** Mittlere Wärmefreisetzung  $\dot{Q}_f$  bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen.

Maximale Brandtemperatur  $T_{\text{Max}}$  in  $^{\circ}\text{C}$

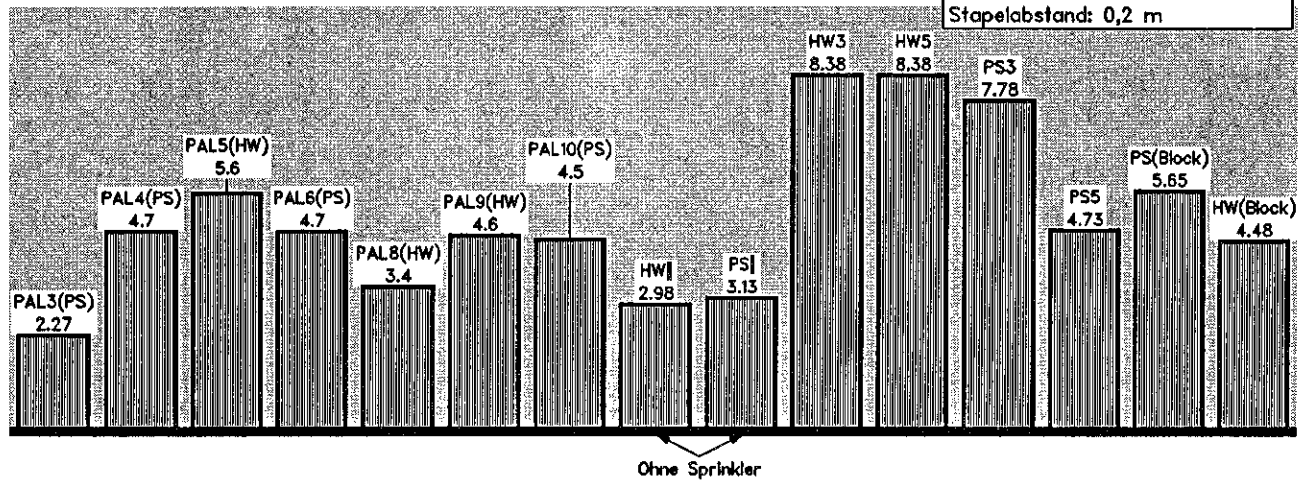
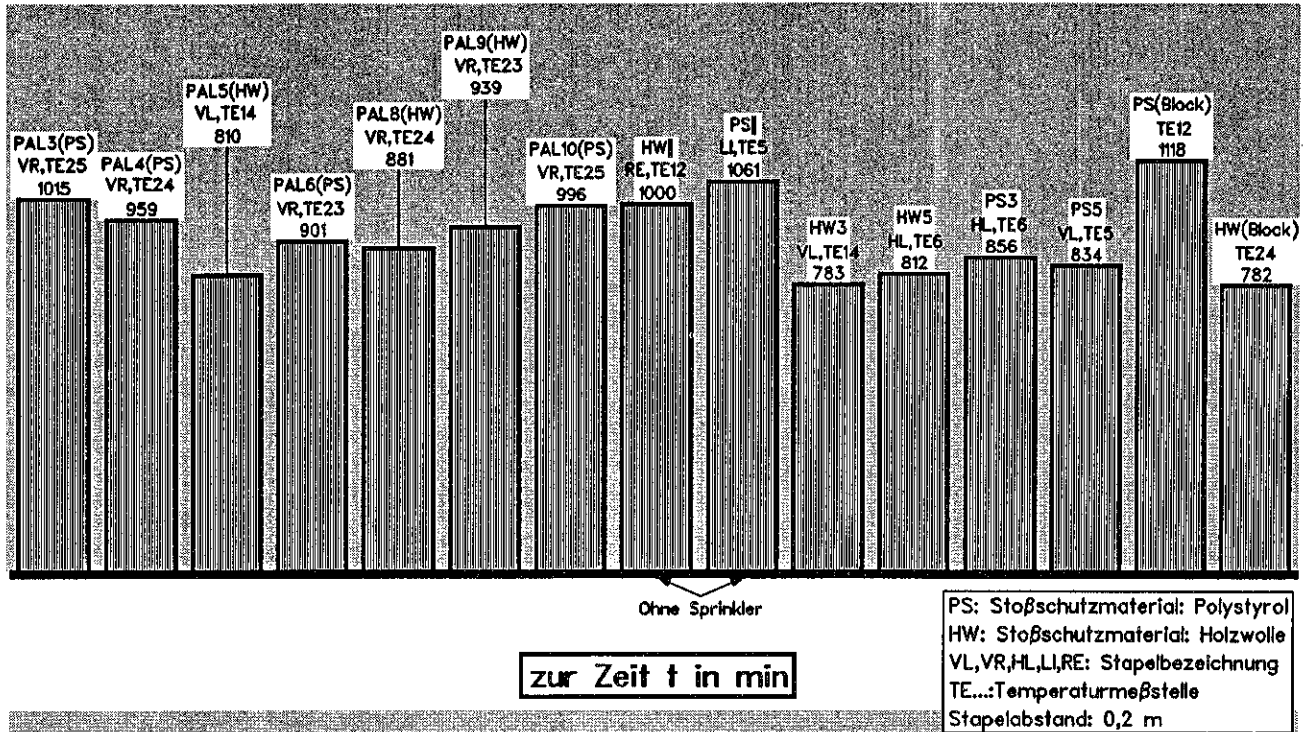


Bild 18 Maximale Brandtemperatur als Funktion der Zeit  $t$  bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen.