

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil 12: – Zusammenstellung von Erkenntnissen
aus theoretischen, numerischen und
experimentellen Untersuchungen als
Planungshilfe zur Ausführung von Lägern
und Sprinkleranlagen sowie zur Über-
prüfung von numerischen Simulationen.
– Darstellung der Problematik bei der meß-
technischen Erfassung von physikalisch/
chemischen Größen bei Brand- und
Löschversuchen insbesondere im Hinblick
auf die Verwendung bei numerischen
Simulationen.

95

Forschungsbericht Nr. 95

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

Teil 12: - Zusammenstellung von Erkenntnissen
aus theoretischen, numerischen und
experimentellen Untersuchungen als
Planungshilfe zur Ausführung von
Lägern und Sprinkleranlagen sowie
zur Überprüfung von numerischen
Simulationen.

- Darstellung der Problematik bei der
meßtechnischen Erfassung von physika-
lisch/chemischen Größen bei Brand-
und Löschversuchen insbesondere im
Hinblick auf die Verwendung bei
numerischen Simulationen.

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Juli 1995

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
	<i>FORMELZEICHEN</i>
1.	<i>EINLEITUNG</i> 1
2.	<i>ZUSAMMENSTELLUNG VON ERGEBNISSEN DER BISHER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN ALS PLANUNGSHILFE ZUR AUSFÜHRUNG VON LAGERN</i> 3
2.1	<i>ALLGEMEINES</i> 3
3.	<i>BRANDAUSBREITUNG</i> 4
3.1	<i>BESTIMMUNG DER BRANDAUSBREITUNGSGESCHWINDIG- KEIT UND EXPERIMENTELLE VERFAHREN ZUR BRAND- RISIKOABSCHÄTZUNG</i> 4
3.1.1	<i>Abbrandfaktor m</i> 4
3.1.2	<i>KONUS-, MÖBEL- UND INDUSTRIEKALORIMETER</i> 6
3.1.3	<i>ABBRANDWAAGE</i> 13
3.1.4	<i>MESSUNG DER WÄRMESTRAHLUNG</i> 17
3.1.5	<i>BESONDERE MESSTECHNISCHE PROBLEME</i> 18
3.2	<i>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN</i> 19
3.2.1	<i>TROPFENGRÖSSENUNTERSUCHUNGEN</i> 19
3.2.2	<i>BRANDVERSUCHE</i> 23
3.2.2.1	<i>ZWEI PARALLELE LAGERATTRAPPEN</i> 25
3.2.2.2	<i>GITTERBOXLAGER MIT ZWEI STAPEL</i> 28
3.2.2.3	<i>GITTERBOXLAGER MIT VIER STAPEL</i> 32
3.2.2.4	<i>BLOCKLAGER</i> 38
3.2.2.5	<i>PALETTENBLOCKLAGER</i> 40
3.2.2.6	<i>REGALPALETTENLAGER</i> 46
4.	<i>THEORETISCHE BEHANDLUNG DER BRAND- UND LÖSCHVORGÄNGE</i> 47
4.1	<i>DARSTELLUNG DER PROBLEMATIK BEI NUMERISCHEN SIMULATIONEN</i> 47
4.2	<i>NUMERISCHE SIMULATION</i> 54
5.	<i>ZUSAMMENFASSUNG</i> 59
6.	<i>LITERATURVERZEICHNIS</i> 61
7.	<i>TABELLEN UND BILDER</i> 67

FORMELZEICHEN

A_B	Rechnerische Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes in m^2 (siehe Gleichung (1))
A_1	Querschnittsfläche des Rauchgaskanals (siehe Gleichung (2))
B1	Blocklager
C1	sondenabhängige Konstante
C2	Faktor zur Beschreibung des Strömungsprofils im Rauchgaskanal
$c_p(T)$	Spezifische Wärmekapazität von Luft
$D_{A50\%}$	Anzahlbezogener Halbwertstropfendurchmesser
D_{Ti}	Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm
$D_{V50\%}$	Volumenbezogener Halbwertstropfendurchmesser
D_{10}	Arithmetischer Mittelwert der Tropfendurchmesser
D_{32}	Sauter-Durchmesser
dt	Differentielles Zeitelement
dz_b	Differentielles Wegelement in vertikaler Richtung
E	Wärmefreisetzung pro Masseneinheit verbrauchten Sauerstoffes $\approx 13,1$ MJ/kg
HL	Stapelbezeichnung siehe Bild 10 u. 12
HR	" "
HRR	Wärmefreisetzungsrate
$HRR_{konvektiv}$	Konvektiver Wärmestrom
H_u	Heizwert in MJ/kg
\bar{H}_u	Gewichteter Heizwert in MJ/kg
H_{ui}	Heizwert des einzelnen Stoffes in kWh/kg
HW	Holzwohle als Stoßschutzmaterial
k	Anzahl der Durchmesserfraktionen
k_{Flug}	Unterteilung des Sprühkegels
k_{Umf}	Unterteilung des Sprühkegelumfanges
k_{vert}	Abminderungsfaktor für die vertikale Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen
L	Abstand zwischen den Lagersäulen in m
L_A	Abstand zwischen Lagersäule und Lagerattrappe
LI	Linker Stapel siehe Bild 9
m	Abbrandfaktor
m_i	Abbrandfaktors des einzelnen brennbaren Stoffes

\dot{m}	Massenstrom im Rauchgaskanal (siehe Gleichung (3))
\dot{M}	Abbrandrate in kg/min
M_a	Anfangsmasse der Lagerstapel in kg
M_i	Masse des einzelnen brennbaren Stoffes in kg
$M(t)$	Masse in kg zum Zeitpunkt t
ΔM	Abbrandmasse in kg
n_i	Anzahl der Tropfen in der Fraktion i
p_0	Luftdruck
p_i	Massenanteil eines Stoffes im Brandgut
p_s	Sättigungsdruck von Wasser bei der Temperatur T_0
Δp	Druckabfall
P_i	Teilmasse eines Stoffes im Brandgut in kg
PS	Polystyrol-Partikelschaum als Stoßschutzmaterial
q_R	Rechnerische Brandbelastung in kWh/m ²
\dot{Q}	Wärmestrom in kW
\dot{Q}_f	Fühlbarer Wärmestrom in kW
RE	Rechter Stapel siehe Bild 9
RH	Luftfeuchtigkeit in %
S	Position des Sprinklers
t	Versuchszeit in min
t_0	Zeitpunkt, bei dem $\Delta M = 1$ kg beträgt
t_H	Horizontale Entzündungszeit in min
t_z	Zeit, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel (VR, HL, oder HR) durch Flammenübersprung zündet in min
T	Temperatur
T_0	Umgebungstemperatur
T_1	Temperatur im Rauchgaskanal
TE	Thermoelement
T_{Gx}	Gastemperatur in horizontaler Richtung
T_{Gz}	Gastemperatur in vertikaler Richtung
T_{Max}	Maximale Brandtemperatur in °C
u_{Gx}	Horizontales Profil der Gasgeschwindigkeit
u_{Gz}	Vertikales Profil der Gasgeschwindigkeit
$v_z(\gamma_{Ti,0})$	Vertikale Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen

$V_{z,korr}(\gamma_{Tr,0})$	Vertikale, abgeminderte Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen
V_V	Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min
V_H	Horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min
VL	Stapelbezeichnung siehe Bild 10 u. 12
VR	" " "
x	Horizontale Koordinate
X_{H_2O}	Molenbruch von Wasser in der Umgebungsluft
$X_{H_2O}^o$	Molenbruch von H_2O der eintretenden Luft
$X_{O_2}^o$	Molenbruch von O_2 der eintretenden Luft
$X_{CO_2}^o$	Molenbruch von CO_2 der eintretenden Luft
X_{O_2}	Molenbruch von O_2 im Abgasstrom
X_{CO_2}	Molenbruch von CO_2 im Abgasstrom
y	Horizontale Koordinate
z	Vertikale Koordinate
Z	Position der Zündquelle
z_b	Höhe, die die Flammenwurzel an dem durch die Zündquelle gezündeten Lagerstapel (VL) erreicht hat in m
z_z	Höhe, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel (VR,HL, oder HR) durch Flammenübersprung zündet in m

Sonstige Bezeichnungen

3	3 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel
5	5 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel
	2 Parallele Gitterboxenstapel
PAL	Palettenblocklager
REG	Regalpalettenlager
I	Bereich I der Flammen-/Rauchgaszone: Flammenzone
II	Bereich II der Flammen-/Rauchgaszone: flackernde Flammenzone
III	Bereich II der Flammen-/Rauchgaszone: Auftriebsbereich

α	Verhältnis zwischen der Molzahl der Verbrennungsprodukte und der Molzahl von Luft
$\Delta\gamma_{Tr,0}$	$\gamma_{Tr,0,au} - \gamma_{Tr,0,in}$
$\gamma_{Tr,0}$	Einsprühwinkel
$\gamma_{Tr,0,au}$	Äußerer Winkel des Sprühkegels
$\gamma_{Tr,0,in}$	Innerer Winkel des Sprühkegels
ψ_i	Kombinationsbeiwert (berücksichtigt die Möglichkeit des Zusammenwirkens ungeschützter ($\psi_i = 1$) und durch wärmedämmende Isolierung geschützter ($\psi_i < 1$) Stoffe)

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 /2,3,4,5,6,22/. 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. In dieser Arbeit werden auch 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 ein über die Angaben in /17/ hinausgehender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen aufgeführt, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen.

In dieser Arbeit wird aufgrund der bisher gewonnenen theoretischen, numerischen und experimentellen Erkenntnissen eine Planungshilfe zur Ausführung von Lagern gegeben. Hierbei wird besonders der Brandverlauf in der Brandentwicklungsphase berücksichtigt, der u.a. für das Auslösen ortsfester Löschanlagen

entscheidend ist.

Weiterhin werden die Grenzen von numerischen Simulationen aufgezeigt.

2. ZUSAMMENSTELLUNG VON ERKENNTNISSEN DER BISHER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN ALS PLANUNGSHILFE ZUR AUSFÜHRUNG VON LAGERN

2.1 ALLGEMEINES

Das Lagerisiko bezüglich des Brandschutzes wird außer durch die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit noch durch weitere Brandercheinungen, wie z.B. durch die gesamte freigesetzte Wärme oder die zeitliche Zunahme der Wärmefreisetzung gekennzeichnet.

Von entscheidender Bedeutung bei der Ausbreitung von Bränden im Lagerbereich ist, wie schnell sich eine Umverpackung, bei sonst konstanten Bedingungen, zünden läßt. Die Zeitdauer, bis ein brennbarer Stoff durch eine vorhandene kleine Flamme entzündet wird, hängt u.a. von seiner thermischen Vorgeschichte ab, d.h. im wesentlichen von der Wärmebeaufschlagung, die er vor seiner Entzündung erfahren hat. Hier gehen z.B. die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Zündtemperatur des Stoffes ein. Einen weiteren Einfluß hat die Größe der Zündquelle. Bei den durchgeführten Versuchen hat sich gezeigt, daß sich bei sehr kleinen Zündquellen besonders die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum und die Feuchte des Lagergutes in erhöhtem Maße verzögernd auf die Zündung des brennbaren Stoffes auswirken. Durch diese Faktoren wird auch die Brandausbreitung, besonders in der Brandentwicklungsphase verzögert. Die besonders in der Zündphase und in der Brandentwicklungsphase erkennbare verzögerte Brandausbreitung bei erhöhter Luftfeuchtigkeit und erhöhter Lagergutfeuchte ist damit zu erklären, daß ein erhöhter Anteil der durch die Verbrennung freigesetzten Wärme für die Verdunstung bzw. Verdampfung dieser Feuchtigkeit benötigt wird, bevor durch thermische Zersetzung (Pyrolyse) brennbare Gase entstehen können, welche für die weitere Brandausbreitung notwendig sind. Wird bei Brandversuchen die Zündquelle relativ zum Lagergut groß gewählt, so ist die beobachtete Brandausbreitung am Lagergut insbesondere in der Brandentwicklungsphase im wesentlichen von der Intensität der Zündquelle und nur bedingt von

der Art des Brandgutes und dessen Umgebungsbedingungen abhängig. Wenn der erste Gegenstand in Zündquellennähe gezündet ist und für die weitere Brandfortleitung ausreichend Energie liefert, dann kommt der Einfluß der geometrischen Anordnung der Stapel zueinander zum Tragen, welche auch auf die Vorheizung der oberhalb und neben dem ersten gezündeten Bereich befindlichen Bereiche und Teile Einfluß nimmt.

Eine Übersicht über die wesentlichen Einflußgrößen auf die Brandausbreitung ist in der **Tabelle 1** nach Brein /2/ gegeben. Zusätzlich wurde in die Tabelle der Einfluß der Ventilation aufgenommen. **Tabelle 2** zeigt wichtige Einflußgrößen der Sprinkleranlagen, die infolge der konstruktiven Gestaltung der Sprinkler und der Sprinkleranlage als auch der Betriebsbedingungen zum Tragen kommen. Die Wechselwirkungen und Einflußfaktoren zwischen dem Brand und dem Tropfenschwarm des Sprinklers sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

3. BRANDAUSBREITUNG

3.1 BESTIMMUNG DER BRANDAUSBREITUNGSGESCHWINDIGKEIT UND EXPERIMENTELLE VERFAHREN ZUR BRANDRISIKOABSCHÄTZUNG

Im nachfolgenden werden einige gebräuchliche Methoden beschrieben, um die Brandausbreitung bezüglich der Wärmefreisetzung zu beschreiben.

3.1.1 Abbrandfaktor m

Eine Möglichkeit zur quantitativen Beschreibung des Abbrandverhaltens von Stoffen ist die Berücksichtigung des **Abbrandfaktors m** nach DIN 18230 /23/. Der Abbrandfaktor m ist ein Beiwert, mit dem die Brandbelastung zur Berücksichtigung des Brandverhaltens der brennbaren Stoffe in der jeweiligen Art, Form und Verteilung zu multiplizieren ist. Die m-Faktoren werden durch Versuche

ermittelt und werden in Beiblatt 1 der Norm aufgeführt. Die m-Faktoren liegen für eine begrenzte Anzahl von Stoffen für bestimmte Lagerungsdichten vor. Die Bestimmung des Abbrandfaktors m erfolgt nach DIN 18230 Teil 2 in einer m-Faktor-Anlage, die im Moment nur bei der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Nordrhein-Westfalen in Dortmund vorhanden ist. Der Brandversuchsraum hat hierbei ein Volumen von 8 m³. Bei den Brandversuchen wird das Versuchsmaterial, dessen Abbrandfaktor m zu ermitteln ist, mit praxisüblichen Abmessungen, entsprechender Form, Verteilung und Lagerungsdichte und der Feuchte dem Brandversuch unterzogen. Das Versuchsmaterial wird in praxisüblicher Lagerungsdichte und gegebenenfalls Stoffmischung auf einer Fläche von ca. 1 m * 1 m in Brandraummitte eingebracht.

Die rechnerische Brandbelastung eines Brandbekämpfungsabschnittes wird für ungeschützte Stoffe und für geschützte Stoffe nach folgender Gleichung berechnet:

$$Q_R = \frac{\sum (M_i * H_{ui} * m_i * \psi_i)}{A_B} \quad (1)$$

- Q_R = rechnerische Brandbelastung in kWh/m²
- M_i = Masse des einzelnen brennbaren Stoffes in kg
- H_{ui} = Heizwert des einzelnen Stoffes in kWh/kg
- A_B = rechnerische Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes in m²
- m_i = Abbrandfaktors des einzelnen brennbaren Stoffes
- ψ_i = Kombinationsbeiwert (berücksichtigt die Möglichkeit des Zusammenwirkens ungeschützter ($\psi_i = 1$) und durch wärmedämmende Isolierung geschützter ($\psi_i < 1$) Stoffe)

Man erkennt im Vergleich mit den in der **Tabelle 1** in Abschnitt 2.1 aufgeführten Einflußparametern bei der Brandausbreitung, daß mit der relativ kleinen Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Abbrandfaktors m nur näherungsweise Angaben über die Brandausbreitung in einem realen Lager gemacht werden können. Insbesondere haben die Ventilationsbedingungen, die Abstände zwischen den gelagerten Gütern, die Lagerart (Palettenlager, Gitterbox-

lager, Blocklager) in einem Lager realer Größe einen entscheidenden Einfluß auf die Brandausbreitung.

3.1.2 KONUS-, MÖBEL- UND INDUSTRIEKALORIMETER

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Brandausbreitung und der Wärmefreisetzung bei einem Brand ist die Verwendung von *Konus-, Möbel- und Industriekalorimetern*. Die verschiedenen Kalorimeter werden in Bild 1 nach Dahlberg /24/ dargestellt.

Dahlberg /24/ beschreibt die Funktion und den Aufbau eines Industriekalorimeters bis 10 MW am Swedish National Testing and Research Institute (SP). Dieses Industriekalorimeter ist ähnlich zu dem bei der Factory Mutual Research Corporation (FMRC). Es kann dazu verwendet werden, Waren bezüglich des Brandrisikos zu klassifizieren, die Effektivität von Sprinkleranlagen abzuschätzen, Brandgase chemisch zu analysieren und um Eingangsdaten für die numerische Simulation zu erhalten. Hierbei sammelt eine große Haube die Brandgase und führt diese in einen Rauchgaskanal, wo die Gasgeschwindigkeit, die Gastemperatur, die Rauchdichte sowie der Gehalt an Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid gemessen wird. Auf der Basis dieser Messungen wird der Massenstrom und die Wärmefreisetzung errechnet. Die Wärmefreisetzung wird hierbei nach der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode ermittelt. Die obere Grenze des Meßbereiches liegt bei dieser Meßeinrichtung bei 10 MW und die untere bei 0,1 MW. Hierbei wird ein maximaler Rauchgas/Luftstrom von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 72000 \text{ m}^3/\text{h}$) bei 20°C abgesaugt. In der Praxis stehen für kleinere Brände das Konuskalorimeter (Probengröße $10 \text{ cm} * 10 \text{ cm}$) und das Möbelkalorimeter für Brände bis zu einer Wärmefreisetzung von 1 bis 2 MW, entsprechend der Wärmefreisetzungsrates bei dem vollentwickelten Brand eines Sofas bzw. dem Wärmestrom, der in einem kleinen Raum zu einem "flash over" führt, zur Verfügung. Die Sauerstoffverbrauchsmeßmethode beruht darauf, daß die meisten Stoffe eine konstante Wärmefreisetzung pro Verbrauchseinheit Sauerstoff ($13,1 \text{ MJ pro kg Sauerstoff}$) aufweisen. Die Meßwertaufnehmer für

Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Rauchdichte befinden sich in einer horizontalen Entfernung von 8 m vom Mittelpunkt der Haube. Die Gasproben werden durch eine 30 m lange Leitung den Gasanalysengeräten zugeführt.

Die Klassifizierung von Waren bezüglich des Brandrisikos wurde von FMRC entwickelt und basiert auf der Bestimmung des RDD-Wertes (Required Delivered Density = Erforderliche Wasserbeaufschlagung) bei gleichzeitiger Ermittlung der Wärmefreisetzung. Die Wärmefreisetzung wird hierbei solange ermittelt bis entweder der Brand gelöscht wurde oder die Brandlast vollständig verbrannt ist. Der Test wird hierbei mit verschiedenen Wasserbeaufschlagungen durchgeführt, um eine Klassifizierung vornehmen zu können. Auf die Methode wird in der Arbeit von Persson /25/ noch näher eingegangen.

Die Absaughaube des Industriekalorimeters hat einen Durchmesser von 6 m und ist in einer Brandversuchshalle mit den Abmessungen Länge * Breite * Höhe = 18 m * 22 m * 20 m installiert. Der Abstand zwischen Haube und Boden kann zwischen 8 m und 12 m variiert werden. Die Haube besteht aus 2 mm dickem Stahlblech. Innerhalb der großen Haube befindet sich noch eine kleinere Haube mit einem Durchmesser von 2 m, um die Strömung am Rand der großen Haube zu verbessern.

Der Massenstrom \dot{m} im Rauchgaskanal wird gemäß folgender Gleichung berechnet

$$\dot{m} = C_1 * C_2 * A_1 * \sqrt{(\Delta p / T)} \quad (2)$$

Δp = Druckabfall (Messung durch richtungserkennende Strömungsmeßsonden)

T = Temperatur (Messung durch Mantelthermoelement)

C1 = sondenabhängige Konstante

C2 = Faktor zur Beschreibung des Strömungsprofiles im Rauchgaskanal

A₁ = Querschnittsfläche des Rauchgaskanals

Der konvektive Anteil der freigesetzten Energie wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{HRR}_{\text{konvektiv}} = \dot{m} * \int_{T_0}^{T_1} c_p(T) * dT \quad (3)$$

HRR_{konvektiv} = Konvektiver Wärmestrom

\dot{m} = Massenstrom im Rauchgaskanal

c_p(T) = spezifische Wärmekapazität von Luft

T₀ = Umgebungstemperatur

T₁ = Temperatur im Rauchgaskanal

Der Wassergehalt der Umgebungsluft wird aus Messungen der Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck nach folgender Gleichung bestimmt:

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{RH}}{100} * \frac{p_s(T_0)}{p_0} \quad (4)$$

X_{H₂O} = Molenbruch von Wasser in der Umgebungsluft

RH = Luftfeuchtigkeit (in %)

p_s = Sättigungsdruck von Wasser bei der Temperatur T₀

T₀ = Umgebungstemperatur

p₀ = Luftdruck

Die Messungen zur Bestimmungen der Luftfeuchtigkeit wurden vor dem Brandversuch gemacht. Es wurde angenommen, daß sich diese Größen nur unbedeutend während des Versuches verändern.

Die Wärmefreisetzung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{HRR} = E * \dot{m} * (1 - X_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}) + \left(\frac{(\alpha - 1)}{X_{\text{O}_2}^{\circ}} + \frac{1 - \left(\frac{X_{\text{O}_2}}{1 - X_{\text{CO}_2}} \right)}{X_{\text{O}_2}^{\circ} - \left(\frac{X_{\text{O}_2}(1 - X_{\text{CO}_2}^{\circ})}{1 - X_{\text{CO}_2}} \right)} \right) \quad (5)$$

HRR = Wärmefreisetzungsrates

E = Wärmefreisetzung pro Masseneinheit verbrauchten Sauerstoffes $\approx 13,1$ MJ/kg

\dot{m} = Massenstrom im Rauchgaskanal

α = Verhältnis zwischen der Molzahl der Verbrennungsprodukte und der Molzahl von Luft $\approx 1,1$

$X_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}$ = Molenbruch von H_2O der eintretenden Luft

$X_{\text{O}_2}^{\circ}$ = Molenbruch von O_2 der eintretenden Luft

$X_{\text{CO}_2}^{\circ}$ = Molenbruch von CO_2 der eintretenden Luft

X_{O_2} = Molenbruch von O_2 im Abgasstrom

X_{CO_2} = Molenbruch von CO_2 im Abgasstrom

Die letzten beiden Anteile treten am Austritt der Gasanalysatoren nach Abscheidung des Wasseranteiles auf.

Ohne Korrekturen für die CO_2 - Erzeugung, Luftfeuchtigkeit etc. vereinfacht sich die Gleichung für die Wärmefreisetzung zu:

$$\text{HRR} \approx E * \dot{m} * (X_{\text{O}_2}^{\circ} - X_{\text{O}_2}) \quad (6)$$

Dahlberg gibt für Genauigkeit der Wärmefreisetzungsmessung folgende Vertrauensintervalle an:

16% bei unbekannter Zusammensetzung der Brandlast

ca. 8% : bei Vergleich der Abweichung der Wärmefreisetzung bei ähnlichen Versuchen

ca. 8% : bei bekannter Zusammensetzung der Brandlast

Bei Wärmefreisetzung $< 1,5$ MW oder falls beträchtliche Mengen an Kohlenmonoxid, Ruß oder Wasser aus dem Verbrennungsprozess

entstehen, wird das Vertrauensintervall größer.

Als Fehlerquellen kommen u.a. in Frage:

- * Rauchgase, die nicht über die Haube abgesaugt werden
- * Meßungenauigkeiten bei der Gasanalyse
- * Luftfeuchtigkeit in den Rauchgasen ist eine unbekannte Größe
- * Das genaue Geschwindigkeits- und Temperaturprofil im Rauchgaskanal ist nicht bekannt.
- * Wärmeverluste im Rauchgaskanal
- * Der Faktor E hängt von der Zusammensetzung der Brandlast ab.

Janssens /26/ beschreibt in seiner Arbeit ebenfalls die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate mit Hilfe der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode unter Verwendung eines Industriekalorimeters. Für die Wärmefreisetzung wird für eine große Anzahl von organischen Flüssigkeiten und Gasen, als auch organischen Feststoffen ein Wert von 13,1 MJ pro kg verbrauchtem Sauerstoffes bei vollständiger Verbrennung angegeben. Es wird betont, daß es sich um ein Näherungsverfahren handelt, bei dem folgende Hauptannahmen gemacht werden:

- * Der Betrag der freigesetzten Energie (siehe oben) wird als konstant angenommen. Falls die Zusammensetzung der Brandlast bekannt ist, sollte der genauere Wert ermittelt und verwendet werden.
- * Alle Gase werden als ideal angenommen, d.h. ein Mol jedes Gases nimmt ein konstantes Volumen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur ein.
- * Die am Brandherd einströmende Luft besteht aus O_2 , CO_2 , H_2O und N_2 . Alle inerten Gase, die nicht an den Verbrennungsreaktionen teilnehmen, werden mit dem Stickstoffanteil zusammengefaßt.
- * O_2 , CO_2 und CO werden auf trockener Basis gemessen, d.h. Wasserdampf wird aus der Gasprobe entfernt, bevor die Gasanalysemessungen durchgeführt werden, da die handelsüblichen Gasanalysegeräte feuchte Gase nicht handhaben können.

Weiterhin ist die Messung des Gasvolumenstromes erforderlich, der zum einen aus der Messung des Druckabfalles und der Abgastemperatur errechnet werden kann. Zum andere kann der Druckver-

lust durch Messung der Strömungsgeschwindigkeit an einem Meßpunkt in der Mittellinie des Kanals ermittelt werden. Der Gasvolumenstrom wird dann unter Berücksichtigung eines vorherbestimmten Geschwindigkeitsprofils im Kanal ermittelt. Das Geschwindigkeitsprofil wird vor dem Brandversuch über eine repräsentative Anzahl von Geschwindigkeitsmessungen über dem Kanalquerschnitt ermittelt. Üblicherweise ist bei Brandversuchen im Großmaßstab die Strömung im Kanal turbulent. In der Arbeit wird das Berechnungsverfahren näher erläutert.

Zu Ungenauigkeiten bei diesem Verfahren kommt es, wenn außer den obenaufgeführten Gaskomponenten andere Verbrennungsprodukte entstehen, z.B. HCl oder weitere noch oxidierbare Kohlenwasserstoffe. Hier wären weitere Meßgeräte, wie z.B. Flammenionisationsdetektoren zur Messung von Kohlenwasserstoffen erforderlich. Eine Aussage, welche Stoffe, insbesondere welche Kohlenwasserstoffe vorliegen, wären allerdings erst durch eine verfeinerte Analysentechnik mit z.B. Gaschromatographen und Massenspektrometern möglich.

Janssens /26/ gibt hierbei die Berechnungsgleichungen für die Fälle an, daß folgende Gaskomponenten gemessen werden:

Fall 1: Messung von O_2

Fall 2: Messung von O_2 und CO_2

Fall 3: Messung von O_2 , CO_2 und CO

Fall 4: Messung von O_2 , CO_2 , CO und H_2O

Durch die Erhöhung Anzahl der gemessenen Gasanteile wird die Genauigkeit des Meßverfahrens vergrößert.

Hiebei ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei beiden Autoren die unverbrannten Kohlenwasserstoffe bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

Nach Cooper /27/ wird ein Kalorimeter dazu verwendet, um die Verbrennungseigenschaften von idealisierten und praxisbezogenen Brandlastaufbauten unter der Bedingung ungestörten Abbrandes zu

untersuchen. D.h. die Umfassungsbauteile sollen den Brandablauf nicht beeinflussen. Der Absaugvolumenstrom soll einer rein auftriebsbehafteten Strömung entsprechen. Zum einen werden Kalorimeter dazu verwendet, die Verbrennungsprodukte abzusaugen, zum anderen um die Rauchgaszusammensetzung und die Wärmefreisetzung zu bestimmen.

Jedes Kalorimeter ist wird bei seinen Einsatzbedingungen durch folgende Faktoren beschränkt:

1. Fähigkeit, alle anfallenden Verbrennungsprodukte ohne bedeutende Leckverluste abzusaugen.
2. Die Rauchgastemperaturen oberhalb der Brandstelle im Bereich des Kalorimeters sollen durch die Absaugung so niedrig gehalten werden, daß eine Wärmerückstrahlung keinen Einfluß auf den ungestörten Abbrand der Brandlast hat.
3. Das Kalorimeter soll so hoch über der Brandlast angeordnet werden, daß die Flammen die Bauteile des Kalorimeters nicht berühren und nicht in den Absaugkanal des Kalorimeters gelangen um einen ungestörten Abbrand zu ermöglichen.
4. Zur Messung der Wärmefreisetzung nach der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode und der Rauchgaszusammensetzung soll das Kalorimeter nicht so hoch über der Verbrennungszone angeordnet werden, damit die eintretende Luft nicht zu einer übermäßigen Verdünnung der Brandprodukte und damit ungenauen Konzentrationsmessungen führt.

Cooper gibt in seiner Arbeit Hinweise und Methoden, um möglichst genaue Meßergebnisse bei den unterschiedlichen Betriebs- bzw. Brandbedingungen zu erzielen.

Ein Industriekalorimeter ähnlich der Anlage des Swedish National Testing and Research Institute (SP) mit einem Durchmesser von 6 m für die Bestimmung von Wärmefreisetzungen bis 10 MW sowie ein kleineres Kalorimeter stehen für Versuche in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik seit kurzem zur Verfügung.

3.1.3 ABBRANDWAAGE

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wird die Wärmefreisetzung außer durch die Sauerstoffverbrauchsmeßmethode durch Abbrandwaagen verschiedener Größe ermittelt. Die größte im Moment zur Verfügung stehende Abbrandwaage hat die Abmessungen 5 m * 5 m. Die Abbrandwaage besteht aus einer Trägerkonstruktion, einer Gitterauflage sowie 4 Druckkraftaufnehmern. Hiermit wird der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse während der Brandversuche meßtechnisch erfaßt. Durch Differentiation dieser Kurve erhält man die Abbrandrate und über die Verwendung eines entsprechend der Komponenten der Brandlast gewichteten Heizwertes den beim Abbrand freigesetzten Gesamtwärmestrom. Die Probleme bei der Gasanalyse innerhalb der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode treten bei diesem Verfahren nicht auf, jedoch führt die thermische Auftriebsströmung beim Brand zu einer Entlastung der Gewichtsaufnehmer und damit unter bestimmten Versuchsbedingungen zu einem Fehler. Weiterhin kann die Wärmefreisetzung nur bis zum Löscheinsatz bestimmt werden, da beim Löschen die Brandlast befeuchtet wird und somit das Gewicht der Brandlast wieder ansteigt. Es kommt hierbei zu einem extrem steilen Abfall der Abbrandkurve. Der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse ist daher aufgrund des Löschwassereinflusses vom Zeitpunkt des Löschbeginns an nicht mehr bestimmbar. Weitere Fehlerquellen bei der Bestimmung des Wärmestromes sind die Genauigkeitsgrenzen der Waage (Druckkraftaufnehmer) sowie die unvollständige Verbrennung. Die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eingesetzten Aufnehmer haben die Genauigkeitsklasse 0,1 ($\pm 0,1\%$ vom Skalenendwert) und eine zulässige Belastung von 2 Tonnen je Aufnehmer. Hieraus ergibt sich eine Genauigkeit von ± 2 kg je Aufnehmer. Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit wird die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhandene Abbrandwaage vor jedem Brandversuch mit Gewichten geeicht.

Die Bestimmung der Wärmefreisetzung erfolgte bei den bisherigen Versuchen mit Hilfe der Abbrandwaage, da das Industriekalorimeter zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stand.

Brein beschreibt diese Methode zur Bestimmung des freigesetzten Wärmestromes in /2/.

Die Abbrandmasse ΔM ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse M_0 und der noch nicht verbrannten Masse der gelagerten Stoffe zum Zeitpunkt t zu

$$\Delta M = M_0 - M(t) \quad (7)$$

Die zeitliche Abbrandrate \dot{M} ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \frac{dM}{dt} = \dot{M} \quad (8)$$

Hiernach 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 Verbrennung.

$$\dot{Q} = \dot{M} H_u \quad (9)$$

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

$$\bar{H}_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i H_{u,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n p_i H_{u,i} \quad (10)$$

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist wesentlich geringer als der nach Gleichung (9) errechnete Wärmestrom. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch eine unvollständige Verbrennung der Heizwert H_u nicht erreicht wird und Wärme durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, durch Sauerstoffmangel sowie durch nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe und führt u.a. zu einer Rußbildung. 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.

Bei den an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brandversuchen wurden die in der **Tabelle 4** aufgeführten Materialien in unterschiedlicher Zusammensetzung verwendet. Mit den in **Tabelle 4** angegebenen Massen P_i und Heizwerten $H_{u,i}$ erhält man für den Lageraufbau mit Gitterboxen, dem Brandgut Kartons und Holzwolle als Stoßschutzmaterial (nachfolgend mit HW bezeichnet) einen Wert von $\bar{H}_u = 15,4$ MJ/kg bzw. bei Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum anstelle von Holzwolle (nachfolgend mit PS bezeichnet) 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 von HW ergibt sich hier-

bei beim Palettenblocklager ein Wert von $\bar{H}_u = 15,8$ MJ/kg bzw. bei PS ein Wert von $\bar{H}_u = 18,0$ MJ/kg. Beim Regalpalettenlager ergibt sich bei PS ein Wert von $\bar{H}_u = 17,5$ MJ/kg. Für die Abminderung des theoretischen Wärmestromes wird nach /2/ ein Wert von 50 % angenommen. Damit ergibt sich der fühlbare Wärmestrom bei den hier durchgeführten Brandversuchen unter Verwendung von Holzwolle als Stoßschutzmaterial bei:

Gitterboxlagerung bzw. Blocklagerung

$$\dot{Q}_{\text{fHW,G,Bl}} = 1000/60 * 0,5 * 15,4 * \dot{M} = 128,3 * \dot{M} \quad (11)$$

Palettenblocklagerung

$$\dot{Q}_{\text{fHW,PAL}} = 1000/60 * 0,5 * 15,8 * \dot{M} = 131,7 * \dot{M} \quad (12)$$

Für Polystyrol-Partikelschaum als Stoßschutzmaterial ergeben sich die entsprechenden Gleichungen.

$$\dot{Q}_{\text{fPS,G,Bl}} = 1000/60 * 0,5 * 22,0 * \dot{M} = 183,3 * \dot{M} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{\text{fPS,PAL}} = 1000/60 * 0,5 * 18,0 * \dot{M} = 150,0 * \dot{M} \quad (14)$$

Bei der Regalpalettenlagerung ergibt sich für PS

$$\dot{Q}_{\text{fPS,REG}} = 1000/60 * 0,5 * 17,5 * \dot{M} = 145,8 * \dot{M} \quad (15)$$

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

In den Untersuchungen /5,6,22/ wird vorwiegend die Brandentwicklungsphase betrachtet, d.h. der Zeitraum in der ein Brand von der Zündung zum vollentwickelten stationären Brand übergeht (siehe auch den idealisierten Verlauf der Abbrandmasse nach Bild 2)

3.1.4 MESSUNG DER WÄRMESTRAHLUNG

Bei einem Teil der bisher durchgeführten Untersuchungen (siehe /6/) wurde eine Wärmestrahlungsmessung durchgeführt. Auf die Ergebnisse dieser Messungen wird in Abschnitt 3.2.2.3 näher eingegangen. Die Messung erfolgte mit Wärmestrahlungsaufnehmern vom Typ Gardon. Das Meßverfahren beruht darauf, daß der Wärmestrom an einer geschwärzten Sensoroberfläche absorbiert wird. Dieser Wärmestrom wird an eine integrale Wärmesenke übertragen, deren Temperatur unterhalb der Oberflächentemperatur am Sensor liegt. Die Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturmeßstellen Sensor und Wärmesenke innerhalb des Aufnehmers ist proportional der übertragenen Wärme und daher proportional der absorbierten Wärme. Bei den Messungen wurden Aufnehmer mit einem Öffnungswinkel von 150° verwendet. Bei den vorwiegend untersuchten Abständen vom brennenden Lagerstapel im Bereich zwischen 0,4 m und 1,0 m, erfaßt der Aufnehmer einen Radius von 1,49 m (entsprechend einer Kreisfläche von $6,98 \text{ m}^2$) bei einem Abstand von 0,4 m und einen Radius von 3,73 m (entsprechend einer Kreisfläche von $43,76 \text{ m}^2$) bei einem Abstand von 1,0 m. Der in Abschnitt 3.2.2.3 beschriebene Lageraufbau wird daher zumindest am gezündeten Stapel vollständig vom Wärmestrahlungsaufnehmer erfaßt.

Bei der Beurteilung der Meßwerte tritt die Problematik auf, daß die Lagerstapel keine konstante Strahlungsintensität über der Fläche aufweisen. Teile des Lagerstapels brennen, andere Teile dagegen nicht. Auch der brennende Teil weist keine konstante Strahlungsintensität auf. Das vom Aufnehmer abgegebene Signal entspricht daher einem Mittelwert der Wärmestrahlung des gesamten erfaßten Bereiches.

3.1.5 BESONDERE MESSTECHNISCHE PROBLEME

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung von gegenwärtig bestehenden meßtechnischen Problemen für die Erfassung von für den Brand- und Löschvorgang relevanten Kenngrößen, die für die Festlegung von Anfangs- und Randbedingungen bei numerischen Simulationen erforderlich sind.

Die meßtechnische Erfassung dieser physikalisch/chemischen Größen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt entweder nicht oder mit nur unzureichender Genauigkeit möglich. Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, daß bei einigen Messungen die zeitliche Änderung der Meßgröße nicht schnell genug erfaßt werden kann.

3.2 **EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN**

3.2.1 **TROPFENGRÖSSENUNTERSUCHUNGEN**

Von besonderer Bedeutung für die Simulation der Wasserbeaufschlagung ist die Kenntnis des Tropfenspektrums des jeweiligen Sprinklers. Hierfür wurden die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik verwendeten Sprinklertypen von der Firma Lechler* bezüglich des Tropfenspektrums und der vertikalen Tropfengeschwindigkeit analysiert. Verwendet wurde hierzu ein Phasen/Doppler-Teilchenanalysator nach Bild 3. Auf die Funktionsweise des Gerätes wird in /20/ näher eingegangen.

Bisher wurden die Tropfengrößen und deren Geschwindigkeitskomponenten in horizontaler und vertikaler Richtung direkt beim Verlassen des Deflektors meßtechnisch noch nicht erfaßt. Die Tropfengrößen in dieser Arbeit wurden in einem Abstand von 1,5 m vom Sprinkler in normaler Umgebung, d.h. ohne Brandeinfluß, ermittelt. Im Brandfall verändern die aufsteigenden heißen Rauchgase die Tropfendurchmesser und die Tropfengeschwindigkeiten sowie die Bewegungsrichtung der Tropfen durch Gegenströmung, Verdunstung, Verdampfung, Lufteinsaugung durch den Sprühnebel, Verwirbelungen etc. zeitlich und örtlich. Auch in normaler Umgebung ändern sich die Tropfengeschwindigkeiten und Tropfendurchmesser etwas durch Auftrieb und Verdunstung.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß es sehr problematisch, wenn nicht gar unmöglich ist, ein Phasen-Doppler-Anemometer bei einem realen Lagerbrand bei gleichzeitigem Löscheintritt einzusetzen, um die zeitlichen Veränderungen des Tropfengrößenspektrums und des Tropfengeschwindigkeitsspektrums meßtechnisch zu erfassen.

* Lechler GmbH + Co KG
Präzisionsdüsen Anlagenbau
Höhenstraße 24
W-7012 Fellbach

Neben dem Problem der obengenannten Veränderungen tritt ein weiteres meßtechnisches Problem auf: Neben der Bestimmung des Tropfenanteils ist die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit im Rauchgas-, Flammenbereich sehr problematisch. Zum einen machen hier meßtechnisch die hohen Temperaturen von weit über 100° C sowie die korrosiven feststoffbeladenen Rauchgase Probleme. Weiterhin liegen Konzentrationsgradienten des Wasserdampf- und Tropfengehaltes innerhalb der Lageranordnung vor. In kälteren Zonen liegen Temperaturen unter 100° C vor. Im Flammenbereich kommt es dagegen zur Bildung von überhitztem Dampf. Diese Konzentrationsgradienten verändern sich örtlich und zeitlich je nach Flammen- und Brandausbreitung sowie in Abhängigkeit der örtlichen Ventilation.

Gerade aber diese Werte sind von entscheidender Bedeutung für die Festlegung von Anfangs- und Randbedingungen für die numerische Simulation.

Aufgrund der mit dem Phasen-Doppler-Anemometer ermittelten Tropfendurchmessern wurden verschiedene Arten von Verteilungen wie Anzahlhäufigkeitsverteilung, einfache Volumenverteilung, kumulierte Volumenverteilung und Geschwindigkeitsverteilung sowie weitere Kenndaten des Tropfenspektrums, wie Sauter-Durchmesser, Halbwertstropfendurchmesser, verschiedene Mittelwerte und Standardabweichung für die verschiedenen Sprinklertypen ermittelt. Diese Ergebnisse sind in /14/, /15/ und /20/ detailliert beschrieben. Insbesondere wird auf den anzahlbezogenen Halbwertstropfendurchmesser $D_{A50\%}$, den volumenbezogenen Halbwertstropfendurchmesser $D_{V50\%}$, den arithmetischen Mittelwert der Tropfendurchmesser D_{10} und den Sauter-Durchmesser D_{32} eingegangen.

In dieser Arbeit soll nur an ausgewählten Ergebnissen der Messungen mit dem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator aufgezeigt werden, welche Unterschiede sich bei unterschiedlichen Sprinklertypen und Betriebsbedingungen ergeben.

Bild 4 zeigt die Anzahlhäufigkeit von Tropfendurchmessern ver-

schiedener Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Aus anlagentechnischen Gründen konnten die Tropfenspektren nur bei dieser Höhe ermittelt werden. Die Originaldiagramme sind derart modifiziert worden, daß die große Anzahl der gemessenen Tropfengrößen in 5 Fraktionen zusammengefaßt werden. Es wird hierbei entsprechend der %-Anteile der Originalkurve ein gewichteter Mittelwert des Tropfendurchmessers für jede der 5 Fraktionen errechnet und dieser in Bild 4 dargestellt. Diese Datenreduzierung ist erforderlich, da das Programm zur numerischen Simulation eines Polyschwarmes, auf das in Abschnitt 4.2 näher eingegangen wird, in der gegenwärtigen Form maximal 5 Tropfengrößen mit den entsprechenden Massenanteilen verarbeiten kann. Die Diagramme sind so zu interpretieren, daß die Aufsummierung der bei den jeweils 5 Markierungen einer Kurve vorliegenden Anzahlhäufigkeitswerte 100% ergeben. Es ist eindeutig erkennbar, daß bei höherem Durchsatz, der im vorliegenden Fall durch eine Drucksteigerung von 0,5 bar Überdruck auf 5 bar Überdruck erzielt wurde, die Tropfengrößen beträchtlich abnehmen. Auch ergeben sich beim Vergleich der verschiedenen Sprinkler deutliche Unterschiede. Es ist erkennbar, daß bei kleinem Durchsatz (kleiner Druck) des jeweiligen Sprinklers sich die Hauptanzahl der Tropfen im Bereich bis 500 μm , beim großen Durchsatz (großer Druck) im Bereich bis 300 μm befinden. Die großen Tropfen liegen bei allen Sprinklertypen nur in sehr geringen Mengen vor.

Wie die Untersuchungen in /20/ gezeigt haben, sollen in allen physikalischen und chemischen Vorgängen zur Bildung des mittleren Durchmessers die Teilchenabmessungen verwendet werden, die Einfluß auf den ablaufenden Prozeß haben. Für den Wärme- und Stoffaustausch, gekoppelt mit einer Bewegung der Tropfen, ist dies der SAUTER-Durchmesser oder gleichwertiger Kugeldurchmesser D_{32} , der die Summe aller Tropfenvolumina zu der Summe aller Tropfenoberflächen ins Verhältnis setzt.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^3}{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^2} \quad (16)$$

k : Anzahl der Durchmesserfraktionen

n_i : Anzahl der Tropfen in der Fraktion i

D_{Ti} : Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm

Der Sauter-Durchmesser spielt für ein umströmtes Teilchen eine ähnliche Rolle wie der hydraulische Durchmesser für durchströmte Körper. Bei der numerischen Simulation wird dieser zur Charakterisierung des Monoschwarmes herangezogen.

Bild 5 zeigt den Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühradus. Man erkennt die Abnahme der Tropfengröße bei größerem Durchsatz. Eine Abhängigkeit der Tropfengröße vom Radius des Sprühkegels ist nicht eindeutig feststellbar, obwohl eine leichte Tendenz zu erkennen ist, daß sich die größeren Tropfen mehr im äußeren Bereich aufhalten. Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der größeren Masse der Tropfen und dem damit größeren Impuls.

Bild 6 zeigt den über dem Sprühkegelradius gemittelten Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Die Tropfendurchmesser liegen beim kleinen Durchsatz zwischen ca. 900 μm und 1250 μm und beim großen Durchsatz im Bereich zwischen ca. 350 μm und 530 μm .

Bild 7 zeigt die mittleren vertikalen Geschwindigkeiten der verschiedenen Tropfengrößen bei unterschiedlichen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Die Geschwindigkeiten nehmen mit wachsendem Tropfendurchmesser infolge der großen Gewichtskraft und des

großen Impulses zu. Besonders beim Typ E werden große vertikale Tropfengeschwindigkeiten erzielt, was einer guten Löschwirkung zu Gute kommt.

3.2.2 BRANDVERSUCHE

Um verschiedene Lageranordnungen bezüglich der Flammen- und Brandausbreitung sowie des Löscheinsatzes untersuchen zu können, wurden geeignete Versuchsaufbauten mit den erforderlichen Meßeinrichtungen in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet (siehe auch Tabelle 6). Die Meßtechnik bei den Versuchen umfaßte u.a. die Messung zeitlicher Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen sowie des zeitlichen Verlaufes der Abbrandmasse mittels einer Abbrandwaage. Auf den Löscheinsatz wird in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13,14,15,16/ näher eingegangen. In diesen Arbeiten wird auf den Löschwasserverbrauch, die Löschwasserbeaufschlagung im kalten Fall und im Brandfall, den Löschbeginn und die Löszeit unter Variation der Lageranordnung, des Sprinklertyps und der Sprinkleranordnung detailliert eingegangen. Weiterhin werden die Auslösezeiten verschiedener Brandmeldertypen bei den Brand- und Lösversuchen in den Arbeiten aufgeführt.

Die Meßwertregistrierung sowie -auswertung erfolgte mit einer personalcomputergesteuerten Datenerfassungsanlage. Die Auswertung wurde durch die Aufzeichnungen von Farb-Video-Anlagen unterstützt.

Die Bilder 8, 9, 10, 11, 12 und 13 zeigen die unterschiedlichen Versuchsaufbauten zur Untersuchung der Problematik.

Bild 8 zeigt die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit 2 Lagerattrappen nach /4/, Bild 9 die eines Gitterboxlagers aus 2 Stapeln nach /5/, Bild 10 die eines Gitterboxlagers aus 4 Stapeln nach /6/, Bild 11 die eines Blocklagers nach /6/, Bild 12 die eines Palettenblocklagers nach /22/ und Bild 13 die eines Regal-

palettenlagers jeweils mit Angabe der Temperaturmeßstellen.

Bei der Bewertung der Versuchsergebnisse ist zu berücksichtigen, daß sich schwankende Umgebungsbedingungen in der alten nicht geschlossenen Versuchshalle auf die Brandausbreitung auswirkt haben. Wie bereits in /4/ und /5/ erläutert wurde, sind hier vor allem die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit für Unterschiede bei der Brandausbreitung verantwortlich. Diese haben ihre Ursache jedoch nicht nur in den natürlichen klimatischen Schwankungen, sondern auch in den vorhergehenden Versuchen, da durch die Verbrennung die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit erhöht werden. Beide Faktoren haben allerdings unterschiedliche Auswirkungen. 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.

3.2.2.1 ZWEI PARALLELE LAGERATTRAPPEN

Um eine Aussage darüber machen zu können, wie schnell sich ein Brand in vertikaler Richtung und auf eine benachbarte Brandlast ausbreitet, ist es sinnvoll, die Vorgänge zunächst an einem stark vereinfachten Modell zu betrachten und dieses dann in Stufen auf den realen Lagerfall zu erweitern.

Gemäß Bild 8 wurden zwei Lagerattrappen in verschiedenen Abständen parallel aufgestellt. An je einem Metall-Gestell wurden hierzu nichtbrennbare Stütz- bzw. Trägerplatten aus asbestfreiem Fibersilikat befestigt, auf denen handelsübliche einlagige Wellpappe als Brandlast mittels Draht fixiert wurde. Die Zündung erfolgte jeweils am Fußpunkt einer Attrappe.

Einen entscheidenden Einfluß auf den Brandverlauf hat die Auswahl der geeigneten Zündquelle. In der Praxis tritt eine große Zündquelle in der Regel bei Brandstiftung, eine kleine häufiger bei unbeabsichtigten Bränden auf. Wird bei Brandversuchen die Zündquelle relativ zum Lagergut zu groß gewählt, muß bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden, daß vor allem in der Entstehungsphase das Brandverhalten des Lagergutes vom Brandverhalten der Zündquelle überlagert wird. Bei einer sehr kleinen Zündquelle können sich insbesondere die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum und die Feuchte des Lagergutes in erhöhtem Maße verzögernd auf die Brandausbreitung, besonders während der Brandentwicklungsphase auswirken.

Die Zündung jeweils einer Lagerattrappe erfolgte mit einem relativ kurzen Reihenbrenner (Außendurchmesser: 4 mm) mit zwei Düsenbohrungen im Abstand von 20 mm. Der Brenner wurde mit einem Propan/Luftgemisch betrieben, wovon ca. 0,024 m³/h Propan im Betriebszustand durchgesetzt wurden. Das entspricht einer Wärme-freisetzung von ca. 0,6 kW. Der Propan-Durchsatz wurde mittels Druckminderer und Schwebekörper-Durchflußmesser bei jedem Versuch auf den angegebenen Wert eingestellt. Die Höhe der Zündflamme wurde dabei so bemessen, daß, wie bereits erwähnt, das

Brandverhalten der Zündquelle nicht die dominierende Rolle in der Brandentwicklungsphase spielt.

Bild 14 zeigt die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei einlagiger Wellpappe als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen zwischen den Lagerattrappen.

Man erkennt, daß sich der Brand bei größerem Abstand langsamer ausbreitet.

Hierbei überlagern sich unterschiedliche Faktoren. Ein geringerer Abstand bewirkt höhere Strömungswiderstände, die die Brandausbreitung behindern. Die Ansaugung der Verbrennungsluft durch die natürliche Zugwirkung des Kanals bzw. der Austausch Abgas/Luft wird erschwert. Gleichzeitig wird jedoch der konvektive Wärmeaustausch zwischen den Lagerattrappen erhöht und der Wärmeaustausch mit der Umgebung vermindert. Dieses hat eine stärkere Vorwärmung der noch nicht entzündeten Brandlast oberhalb der Zündquelle zur Folge, wodurch sich der Brand schneller ausbreitet. Ein größerer Abstand erhöht den Kamineffekt bzw. die thermische Auftriebsströmung und verbessert die Verbrennungsluftzufuhr, wobei aber die Wärmeverluste an die Umgebung zunehmen. Von den beiden Anteilen Konvektion und Strahlung verliert ersterer immer mehr an Bedeutung. Nach den bisher vorliegenden Versuchsergebnissen spielt der intensivere Wärmeaustausch zwischen den Wellpappeoberflächen die dominierende Rolle für die schnellere Brandausbreitung bei abnehmenden Abständen.

In **Bild 15** ist die Versuchszeit dargestellt, bei der die gegenüberliegende Lagerattrappe durch Wärmeaustausch zündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle. Es ist zu erkennen, daß mit wachsendem Abstand die Zündung der parallelen Wellpappe zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Infolge der langsameren Brandausbreitung bei größeren Abständen, welches gleichzusetzen ist mit einer langsameren Flächenausdehnung auf der Wellpappe, kommt es zu einer geringeren Wärmefreisetzung. Dies hat zur Folge, daß die zur Freisetzung von Zerset-

zungsgasen und zur Zündung erforderliche Energie in geringerem Maße aufgebracht wird. Ein weiterer Punkt ist, daß mit zunehmendem Abstand die Wärmeübertragung hauptsächlich durch Wärmestrahlung erfolgt, wogegen die konvektive Wärmeübertragung an Bedeutung verliert. Mit zunehmendem Abstand wird damit die auf die benachbarte Attrappe übertragene Energie immer geringer, so daß die Entzündung des Zersetzungsgas/Luftgemisches verzögert wird. Ab einem Grenzabstand reicht diese Energie nicht mehr dazu aus, die erforderliche Zündenergie aufzubringen. Der Grenzabstand, bei dem einlagige Wellpappe noch gezündet wurde, betrug bei diesem Versuchsaufbau 0,25 m. Dieser Abstand ist abhängig von der Größe und Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung, die wiederum ihre Ursachen in der stofflichen Zusammensetzung der Brandlast, dem Feuchtigkeitsgehalt der Brandlast und der Luft und der Größe der Zündquelle hat. Unterschiedliche Ventilationsbedingungen wurden nicht untersucht. Wie die bisherige Erfahrung gezeigt hat, haben unterschiedliche Ventilationsbedingungen ebenfalls einen erheblichen Einfluß. Diese Parameter haben einen Einfluß auf die Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse sowie den Verbrennungsprozess innerhalb der Brandlast und mit der Umgebung.

Ein eindeutiger Einfluß der Position der Zündquelle, erkennbar an der Streuung der Meßpunkte in Bild 15, war nicht festzustellen.

Ergänzend wurde ein Versuch mit dem Abstand 0,4 m durchgeführt, um Vergleichswerte zu Lageraufbauten größerer Ausdehnung zu erhalten, bei denen größere Abstände untersucht werden. Hierbei wurde auf die Untersuchung verschiedener Zündpositionen verzichtet.

Bild 16 zeigt die Höhe z_g , bei der die gegenüberstehende Lagerattrappe durch Wärmeaustausch zündet. Analog zur Zündzeit ist auch hierbei ein Anstieg mit wachsendem Abstand zu erkennen, wobei die Meßwerte mehr oder weniger stark streuen. Dies ist dadurch zu erklären, daß, wie bereits erläutert, die Brandaus-

breitungsgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand abnimmt. Bei geringem Abstand kommt es schon nach kurzer Zeit zu einer relativ hohen Wärmefreisetzung, die ausreicht, die gegenüberstehende Platte im unteren Bereich zu zünden. Bei größerem Abstand muß die Wellpappe erst durch heiße aufsteigende Rauchgase vorgewärmt werden, damit die durch den Brand freigesetzte Energie ausreicht, das Zersetzungsgas/Luftgemisch zu entzünden. Auch hierbei ist kein eindeutiger Einfluß der Position der Zündquelle zu erkennen.

Bei dem Maximalwert der Temperatur, die während der einzelnen Versuche gemessen wurde, ist nach Bild 17 eine abnehmende Tendenz mit größerem Abstand festzustellen. Dies ist auf die bereits diskutierte, langsamere Wärmefreisetzung und die erhöhte Luftzufuhr zurückzuführen.

3.2.2.2 GITTERBOXLAGER MIT ZWEI STAPEL

Bei dieser Lageranordnung nach Bild 9 wurden je 4 Gitterboxen übereinandergestapelt und zwei dieser Stapel parallel zueinander auf einer Abbrandwaage mit den Grundflächenabmessungen 5 m * 5 m aufgestellt. Die Abbrandwaage bestand aus einer Trägerkonstruktion, einer Gitterauflage sowie 4 Wägezellen. Jede Gitterbox wurde mit vier Kartons befüllt, was eine Zahl von 16 Stück pro Lagerstapel bzw. 32 Stück gesamt ergab. 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 HW oder PS, zwei der am häufigsten verwendeten handelsüblichen Stoßschutzmaterialien ausgefüllt. Die Versuche werden in den Bildern mit PS|| und HW|| bezeichnet. In Tabelle 4 finden sich nähere Angaben zur Brandlast und Zündquelle, wobei zusätzlich der jeweilige untere Heizwert H_u der Einzelkomponenten angegeben wird.

Als Zündquelle wurde ein mit 100 ml Brennspritus getränkter Weichfaserstab (Länge 600 mm, Querschnitt 18 mm * 30 mm) verwendet.

Bild 18 zeigt die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit für HW, Bild 19 für PS als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen zwischen den Lagerstapeln.

Wie bereits die Untersuchungen in /4/ gezeigt haben, nimmt die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand sowohl bei HW als auch bei PS ab. Dies ist unter anderem eine Folge des abnehmenden konvektiven Wärmeaustausches zwischen den gelagerten Gütern. Bei großen Abständen ist hauptsächlich der Wärmeaustausch durch Strahlung für die Zündung des Nachbarstapels verantwortlich, wobei die Wärmeverluste an die Umgebung eine bedeutende Rolle spielen. Weitere Faktoren für die Brandausbreitung zwischen den gelagerten Gütern, wie die Strömungswiderstände im Spalt, die thermische Auftriebsströmung sowie die Verbrennungsluftzufuhr beeinflussen die Brandausbreitung. Strömungswiderstände sind hauptsächlich bei kleinen Spaltbreiten nicht zu vernachlässigen, gleichzeitig wird die Verbrennungsluftzufuhr durch die natürliche Zugwirkung infolge der geringeren thermischen Auftriebsströmung des Spaltes bzw. der Austausch Abgas/Luft behindert. Da sich die Flammen insbesondere bei den kleinsten Abständen dieser Untersuchung innerhalb kürzester Zeit auf der Wellpappeoberfläche ausbreiten, ist zu schließen, daß sich ein mangelnder Austausch von Abgas/Luft sowie höhere Strömungswiderstände erst bei kleineren Abständen als 5 cm verzögernd auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit auswirken. Dieser Sachverhalt wurde bei dieser Versuchsserie nicht weiter untersucht.

Bild 20 zeigt die Versuchszeit t , bei der die gegenüberstehende Lagersäule durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes bei den verwendeten Stoßschutzmaterialien zündet.

In Bild 21 ist die Höhe z_g , bei der der gegenüberstehende Lager-

stapel als Funktion des Abstandes bei den verwendeten Stoßschutzmaterialien zündet dargestellt.

Man erkennt, daß mit wachsendem Abstand die Zündung des parallelen Stapels zu einem späteren Zeitpunkt und bei einer größeren Höhe erfolgt. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den in /4/ durchgeführten Untersuchungen. Mit zunehmendem Abstand erfolgt die Wärmeübertragung, wie bereits dargelegt, hauptsächlich durch Strahlung, d.h. die übertragene Wärmeenergie ist auch infolge der größeren Wärmeverluste an die Umgebung geringer. Hierdurch verzögert sich die Bildung von zündfähigem Zersetzungsgas/Luftgemisch. Oberhalb eines Grenzabstandes reicht diese Energie schließlich nicht mehr aus, das benachbarte Lagergut zu entzünden. Dieser liegt bei den in dieser Untersuchung durchgeführten Versuchen mit HW bei 1,0 m und mit PS bei 1,4 m. Die Unterschiede bezüglich der Stoßschutzmaterialien sind dabei bei kleinen Abständen relativ gering. Es ist jedoch zu erkennen, daß die Entzündung des Nachbarstapels bei PS früher und bei einer geringeren Höhe z_g erfolgt als bei HW. Dies ist auf den höheren Heizwert von PS zurückzuführen.

Betrachtet man den Maximalwert der Temperatur, der während der einzelnen Versuche gemessen wurde als Funktion des Abstandes nach Bild 22, so stellt man analog zu den Ergebnissen in /4/ eine Abnahme mit steigendem Abstand fest. Die Ursache ist, wie bereits erläutert, die langsamere Brandausbreitung und damit die ebenfalls langsamere Wärmefreisetzung sowie die größeren Wärmeverluste an die Umgebung. Polystyrol-Partikelschaum weist aufgrund des höheren Heizwertes eine höhere Brandtemperatur als HW auf.

Bild 23 zeigt die Abbrandmasse und Bild 24 den fühlbaren Wärmestrom als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ für die verschiedenen Abstände und Arten der Stoßschutzmaterialien während der Brandentwicklungsphase bei zwei parallelen Gitterboxtapeln. t_0 ist hierbei der Zeitpunkt, bei dem die Abbrandmasse $\Delta M_0 = 1$ kg beträgt. Nach diesem Zeitpunkt kann die unregelmäßige Zündphase

näherungsweise als abgeschlossen betrachtet werden. Einen Eindruck über die Größenordnung von t_0 vermittelt Bild 38. Bei diesen Versuchen liegt t_0 bei ca. 1,2 min.

Analog zur vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Bild 18 und 19) ist beim fühlbaren Wärmestrom (Bild 24) die Tendenz zu erkennen, daß dieser mit wachsendem Abstand abnimmt. Die Ursachen hierfür sind die gleichen wie bei der Ausbreitung der Flammen auf der Kartonoberfläche. Hierbei ist jedoch bemerkenswert, daß ein relativ konstanter hoher Wert des fühlbaren Wärmestromes bei einem Abstand von 0,2 m erreicht wird. Bei kleineren Abständen, in diesem Falle bei 0,1 u. 0,05 m liegt der mittlere Wert unterhalb des Wertes bei 0,2 m. Dieser Phänomen wurde bei beiden Stoßschutzmaterialien festgestellt. Bei der Abbrandmasse, die ein Maß für die Brandausbreitung in das Innere der Brandlast ist, machen sich bei einem kleineren Abstand als 0,2 m die höheren Strömungswiderstände, die geringere thermische Auftriebsströmung sowie der geringere Austausch Abgas/Luft bemerkbar.

Ebenfalls ist zu erkennen, daß der fühlbare Wärmestrom, welcher aus der Abbrandrate errechnet wurde, beim Stoßschutzmaterial Holzwolle unterhalb derer von PS liegt. Über die Berechnung des fühlbaren Wärmestromes wird in /5/ näher eingegangen. Die Hauptsache hierfür ist die schnellere und größere Wärmefreisetzung und damit frühere Zündung des Nachbarstapels bei PS.

Bemerkenswert bei den hier durchgeführten Versuchen ist, daß bei HW bei den Abständen 0,1 m; 0,2 m und 0,4 m und bei PS beim Abstand 0,2 m die Abbrandmasse (siehe Bild 23) nach der Zündphase näherungsweise linear verläuft. Es ist also kein eindeutiger Unterschied zwischen Brandentwicklungsphase und stationärem Abbrand zu erkennen, wie dies bei einer ideal verlaufenden Abbrandkurve nach Bild 2 der Fall ist.

3.2.2.3 GITTERBOXLAGER MIT VIER STAPEL

Bei diesem Versuchsaufbau nach Bild 10 wurden je 4 Gitterboxen übereinandergestapelt und vier dieser Stapel auf einer Abbrandwaage aufgestellt. Jede Gitterbox wurde mit 3 bzw. 5 Kartons einer der in Abschnitt 3.2.2.2 beschriebenen Brandlasten befüllt, was eine Anzahl von 48 bzw. 80 Stück pro Lagerstapel ergab. Die Versuche werden in den Bildern mit PS3, PS5, HW3 und HW5 bezeichnet.

Parallel zum vorderen linken Stapel wurde im Gitterboxenabstand eine Lagerattrappe aufgestellt, welche bereits bei den Versuchen in /4/ (siehe Abschnitt 3.2.2.1) verwendet wurde. Es handelte sich hierbei um ein Metall-Gestell, auf dem eine nichtbrennbare Stütz- bzw. Trägerplatte aus asbestfreiem Fibersilikat befestigt wurde. In einer Höhe von 1,5 m wurden mittig zwei Wärmeflußaufnehmer angebracht. Diese dienten dazu, die Wärmestrahlung, die an einem benachbarten Stapel auftritt, zu erfassen. Der Betrachtungswinkel dieser Aufnehmer betrug 150° . Im Gegensatz zu den Versuchen in /4/ wurde jedoch nicht die gesamte Oberfläche der Lagerattrappe mit Wellpappe belegt, sondern es wurde nur ein Wellpappeprobekörper mit den Abmessungen 10 cm * 30 cm in Höhe der Aufnehmer angebracht. Damit sollte verhindert werden, daß im Brandfall deren maximal zulässige Betriebstemperatur durch eine zu große Wärmefreisetzung überschritten wurde. Ebenfalls wurde der Aufstellungsort der Lagerattrappe so ausgewählt, daß diese rechtzeitig und relativ gefahrlos beim Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur der Aufnehmer entfernt werden konnte.

Beim Regallageraufbau wurde der Abstand L zwischen den Gitterboxen von 0 m bis 1,0 m bei 5 Kartons bzw. bis 0,8 m bei 3 Kartons pro Gitterbox erhöht. Es wurde an der in Bild 10 angegebenen Position Z gezündet.

Der Attrappenabstand konnte dabei nicht im gleichen Maße wie der Abstand zwischen den Stapeln verringert werden, da darauf ge-

achtet werden mußte, daß die maximal zulässige Betriebstemperatur der Wärmeflußaufnehmer nicht überschritten wurde. Als minimaler Abstand wurde daher bei HW 0,2 m und bei PS 0,4 m gewählt.

Bei 3 Kartons pro Gitterbox wurde auf einen größeren Abstand als 0,8 m verzichtet, da sich herausgestellt hat, daß eine Entzündung bei größeren Abständen mit höherer Wahrscheinlichkeit nur bei 5 Kartons pro Gitterbox eintritt.

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

Analog zu den Versuchen in /4/ und /5/, konnten die Brandgase frei nach oben abströmen, wodurch sich keine Staupunktströmung zumindest in der Nähe der Oberkante des Versuchsstandes ausbilden konnte, die die Brandausbreitung hätte beeinflussen können.

Bei den Versuchen wurden verschiedene Sprinklertypen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen eingesetzt und die Löschwirkung und Brandausbreitung untersucht. Auf die Ergebnisse der Löscheversuche wird in der Arbeit von Schatz /11/ näher eingegangen.

Bei diesen und den nachfolgend beschriebenen Versuchen wird die Wärmefreisetzung in der Brandentwicklungsphase bis zum Löscheintritt betrachtet, da dies, wie bereits in Abschnitt 3.1.3 über die Beschreibung der Messung der Wärmefreisetzung mit der Abbrandwaage erläutert, über den Zeitpunkt des Löschebeginns nicht möglich ist.

Die Bilder 25.1 bis 25.4 zeigen die vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten als Funktion der Versuchszeit.

Wie in den Bildern aus den Unregelmäßigkeiten der jeweiligen Reihenfolgen zu ersehen ist, haben bei dieser Position der Zündquelle die im Abstand L stehenden Stapel HR, HL und VR keinen

Einfluß auf die vertikale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenwurzel am Stapel VL. Dies steht im Unterschied zu den Ergebnissen in /4/ und /5/, wo die Zündung zwischen zwei parallelen Lagerstapeln erfolgte und daher der benachbarte Stapel je nach Abstand schon in der Zündphase einen mehr oder weniger großen Einfluß auf die Flammenausbreitung im Spalt hatte. Hier hatte sich auch eine eindeutige Tendenz ergeben, daß die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand u.a. infolge des abnehmendem konvektiven Wärmeaustausches und der größeren Wärmeverluste an die Umgebung abnimmt. Es zeigt sich, daß die Lageratruppe an der in Bild 10 angegebenen Position, sowie wegen der geringeren Abmessungen und der fehlenden Brandlast mit einem Lagerstapel bezüglich des Einflusses auf die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit nicht vergleichbar ist.

Aufgrund der relativ geschlossenen Kartonfront bei 5 Kartons gegenüber 3 Kartons pro Gitterbox breiten sich die Flammen bei 5 Kartons wesentlich schneller in vertikaler Richtung aus. Dagegen ergibt sich bei 3 Kartons eine verstärkte horizontale Flammenausbreitung in die Hohlräume.

Es ist weiterhin erkennbar, daß sich eine mit der Versuchszeit zunehmende Flammenausbreitungsgeschwindigkeit besonders bei 3 Kartons pro Gitterbox bemerkbar macht, da hier das Stoßschutzmaterial relativ früh zur Flammenausbreitung beiträgt.

Die Versuchzeit, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeübertragung (Strahlung und Konvektion) als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzünden, werden in den Bildern 26.1 bis 26.3 dargestellt. Bild 26.1 zeigt den Stapel HL (siehe Bild 10). Dieser wurde am häufigsten entzündet, da hier die Wärmeübertragung durch die großen benachbarten Flächen am größten ist. Die Untersuchungen zeigen, daß die Zündzeit mit zunehmendem Abstand wegen der abnehmenden konvektiven Wärmeübertragung und der größeren Wärmeverluste zunimmt. Die Wärmeübertragung erfolgt hauptsächlich durch

Strahlung. Die übertragene Wärmeenergie wird dabei auch infolge der größeren Wärmeverluste an die Umgebung geringer. Hierdurch verzögert sich die Bildung von zündfähigem Zersetzungsgas/Luftgemisch. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen in /5/. Die Zündzeit nimmt dabei in der Reihenfolge

HW5 > HW3 > PS5 > PS3

ab. Dies hängt mit der entgegengesetzt zunehmenden Wärmefreisetzung bei den verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien zusammen. Am zweithäufigsten wird der Stapel VR entzündet. Allerdings liegt hier eine nicht so eindeutige Tendenz in der Reihenfolge vor wie beim Stapel HL (siehe Bild 26.2). Am seltensten wird der Stapel HR bei größeren Abständen in das Brandgeschehen mit einbezogen (siehe Bild 26.3). Dieses hängt mit dem Löscheinsatz des Sprinklers zusammen, der meist vor dem Feuerübersprung auf Stapel HR auslöst. Auf dieses wird in /11/ näher eingegangen wird. Beim Vergleich der Zündzeiten bei den verschiedenen Stapeln ist zu erkennen, daß zwar der Stapel HL am häufigsten auch noch bei größeren Abständen entzündet wird, daß jedoch hier die Zündzeiten auf einem höheren Niveau liegen als bei den übrigen Stapeln. Dies dürfte daran liegen, daß es beim Stapel VL erst zum vollständigen Durchbrand kommen muß, bevor der Stapel HL entzündet werden kann. Die Höhe, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeübertragung als Funktion des Abstandes entzünden, wird in den Bildern 27.1 bis 27.3 dargestellt. Es liegt hierbei die Tendenz wie bei den Untersuchungen in /5/ vor, daß die Zündhöhe mit zunehmendem Abstand zunimmt. Dies hängt damit zusammen, daß bei kleinen Abständen bereits frühzeitig eine große Wärmemenge freigesetzt und durch Strahlung und Konvektion übertragen wird, die ausreicht den benachbarten Stapel zu entzünden.

Bild 28 zeigt den Maximalwert der Temperatur, der während der einzelnen Versuche gemessen wurde als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Stoßschutzmaterialien. Die Auswahl der Temperaturen erfolgte ohne Berücksichtigung der Position der Meßstellen

in den Lagerstapeln. Die Brandtemperatur nimmt mit zunehmendem Abstand wiederum wegen der größeren Wärmeverluste an die Umgebung sowie der abnehmenden konvektiven Wärmeübertragung ab. Die höchsten Temperaturen ergeben sich bei Verwendung von PS durch eine schnellere und größere Wärmefreisetzung. Allerdings kann hier nicht eindeutig gesagt werden, daß diese Temperatur bei 3 Kartons infolge einer schnelleren volumetrischen Brandausbreitung höher als bei 5 Kartons pro Gitterbox liegt.

Die Bilder 29.1 bis 29.4 zeigen den fühlbaren Wärmestrom \dot{Q}_f als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$.

In der Brandentwicklungsphase ist bei den hier durchgeführten Versuchen kein Einfluß des Abstandes auf die Brandausbreitung erkennbar. Dies hat wiederum seine Ursache in der Lage der Zündquelle. Bevor sich ein benachbarter Stapel (vorwiegend der Stapel HL) entzünden kann, muß es zum Durchbrand des Stapels VL kommen. D.h. der Stapel VL brennt ohne Einfluß der übrigen Stapel ab, wodurch in den meisten Fällen die Brandentwicklungsphase bereits beendet ist. Dies unterscheidet sich von den Untersuchungen in /5/, wo aufgrund der Zündposition zwischen den Stapeln der Nachbarstapel die Brandentwicklungsphase schon frühzeitig mitbeeinflusst. Eine Tendenz, daß bei Blocklagerbränden die Abbrandgeschwindigkeit größer als bei Regallagerbränden ist, ist aus den Versuchen zu erkennen. Hier dürfte die höhere Flammenausbreitungsgeschwindigkeit sowie die fehlenden Gitterboxen von Einfluß sein. Auch bilden sich beim Blocklager durch wachsende Instabilität und Neigung der Stapel Spalte aus, durch die der Austausch Abgas/Luft sowie die thermische Auftriebsströmung verbessert werden.

Bei den Versuchen ergibt sich folgende Reihenfolge bei den fühlbaren Wärmeströmen

$$\dot{Q}_{fPS3} > \dot{Q}_{fPS5} > \dot{Q}_{fHW3} > \dot{Q}_{fHW5} .$$

Diese Reihenfolge ergibt sich zum einen aus der größeren und schnelleren Wärmefreisetzung bei PS gegenüber HW und der schnelleren horizontalen Brandausbreitung bei 3 Kartons gegenüber 5 Kartons pro Gitterbox.

Bild 30 zeigt die mit den Wärmestrahlungsaufnehmern maximal während des Versuches ermittelte Wärmestrahlung als Funktion der Versuchszeit. In Einklang mit den Ergebnissen in /2/ ergibt sich die charakteristische Abnahme der Meßwerte in der Reihenfolge

PS3 > PS5 > HW3 > HW5 .

Ebenfalls ist auch hier eine Abnahme mit dem Abstand zu verzeichnen.

Aufgrund der bereits in Abschnitt 3.1.4 erläuterten Problematik der Messung der Wärmestrahlung handelt es sich bei den gemessenen Wärmestromdichten nur um Anhaltswerte.

Bild 31 zeigt die Versuchszeit, bei der der Maximalwert der Wärmestromdichte aufgetreten ist. Hierbei ergibt sich eine Abnahme in der umgekehrten Reihenfolge

HW5 > HW3 > PS5 > PS3 .

Man erkennt zunächst eine Zunahme der Zeit mit dem Attrappenabstand. Dies bestätigt die Ergebnisse in **Bild 26.1**. Bei größeren Abständen ist jedoch eine Abnahme zu verzeichnen.

Durch den Vergleich der visuell mit der Stoppuhr ermittelten Zündzeiten des Wellpappeprobekörpers an der Lagerattrappe mit den mit den Wärmestrahlungsaufnehmern ermittelten Meßwerten ergibt sich ein Mittelwert für die für die Entzündung der bei den Versuchen verwendeten einlagigen Wellpappe erforderlichen Wärmestromdichten von $1,85 \text{ W/m}^2$. In der Literatur /1/ findet man Werte für die minimal notwendige Zündenergie zur Selbstentzündung von Karton von $1,65 \text{ W/cm}^2$ bis $1,75 \text{ W/cm}^2$.

Zu den Versuchen ist zu bemerken, daß sich bei frühzeitigem Löscheinsatz der Wellpappeprobekörper zum einen infolge Durchnässung zum anderen wegen der geringeren Wärmefreisetzung nicht entzündet. Durch die relativ kurze Zündquelle und die Zündposition ergibt sich eine ungleichmäßigere Brandentwicklung gegenüber den Versuchen in /5/. Dieses wirkt sich ebenfalls auf die Entzündung des Probekörpers aus.

3.2.2.4 BLOCKLAGER

In Ergänzung zu den Versuchen mit Gitterboxen wurden Blocklagerversuche nach Bild 11 mit gefüllten Kartons vergleichbarer Brandlast durchgeführt, um den Einfluß von Gitterboxen auf die Brandausbreitung zu untersuchen und um Erkenntnisse bezüglich des unterschiedlichen Gefährdungspotentials insbesondere beim Zusammenfallen des Blocklagers im Brandfall zu gewinnen. Die Versuche werden in den Bildern mit Bl bzw. Block bezeichnet.

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß bei Verwendung von PS das Lager nach ca. 4 Min. auseinanderfällt, bei Verwendung von HW nach ca. 5 Min. Die oberen teilweise brennenden Kartons flogen hierbei 3 m - 4 m weit. Dieses ist 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 HW 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. Hierbei können noch benachbarte Stapel entzündet werden, wenn die Gangbreite zwischen den Stapeln im Größenbereich der Lagerhöhe gewählt wird.

Wie aus Bild 25.2 und Bild 25.4 zu erkennen ist, ergeben sich für Blocklager relativ hohe vertikale Flammenausbreitungsge-

schwindigkeiten oberhalb der Zündquelle. Die Ursache hierfür ist, daß sich die Flammen ungehindert auf der Kartonoberfläche ausbreiten können, im Gegensatz zum Gitterboxlager, wo ein Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Wärme in das Metall der Gitterbox abgeleitet wird.

Eine Tendenz, daß bei Blocklagerbränden die Wärmefreisetzung größer als bei Bränden in Lägern mit Gitterboxen (siehe Bild 29.2 und 29.4) ist, ist aus den Versuchen zu erkennen. Hier dürfte die höhere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit einen Einfluß haben. Auch bilden sich beim Blocklager durch wachsende Instabilität und Neigung der Stapel Spalte aus, durch die der Austausch Abgas/Luft sowie die thermische Auftriebsströmung verbessert werden.

Der Lageraufbau mit Gitterboxen weist meßtechnisch den Vorteil auf, daß die bei der Blocklagerung auftretenden Nachteile, wie z.B. das Zusammenfallen des Lagergutes im fortgeschrittenen Brandstadium, nicht auftreten können und die Temperaturmeßstellen ihre örtliche Position im Brandfall beibehalten.

3.2.2.5 PALETTENBLOCKLAGER

Bei diesem Versuchsaufbau nach Bild 12 wurden vier Palettenstapeln auf einer Abbrandwaage aufgestellt. Jeder Lagerstapel bestand aus 2 Paletten und 24 gefüllten Kartons. Die Versuche werden in den Bildern mit PAL bezeichnet.

Das Lagergut und die Zündquelle wurde gemäß den bisherigen Lagerbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (siehe z.B. /2/, /3/, /6/ sowie Abschnitt 3.2.2.2), gewählt, um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erzielen und um eine zu große Variationsbreite bei den Versuchsparametern zu vermeiden.

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

Diese "Quasi-Blocklagerung" stellt ein erhöhtes Gefährdungspotential wegen der Möglichkeit des Zusammenfallens dar.

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

In den folgenden Bildern werden die hier erhaltenen Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen mit den anderen Lageraufbauten verglichen.

Bild 32 zeigt die Mittelwerte der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit auf der Brandlastoberfläche im Bereich über der Zündquelle.

Wird aus den für PS und HW bei den jeweiligen Versuchen ermittelten Werten der arithmetische Mittelwert gebildet, so ergeben sich die folgenden Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten für Gitterboxlager, Blocklager und Palettenblocklager:

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

Durch diese Werte werden die obigen Aussagen bestätigt, daß die höchste vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei einer geschlossenen Kartonfront, die bei den Lageranordnungen PS||, HW|| PS(Block), HW(Block), HW5 und PS5 vorliegt, auftritt. Einen bedeutenden Einfluß hat die Lage der Zündquelle, wie aus den Versuchen PS|| und HW|| erkennbar ist (siehe Bild 9).

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 33, für den Stapel VR in Bild 34 und für den Stapel HR in Bild 35 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 bereits 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 t_z und der Höhen z_z 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:

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

Höhe:

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

Stapel HR:

Zeit:

$$t_{Z,PS\parallel} < t_{Z,HW\parallel} < t_{Z,PS,PAL} < t_{Z,HW,PAL}$$

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. Wird aus allen Versuchen mit 4 Stapeln jeweils der arithmetische Mittelwert aus den Zeiten t_z und den Höhen z_z gebildet, so ergeben sich für die einzelnen Stapel die folgenden Werte:

Stapel	Zeit t_z [min]	Höhe z_z [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 gemessenen geringsten Höhe z_z . Allgemein ist eine Tendenz bei allen Versuchen erkennbar, daß bei Polystyrol-Partikelschaum eine schnellerer Flammenübersprung erzielt wird als bei Holzwolle. 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 den geringeren Zündhöhen bei den Palettenblocklagerversuchen (PAL) gegenüber den Gitterboxversuchen bemerkbar.

In Bild 36 ist die mittlere horizontalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit für den Stapel VL und in Bild 37 für den Stapel HL dargestellt.

Die Brandversuche haben gezeigt, daß sich die Flammen zunächst hauptsächlich auf der Unterseite der auf der Palette stehenden Kartons ausbreiten, wobei jedoch auch das etwas später sich entzündende Holz der Palette einen Einfluß auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. Da die Zeiten des Flammenfortschrittes rein visuell über Videoaufnahmen bestimmt worden sind, ergaben sich besonders beim Stapel HL durch Sichtbehinderung nach dem Öffnen des Sprinklers Probleme bei der Zeitnahme und damit bei der Bestimmung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, so daß in Bild 37 nur wenige Werte aufgeführt sind. Bezüglich des Einflusses des Stoßschutzmaterials auf die horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im Zwischenraum der Palette ist kein gravierender Unterschied zwischen HW und PS zu erkennen. Man erkennt, daß die horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit aufgrund des fehlenden thermischen Auftriebes wesentlich niedriger als die mittlere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (siehe Bild 32) ist. Bezüglich HW und PS 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. Aus den Bildern 36 und 37 folgt, daß die horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit am Stapel VL größer ist als am Stapel HL. Wie Bild 33 zeigt, erfolgt der Flammenübersprung auf den Stapel HL in ca. 1,8 m Höhe. Nach Bild 12 liegt diese Höhe z_z oberhalb der 2. Palette. 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. Weitere Einzelheiten dazu sind in /22/ aufgeführt.

Bild 38 zeigt die bereits in Abschnitt 3.2.2.2 erläuterte Zeit t_0 für die verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien. t_0 ist die Zeit, bei der sich nach dem Zünden die Masse des Brandgutes durch den Abbrand um 1 kg verringert hat.

Die Zeiten t_0 liegen im Bereich zwischen 1,18 min und 4,2 min, wobei die niedrigsten Werte bei den Untersuchungen nach /5/ (Versuchsdurchführung entsprechend Bild 9) aufgrund der größeren Zündquelle, der Zündung zwischen den Stapeln und der damit verbundenen schnelleren Abbrandgeschwindigkeit auftreten. Aus Bild 38 ergibt sich folgende Reihenfolge der Zeit t_0 für die verschiedenen Lagerkonfigurationen:

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

Bild 39 zeigt die mittlere Abbrandrate, Bild 40 die mittlere Wärmefreisetzung während der Zeit $t - t_0$ bis zum Löscheinsatz.

Die teilweise recht unterschiedliche Größe der mittleren Abbrandrate und der mittleren Wärmefreisetzung hängt hauptsächlich von der Lagerkonfiguration, der stofflichen Zusammensetzung, dem Zündort, den Ventilationsbedingungen und dem Löschbeginn des jeweiligen Sprinklers ab.

An dieser Stelle soll daraufhingewiesen werden, daß es ohne Löscheinsatz 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.

Man erkennt, daß die höchsten Werte bei 2 parallelen Gitterboxen entsprechend Bild 9, sowie den Blocklagerversuchen entsprechend der Anordnung nach Bild 11 auftreten. Im mittleren Bereich liegen die Wärmefreisetzungsraten für die Palettenblocklager nach Bild 12. Die geringste Wärmefreisetzungsrates trat bei den Gitterboxlagern nach Bild 10 auf.

In Bild 41 sind die Maximalwerte der Temperatur, die während der einzelnen Versuche gemessen wurden, sowie die dazugehörigen Versuchszeiten aufgeführt. Weiterhin sind die Temperaturmeßstelle TE (siehe Bild 9, 10, 11 und 12) sowie der jeweilige Stapel aufgeführt, an denen diese Temperaturen ermittelt wurden, aufgeführt. Man erkennt, daß in den Palettenblocklagern 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 Palettenblocklager.

3.2.2.6 REGALPALETTENLAGER

Bei diesem Versuchsaufbau nach Bild 13 wurde ein Regalsystem auf der Abbrandwaage aufgestellt und mit 36 Holzpaletten, auf denen jeweils 8 gefüllte Kartons (siehe Abschnitt 3.2.2.2) standen, beladen. Hierdurch ergab sich eine Gesamtzahl an Kartons von 288 Stück. Die Versuche werden in den Bildern mit REG bezeichnet.

Als Zündquelle wurde eine Zündwanne mit den Grundflächenabmessungen 20 cm * 30 cm verwendet, in die 0,5 l n-Heptan eingefüllt wurde. Im Gegensatz zu den Palettenblocklagerversuchen befand sich die Zündquelle zwischen den Stapeln II und III. Die genaue Lage der Zündquelle ist Bild 13 zu entnehmen.

Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 3.2.2.5 beschriebenen Palettenblocklager wurde die Sprinklerhöhe von 3,5 m auf 6,8 m erhöht. Dies hat außer auf die Brandausbreitung auch einen Einfluß auf den Auslösezeitpunkt und die Löschwirkung der Sprinkler.

Aufgrund des großen Abstandes von 1,3 m zwischen Stapel II und III wurde der Stapel III nicht entzündet. Die Brandausbreitung beschränkte sich auf den Bereich der Stapel I und II.

Bei diesem Versuchsaufbau ergab sich für PS eine Zeit t_0 (siehe Bild 38) von 3,23 Minuten. Dieser Wert liegt im Bereich der Werte für Palettenblocklagerversuche. Dieses gilt ebenfalls für die mittlere Abbrandrate nach Bild 39 sowie die mittlere Wärme-freisetzung nach Bild 40.

4. THEORETISCHE BEHANDLUNG DER BRAND- UND LÖSCHVORGÄNGE

4.1 DARSTELLUNG DER PROBLEMATIK BEI NUMERISCHEN SIMULATIONEN

Das wichtigste Anforderungskriterium an das Sprühverhalten eines Sprinklers ist, die auftriebsbehaftete Rauchgasströmung eines natürlichen Brandes zu durchdringen und die brennende Oberfläche zu löschen. Dabei werden zusätzlich die Flamme und die heißen Rauchgase sowie benachbarte Bauteile und die Brandlast gekühlt.

Untersuchungen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik haben ergeben, daß sehr komplexe Wechselwirkungen innerhalb des Systems Sprinkler/Brand/Umgebung ablaufen. Literaturlauswertungen haben gezeigt, daß diese Wechselwirkungen in den gegenwärtig verfügbaren Berechnungsmodellen nur zum Teil oder nur qualitativ erfaßt werden. Während des Lösolvorganges laufen 3dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas-/Luftgemisch, ab. Durch den Zerstäubungsvorgang wird ein Tropfenspektrum erzeugt, das durch einen mittleren Tropfendurchmesser nur bedingt beschrieben werden kann. Dieses Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung. Innerhalb des Tropfenschwarmes ergeben sich Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Tropfen, die bisher quantitativ noch nicht untersucht worden sind. Hier sei besonders der Impulsaustausch beim Zusammenstoß erwähnt. Durch das Einsprühen kommt es zu einer mehr oder weniger starken Beeinflussung der Rauchgasströmung, welche wiederum eine Rückwirkung auf das Spray hat. Die hierdurch hervorgerufene Änderung der Relativgeschwindigkeit hat einen Einfluß auf die jeweiligen Kennzahlen des Wärme-, Stoff- und Impulstransportes. Die Verdunstung und die Verdampfung der Wassertropfen erhöhen die Feuchtigkeit der umgebenden Luft bzw. des Rauchgases. Dieses hat ebenfalls einen Einfluß auf die Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen, u.a. durch Änderung des Konzentrationsgradienten zwischen Tropfen und Umgebung sowie durch die Veränderung der Stoffwerte,

vor allem auf der Gasseite. Je nach Rauchgastemperatur wird der entstehende Dampf mehr oder weniger stark überhitzt. Dieser überhitzte Dampf trägt neben dem Rauchgas zur Aufheizung der Tropfen und des noch nicht überhitzten Dampfes und der kälteren Luft bei. Die Ventilationsbedingungen im Raum haben ebenfalls einen erheblichen Einfluß auf das System Sprinkler/Brand.

Friedman /28/ hat zu dieser Thematik eine Arbeit veröffentlicht, die die Möglichkeiten und Grenzen einer numerischen Simulation des Systems Brand/Löschanlage aufzeigt. Er gibt eine Zusammenstellung von 62 Programmen aus 10 Ländern zur Simulation der Brandbekämpfung. Hierbei kann man unterscheiden zwischen Raumbrandmodellen, Brand/Sprinkler-Modellen sowie Unterprogrammen zur Berücksichtigung der Brandbelastung von Bauteilen, der Evakuierung von Gebäuden, des Auslöseverhaltens von Brandmeldern, der Brandausbreitung auf einer Wand und der Rauchausbreitung. Die Rohrnetzberechnung bei Sprinklern wurde nicht in die Betrachtung mit eingeschlossen. Eine große Anzahl der Programme ist auf Personal Computern lauffähig. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Zonenmodelle. Weiterhin werden Feldmodelle aufgeführt. Ein Feldmodell ist 2- oder 3dimensional und unterteilt den interessierenden Raum in eine große Anzahl von Elementen. Feldmodelle erfordern, abgesehen von sehr vereinfachten Modellen, Rechner, die die Leistungsfähigkeit eines PC um ein Vielfaches überschreiten. Zum Teil sind hier erst die schnellsten verfügbaren Rechner sinnvoll. Ein Zonenmodell wird meistens eindimensional behandelt und unterteilt den interessierenden Raum in mehrere Zonen. Der Hauptvorteil eines Feldmodells gegenüber einem Zonenmodell ist, daß bei ersterem die Berechnung des Strömungsfeldes möglich ist. Der Hauptvorteil eines Zonenmodelles liegt darin, daß durch dessen relative Einfachheit die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen im Rahmen vertretbarer Rechenzeiten möglich ist. Des weiteren lassen sich Zonenmodelle leichter in anderen Programmen integrieren als Feldmodelle. Bei allen Programmen ist eine genaue Kenntnis der Wärmefreisetzung des Brandes zur Festlegung der Anfangsbedingungen erforderlich. Gegenwärtig sind weder Feld- noch Zonenmodelle in der Lage, ge-

wisse Merkmale von Bränden im Zusammenhang mit dem Verbrennungsprozeß und den Turbulenzerscheinungen hinreichend zu beschreiben. Es werden 3 Modelle aufgeführt, die sich mit den Wechselwirkungen von Sprinklern mit einem Brand beschäftigen. Friedman kommt zu dem Urteil, daß diese Programme die Problematik sehr vereinfacht darstellen. Keines dieser Programme behandelt in hinreichender Form die Wechselwirkungen der aufsteigenden Gase im turbulenten Rauchgas/Flammenbereich eines Brandes mit herabfallenden Wassertropfen bei gleichzeitiger Lufteinsaugung. Das Ziel hierbei ist, die kritischen Bedingungen, unter denen die Tropfen den Rauchgas-/Flammenbereich durchdringen und den Brandherd erreichen können, zu bestimmen. Bei der Entwicklung von Raumbrandmodellen gilt es bezüglich der für die Berechnungen erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen folgendes zu beachten: Die Geometrie des Brandraumes sowie der Einfluß von und auf angrenzende Räume ist von großer Bedeutung. Falls es sich um einen unregelmäßigen Raum, z.B. mit gewölbter Decke, mit langem Gang mit und ohne Krümmung oder mit offenem Treppenhaus handelt, kann dieses durch ein Feldmodell besser beschrieben werden als durch ein Zonenmodell. Für die begrenzenden Flächen, wie Wände oder Decken müssen hierbei die thermodynamischen Eigenschaften bekannt sein. Weiterhin müssen der Ort des Brandherdes bzw. der Brandherde im Raum sowie die Ventilationsbedingungen spezifiziert werden. Dieses hat einen erheblichen Einfluß auf die Brandausbreitung. Neben dem Raum ist die Beschreibung des Brandes von entscheidender Bedeutung. Hierbei bestehen die Möglichkeiten, daß im einfachsten Fall ein Brand definierter Größe zu einer bestimmten Zeit beginnt und eine vorgegebene Zeit bei einer konstanten Wärmefreisetzung andauert. Hierbei ist die Kenntnis des stöchiometrischen Brennstoff/Luftverhältnisses und der entstehenden Brandgasmenge wichtig. Die nächste Stufe ist die Eingabe der Wärmefreisetzung als Funktion der Zeit. Realistischer ist jedoch der Fall, wenn der Abbrand gemäß der Verminderung des Sauerstoff-Gehaltes in der Umgebung des Brandes gesteuert wird. Hierbei spielt das Absenken der Rauchgasschicht und die Mischung der eingesaugten Luft mit den Brandgasen eine wichtige Rolle. Im Realfall wechselt der Brand bei hinreichender

Sauerstoffreduzierung vom Flammen- zum Schmelbrand. Dies hat einen viel geringeren Sauerstoffbedarf zur Folge, so daß der Sauerstoffgehalt in der Luft wieder ansteigt und wieder ein Flammenbrand entstehen kann. Dieser Vorgang kann von einem Computer nur dann hinreichend beschrieben werden, wenn die Kriterien für den Übergang von einem zum anderen Zustand rechnerisch berücksichtigt werden. Durch die Mischung der Verbrennungsprodukte mit der Luft wird die Temperatur der Luft erhöht, was wiederum wieder einen Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit hat. Die Wärmerückstrahlung des Raumes auf die brennende Oberfläche z.B. von der heißen Rauchsicht, der Decke, den Wänden und den Flammen selbst haben ebenfalls einen Einfluß auf die Brandausbreitung.

Bei der numerischen Simulation bestehen folgende Ungenauigkeiten:

- Die Wärmestrahlung hängt von der 4. Potenz der Temperatur ab. Hierdurch ergeben kleine Fehler bei der Berechnung der Temperatur der heißen Rauchgase oder der Decke und Wände große Fehler bei der Berechnung der Wärmestrahlung.
- Die Temperatur der oberen heißen Rauchgasschicht ist stark von der vom Brand angesaugten Luft und den Wärmeverlusten an die Decke abhängig. Keiner dieser Parameter kann mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Dies trifft besonders auf das Zonenmodell zu.
- Der Rauch emittiert nicht nur, sondern absorbiert und streut auch die Wärmestrahlung. Der kältere Rauch unterhalb des heißen Rauches beeinflusst die von oben kommende Strahlung.
- Die Berücksichtigung der Winkelverhältnisse zwischen den Strahlungsquellen und Strahlungsempfängern erfordert einen erheblichen mathematischen Aufwand.
- Die Strahlungseigenschaften vom Rauch, den Flammen, der Decke und sonstigen Flächen müssen bekannt sein.
- Einfache Zonenmodelle berücksichtigen nicht, daß der Bereich direkt über dem Brand viel wärmer als die weiter entfernten Bereiche, besonders bei großen Räumen, ist. Feldmodelle sind hierzu prinzipiell in der Lage, jedoch besteht hierbei die Kom-

plexizität, daß jedes der Vielzahl von Elementen Strahlung mit den übrigen Elementen austauschen kann. Aus diesen Gründen ist die korrekte Beschreibung der Vergrößerung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit durch den Strahlungseinfluß sehr schwierig. Neben der Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit aus Großbrandversuchen besteht die Möglichkeit aus Kleinbrandversuchen Kenntnisse über die Eigenschaften der Brandstoffe zu gewinnen, z.B. Zündzeitpunkt, Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und Abbrandgeschwindigkeit bei kleinen Probekörpern als Funktion der Wärmestrahlung und des Sauerstoffgehaltes. Hieraus kann dann mit einem halbempirischen Modell auf einen größeren Maßstab hochgerechnet werden. Auch kann mit diesen Basisdaten ein wissenschaftliches Modell im Gegensatz zu einem empirischen für die Beschreibung eines Raumbrandes im Großmaßstab entwickelt werden. Es müssen z.B. folgende zusätzliche Kenngrößen für die nach oben gerichtete Flammenausbreitung auf einer verkohlenden Oberfläche bekannt sein:

- Zündquelle (Intensität, Größe, Dauer)
- Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität des unverbrannten und des verkohlten Brandstoffes
- Oberflächentemperatur der pyrolysierenden Oberfläche
- Reflexion der Oberfläche
- Verdampfungswärme
- Verbrennungswärme der Pyrolysegase
- Effektivität der Verbrennung
- Strahlungswärme der Flammen
- stöchiometrisches Luft/Brandstoff-Verhältnis
- Anteil der giftigen und korrosiven Gase in den Verbrennungsprodukten

Weiterhin müssen die unterschiedlichen Verbrennungswärmen beim verkohlten Stoff und bei den Pyrolysegasen berücksichtigt werden. Große Unterschiede ergeben sich auch bezüglich des Abbrandverhaltens von aus mehreren Stoffen zusammengesetzter Brandlast. Hieraus ergibt sich, daß die Abbrandgeschwindigkeit als eine Anfangs- und Randbedingung für die numerische Simulation der am schwierigsten zu bestimmende Faktor in einem Modell ist.

Wichtig für die numerische Simulation ist auch die Kenntnis folgender Einflußfaktoren:

- Bildung von Kohlenmonoxid bei unvollständiger Verbrennung
- Luftansaugung durch den Brand
- Vermischung der heißen und kalten Luftschichten
- Wärmeverluste an die Decke mit zunehmendem Abstand von der Brandherdachse
- Zerbersten von Fenstern während des Brandes
- Rauchbewegung bei unterschiedlicher Raumform
- Strömung durch Belüftungsöffnungen
- Zündbedingungen für brennstoffreiche Verbrennungsprodukte beim Kontakt mit Frischluft
- Wirkung der Verbrennungsprodukte auf Menschen

Die Modelle liefern u.a. folgende Werte als Funktion der Zeit:

- Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Positionen
- Konzentration des Rauches, des Sauerstoffes und giftiger bzw. korrosiver Gaskomponenten an verschiedenen Positionen
- Thermische Belastung von Bauteilen
- Auslösezeiten von Sprinklern und Brandmeldern bzw. Effektivität dieser Anlagen
- Auslegung von Fluchtwegen

Friedman kommt zu dem Schluß, daß ein Modell einen realen Brand aus fünf möglichen Gründen nicht vollständig beschreiben kann :

1. Die im Modell verwendeten Idealisierungen und Vereinfachungen weichen beträchtlich von der Realität ab.
2. Die Eingabeparameter sind nicht exakt.
3. Keine korrekten Näherungswerte für Koeffizienten innerhalb des Programmes.
4. Fehlerhafte Berechnung von Werten infolge zu großer Zeitschritte bzw. zu großer Maschenweite beim Finite Elementen-Verfahren oder mathematischer Instabilitäten.
5. Fehlerhafte oder nichtreproduzierbare Meßwerte aus experimentellen Untersuchungen.

Um die Gültigkeit eines Modelles zu überprüfen, ist der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Ergebnissen aus Brandversuchen erforderlich. Hierdurch ist es möglich, ein Modell in Übereinstimmung mit den Meßwerten zu bringen. Gleichzeitig ergibt sich jedoch die Frage, ob das Modell unter anderen Bedingungen weiterhin seine Gültigkeit behält. Ein Modell ist dann überzeugend, wenn es für eine große Anzahl von Brandversuchen unter den unterschiedlichsten Randbedingungen und dem geringsten Aufwand für die Anpassung zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Jedoch ist es riskant, die überprüften Randbedingungen sehr stark zu modifizieren. Wichtig ist hierbei, durch eine Fehlerabschätzung die Abweichung der Rechenergebnisse von den Versuchsergebnissen zu kennen und zu wissen, unter welchen Randbedingungen die größten Fehler auftreten.

Das Ziel der Arbeit von Bilger /29/ ist es, wichtige physikalische und chemische Kenngrößen beim Brand und die Methode wie diese in Feldmodellen verarbeitet werden, zu untersuchen. Feldmodelle sind in der Lage, die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls, Stoff und Enthalpie in turbulenten auftriebsbehafteten Strömungen zu lösen. Ein Feldmodell zur Beschreibung von Bränden besteht aus einer großen Anzahl komplexer miteinander in Wechselwirkung stehenden Unterprogrammen. Die Untersuchung beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Beschreibung der turbulenten auftriebsbehafteten Konvektionsströmung, des konvektiven Wärmetransportes und die Modellierung des Verbrennungsprozesses unter Verwendung des Programmes JASMINE /30/. Bilger weist daraufhin, daß Feldmodelle weitaus leistungsfähiger als Zonenmodelle sind. Feldmodelle können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur qualitative Ergebnisse im Brandschutzingenieurwesen liefern. Um gültige Aussagen machen zu können, müssen dem Programmanwender die Anwendungsgrenzen bezüglich der jeweiligen Programmteile bekannt sein. In den falschen Händen können Feldmodelle katastrophal falsche Ergebnisse liefern. Es kann der Fall auftreten, daß die falsche Verwendung von mehreren Programmteilen zu einer Kompensation der Fehler führen. Es kann erwartet werden, daß Feldmodelle die Zonenmodelle im Brandschutzingenieurwesen in ca.

5 Jahren ablösen werden.

Tabelle 7 zeigt eine kurze Übersicht über die Problematik bei numerischen Simulationen.

4.2 NUMERISCHE SIMULATION

Für die rechnerische Simulation wurde von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ein Modell entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, den Einfluß einer Rauchgasströmung auf den Tropfenschwarm eines Sprinklers zu beschreiben. Bei einer rechnerischen Simulation müssen zum einen wegen bisher quantitativ nicht erfaßbarer Einflußgrößen, zum anderen zur Begrenzung der Rechenzeit und der Anforderungen an die Speicherkapazität der Rechenanlage Vereinfachungen getroffen werden.

Von entscheidender Bedeutung für die Wasserbeaufschlagung durch einen Sprinkler nach dem Auslösen ist dessen konstruktive Gestaltung. Diese beeinflußt zusammen mit dem Zerstäubungsdruck und dem Volumenstrom die Größe und Geschwindigkeit der Tropfen sowie die Form des Sprühkegels und damit die Wasserverteilung. Bei den konstruktiven Gestaltungsmerkmalen sind u.a zu nennen:

- Öffnungsquerschnitt des Sprinklers
- Durchflußkonstante des Sprinklers
- Gehäusegestaltung des Sprinklers
- Gestaltung des Deflektors

Insbesondere der Deflektor hat einen entscheidenden Einfluß auf das Sprühbild des Sprinklers. Die Randausbildung (Verzahnung) des Sprinklerdeflektors ist, wie Fotoaufnahmen und Videoaufzeichnungen gezeigt haben, für die Bildung von Strähnen im Sprühbild verantwortlich, d.h. es liegen örtlich höhere Tropfenkonzentrationen vor und zwar an den Stellen, wo das Wasser mehr oder weniger ungehindert durch die Zwischenräume im Deflektor austreten kann. An den Zähnen liegt eine Stauströmung vor. Den

Auftreffpunkt des Wasserstrahles auf den Zahn wird in der Strömungslehre vorderer Staupunkt genannt. Hier teilt sich die Stromlinie. Bei schlanken oder stromlinienförmigen Körpern schließt sich die Strömung wieder an der hinteren Körperkante zum hinteren Staupunkt zusammen. Bei kantigen Körpern tritt hinter dem Körper ein mehr oder minder ausgedehntes Totwassergebiet auf. Im Extremfall kann es zur Ausbildung eines Sprüh-hohlkegels kommen. Diese Totwassergebiete liegen beim Sprinkler an den Zähnen des Deflektors mehr oder weniger stark ausgeprägt vor. Weiterhin tritt eine Wirbelbildung am Deflektor auf. Der Bügel des Sprinklers hat ebenfalls einen Einfluß auf das Sprühbild bezüglich Verwirbelungen und Totwassergebiet. Diese, gegenüber einer normalen Düse besonderen Eigenschaften eines Sprinklers erschweren dessen numerische Simulation.

Die Bilder 57, 59, 61 und 63 belegen eindrucksvoll an Meßwerten die hieraus resultierenden unterschiedlichen Wasserbeaufschlagungen von 25 quadratischen Auffangwannen bei unterschiedlichen Sprinklertypen und Betriebsbedingungen und die damit verbundene Löschwirkung bei einem Brand. Näheres hierzu findet sich in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13,14,15,16/.

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit der Heißgasströmung eines Brandes wie folgt numerisch simuliert. Das Sprinklerspray wurde durch einen Monoschwarm aus Tropfen gleicher Größe oder einem Polyschwarm aus mehreren Tropfenfraktionen simuliert. Es wurden die Tropfengröße, der Sprinklervolumenstrom, die Sprinklerhöhe und die Wärmefreisetzung des Brandes variiert. Aus der gekoppelten Wärme-, Stoff- und Impulsbilanz zwischen den Tropfen und einer Heißgasströmung wurde eine Tropfenbilanz ermittelt, die besagt, welcher Massenanteil bei den vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen den Brandherd entgegen der Auftriebsströmung erreicht, welcher Anteil aus dem Flammen-/Rauchgasbereich verdrängt wird, welcher Anteil infolge der Auftriebsströmung nach oben mitgerissen wird und welcher Anteil im Flammen-/Rauchgasbereich verdampft. Weiterhin wurde die am Brandherd

auftretende Wasserbeaufschlagung sowie die durch den Tropfenschwarm absorbierte Wärme berechnet. Das entwickelte Programm gestattet es hierbei, diese Wasserbeaufschlagung von 25 unter dem Sprinkler aufgestellten quadratischen Wannen zu simulieren. Hierbei kann sowohl ein Monoschwarm mit einer konstanten Tropfengröße als auch ein Polyschwarm mit maximal 5 Tropfenfraktionen untersucht werden. Bei den Berechnungen wurden die Versuchs- und Meßergebnisse in Form von Anfangs- und Randbedingungen berücksichtigt.

Auf die Beschreibung des Modells wird in /17/, /19/ und /20/ ausführlich eingegangen. Bild 42 zeigt das Modell zur Berechnung der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung und der Wasserbeaufschlagung von Auffangwannen. Bild 43 zeigt das Flußdiagramm zur numerischen Simulation. Bild 44 zeigt den Radius der Flammen-/Rauchgassäule über dem simulierten Brandherd als Funktion der Wärmefreisetzung zwischen 100 kW und 2000 kW beim verwendeten Modell.

In /17/ und /19/ wurde festgestellt, daß erst Tropfen mit einem Durchmesser von mindestens 1 mm bei kleinen Wärmefreisetzungen von ca. 200 kW bis 400 kW bei den untersuchten Sprinklerhöhen 3 m und 4 m und den untersuchten Einsprühvolumenströmen an der Düse von 60 l/min und 90 l/min in der Lage sind, den Brandherd zu erreichen, kleinere Tropfen verdampfen oder kehren infolge der Auftriebsströmung ihre Bewegungsrichtung um. Größere Tropfen erreichen aufgrund ihres größeren Impulses auch bei höheren Wärmefreisetzungen den Brandherd. Ein Teil der Tropfen verläßt aufgrund des Einsprühwinkels und des Impulses den Flammen-/Rauchgasbereich. Dieses wird belegt durch die Bilder 45 bis 56. Hier werden die Tropfengrößen 0,2 mm, 1,0 mm und 2,0 mm jeweils bei der Sprinklerhöhe 3 m oder 4 m und einem Durchsatz von 60 l/min oder 90 l/min dargestellt. Ein höherer Durchsatz hat in den Berechnungen zur Folge, daß sich bei gleichem Düsendurchmesser die Einsprühgeschwindigkeit erhöht.

Die Bilder 57, 58, 59 und 60 zeigen die Meß- und Berechnungs-

werte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen im kalten Fall ohne Brand bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und den Volumenströmen 61 l/min bzw. 180 l/min unter Berücksichtigung des Sauter-Durchmessers (Monoschwarm). Dieser Sprinkler-Typ zeigt bei beiden Volumenströmen eine sehr geringe Wasserbeaufschlagung über der Wannensfläche. Ein großer Teil des Wassers wird außerhalb des Wannensbereiches verteilt. Um diesen Fall näherungsweise simulieren zu können, wird die vertikale Einsprühgeschwindigkeit im Bereich zwischen 10° und 90° um 99,7% abgemindert. Wegen programmspezifischer Stabilitätsprobleme ist dieser Wert statt 100% gewählt worden. Dieser Sprinkler erzeugt von allen untersuchten Typen beim großen Durchsatz den kleinsten Sauter-Durchmesser (siehe Bild 6) und bei der Anzahlhäufigkeitsverteilung (siehe Bild 4) die meisten kleinen Tropfen. Dies bedeutet, daß die Mehrzahl der Tropfen nur einen kleinen Impuls aufweisen und daher rasch in den Schwebestand gelangen, ohne die Wannen bzw. die brennende Oberfläche zu erreichen. Durch die Lufteinsaugung des Sprühkegels und durch Verwirbelungen werden die Tropfen leicht nach außen getragen. Diese Tatsache wird sich besonders im Brandfall bei einer vorliegenden Rauchgasgegenströmung durch eine abgeminderte Löscheinleistung bemerkbar machen.

Die Bilder 61 bis 64 zeigen die Meß- und Berechnungswerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und den Volumenströmen 163 l/min und 445 l/min. Dieser Sprinkler zeigt eine extrem große Wasserbeaufschlagung im Bereich unterhalb des Sprinklers.

Die hohe Wasserbeaufschlagung beim Sprinkler-Typ E ergibt sich aus den hohen vertikalen Tropfengeschwindigkeiten nach Bild 7. Der mittlere Sauter-Durchmesser nach Bild 6 bewegt sich dagegen nur im Mittelfeld. Der große Impuls der Tropfen dieses Sprinklers wird daher hauptsächlich durch die hohe Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen erzielt.

Die Wasserbeaufschlagung im Fall eines Brandes wurde bisher nur rechnerisch mit einer simulierten Brandquelle untersucht, da gegenwärtig das Problem der numerischen Simulation des Einflusses eines brennenden Lagerstapels auf die Wasserbeaufschlagung noch nicht gelöst ist. Die nachfolgenden Bilder zeigen einige Ergebnisse dieser Berechnungen.

Bild 65 zeigt den Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm nach /19/. Man erkennt, daß die höchsten Wasserbeaufschlagungen bei niedriger Wärmefreisetzung (geringe Rauchgasgeschwindigkeit), niedriger Höhe (kleiner Flugweg der Tropfen) und hoher Austrittsgeschwindigkeit an der Düse (großer Impuls der Tropfen) erzielt wird. Die Wasserbeaufschlagung nimmt mit steigender Wärmefreisetzung aufgrund der größeren Rauchgasströmung ab. Die Wasserbeaufschlagung nimmt mit steigender Wärmefreisetzung jedoch auch dadurch ab, da nach **Bild 44** auf die Querschnittsfläche bei dem simulierten Brandherd bezogen wird. Diese Fläche nimmt mit steigender Wärmefreisetzung zu.

Bild 66 zeigt den Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/. Dieser Vergleich belegt wiederum die Tatsache, daß erst Tropfen > 1 mm Durchmesser in der Lage sind, entscheidend zur Wasserbeaufschlagung am Brandherd beizutragen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde die Brandausbreitung und der Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen untersucht. Dazu wurden experimentelle Arbeiten durchgeführt, die durch theoretische Betrachtungen und numerische Simulationen sowie dem Studium der in- und ausländischen Literatur ergänzt wurden.

In einer großen Anzahl von Brand- und Löschversuchen wurde die Flammenausbreitung und Wärmefreisetzung bei unterschiedlichen Lageraufbauten, Brandlasten und Sprinklertypen untersucht.

Die hier gewonnenen Ergebnisse sind dazu geeignet, Lageraufbauten und Löschanlagen zu projektieren und numerische Simulationen zu kalibrieren. Weiterhin können thermische Belastungen von Gebäude- und Lagerbauteilen im Brandfall abgeschätzt werden.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß das System Sprinkler/Brand durch eine große Anzahl von Einflußgrößen bezüglich der Brandausbreitung, der Sprinkleranlage und der Wechselwirkungen zwischen Sprinkler/Brand/Umgebung gekennzeichnet ist.

Numerische Beschreibungen des Brand- und Löschaufbaues scheitern zum Teil daran, daß die dafür wesentlichen Vorgaben nicht bekannt sind, da Probleme bezüglich der meßtechnischen Erfassung von wichtigen Brandkenngrößen vorliegen. Die physikalisch/chemischen Größen sind zum Teil nur mit unzureichender Meßgenauigkeit erfaßbar oder gegenwärtig überhaupt nicht meßtechnisch erfaßbar.

Dies hat Auswirkungen auf numerische Simulationen. Hier fehlen dann die erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen oder aber die Meßgenauigkeit der Meßgröße ist so unzureichend, daß sich diese Fehler bei numerischen Iterationen vervielfachen.

Bei numerischen Simulationen ist zu beachten, daß bei der

Brandausbreitung und dem Löscheinsatz 3dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen Tropfenschwarm/Brandlast, zwischen Rauchgas/Flamme und Brandlast und zwischen Rauchgas/Flamme und Tropfenschwarm ablaufen. Umfassungsbauteile und Ventilationsbedingungen haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluß.

Diese Problematik kann mit Zonenmodellen nicht hinreichend gelöst werden. Feldmodelle wären unter Berücksichtigung aller relevanten Anfangs- und Randbedingungen in der Lage, die Problematik zu beschreiben.

6. **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 Anordnung gestapelt sind.
Teil 6: Großbrandversuche 5.
Forschungsbericht Nr. 72 der Arbeitsgemeinschaft 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 Arbeitsgemeinschaft 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 Arbeitsgemeinschaft 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 Arbeitsgemeinschaft 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
Feuerwehrrangelegenheiten.
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 Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

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 Feuerwehrangelegenheiten.

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 Feuerwehrangelegenheiten.

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 Feuerwehrangelegenheiten.

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 Feuerwehrrangelegenheiten.
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 Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1993)

/22/ Kunkelmann, J.:

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 11: Großbrandversuche 6 - Brandausbreitung in Palettenlagern und Vergleich mit Gitterbox- und Blocklagerung.
Forschungsbericht Nr. 88 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1994)

- /23/ DIN 18230 Baulicher Brandschutz im Industriebau.
Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN
Deutsches Institut für Normung e.V.
November 1982
- /24/ Dahlberg, M.: The SP Industry Calorimeter.
For Rate of Heat Release Measurements
up to 10 MW.
SP Report 1992:43, Borås,
Swedish National Testing and Research
Institute (1992)
- /25/ Persson, H.: Evaluation of the RDD-Measuring
Technique.
SP Report 1991:04, Borås,
Swedish National Testing and Research
Institute (1991)
- /26/ Janssens, M.L.: Measuring Rate of Heat Release by
Oxygen Consumption.
Fire Technology, August 1991
- /27/ Cooper, L.Y.: Some Factors Affecting the Design
of a Calorimeter Hood and Exhaust.
Journal of Fire Prot. Engr., 6(3),
1994, S. 99 - 112
- /28/ Friedman, R.: An International Survey of Computer
Models for Fire and Smoke.
Journal of Fire Protection
Engineering, 4(3), 1992, S. 81 - 92
- /29/ Bilger, R.W.: Computational Field Models in Fire
Research and Engineering.
Fourth International Symposium on
Fire Safety Science.
Ottawa, Canada, 13-17 Juni 1994,
S. 95 - 110
- /30/ Cox, G.
 Kumar, S. Field Modelling of Fire in Force
Ventilated Enclosures.
Combustion Science and Technology,
52, 1987, S. 7 - 23

7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1: Einflußgrößen auf die Brandausbreitung

Stoffliche Einflußgrößen	Geometrische Einflußgrößen	Zündquelle
<ul style="list-style-type: none">- verfügbare Masse- Brennbarkeit- Heizwert- Mindestzündenergie- Zündverhalten- Zündtemperatur- thermische Stoffgrößen	<ul style="list-style-type: none">- Stapelabstände- Volumenanteil des brennbaren Materials- Stapelhöhe- Umfassungsbaueteile* Anordnung* thermische Eigenschaften- Ventilation	<ul style="list-style-type: none">- Lage- Ausdehnung- Wärmefreisetzung

Tabelle 2: Einflußgrößen der Sprinkleranlage

Konstruktive Gestaltung der Löschdüse	Düsen im Lager	Betriebsbedingungen
<ul style="list-style-type: none">- Sprinklergehäuse- Düse (k-Wert, Nennweite)- Deflektor (Form und Anzahl der Zähne) <p>=> Tropfenverteilung, Tropfengeschwindigkeit, Sprühkegelform, Flugweite der Tropfen</p> <ul style="list-style-type: none">- Auslöseverhalten des Verschlusses	<ul style="list-style-type: none">- Ort- Anzahl- Sprührichtung <p>=> Wasserbeaufschlagung der Brandlast</p>	<ul style="list-style-type: none">- Betriebsdruck- Volumenstrom- Verwendung von Zusatzstoffen (z.B. Schaummittel, Quellskörper) <p>=> Tropfenverteilung, Tropfengeschwindigkeit, Flugweite der Tropfen</p>

Tabelle 3: Wechselwirkungen und Einflußfaktoren im System Sprinkler/Brand/Umgebung

- 3-dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impuls-transportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas/Luftgemisch
- Veränderung der Pyrolyse des Brandstoffes, der Flammenausbreitung und der Abbrandrate
- Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung
- Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Tropfen (Zusammenstoß, Ablenkung, Vereinigung)
- Ablenkung der Rauchgasströmung durch den Tropfenschwarm
- Ablenkung des Tropfenschwarmes durch die Rauchgasströmung
- Ablenkung des Tropfenschwarmes durch den Lageraufbau
- Ansaugung von Umgebungsluft durch den Brand
- Ansaugung von Umgebungsluft durch den Tropfenschwarm
- Verdunstung bzw. Verdampfung der Wassertropfen erhöhen die Feuchtigkeit des Rauchgases
 - => Änderung des Konzentrationsgradienten zwischen Tropfen und Umgebung, Veränderung der Stoffwerte auf der Gasseite
 - => Kühlung der Rauchgase und damit Veränderung der Geschwindigkeits- und Temperaturprofile
- Sauerstoffkonzentrationsgradienten innerhalb des Lagerstapels
- Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch den Verbrennungsvorgang
- Mehr oder weniger starke Überhitzung des entstehenden Dampfes
 - => Wärmeaustausch mit den Tropfen und dem kälteren Dampf
- Ventilationsbedingungen im Raum, Einfluß von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (Auswirkung auf die Brandausbreitung, das Auslösen der Sprinkler und die Löschwirkung)

Tabelle 4: Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes

Heizwerte der Einzelkomponenten:

H _u Weichfaser	16 MJ/kg
H _u Äthylalkohol	25 MJ/kg
	(Dichte(20°C,1013 mbar): 790 kg/m ³)
H _u n-Heptan	44,9 MJ/kg
	(Dichte(20°C,1013 mbar): 684 kg/m ³)
H _u Karton	15 MJ/kg
H _u Polystyrol	40 MJ/kg
H _u Holzwolle	16 MJ/kg
H _u 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
$\bar{H}_{u, HW, Holzpaletten, PAL}$	15,8 MJ/kg
$\bar{H}_{u, PS, Holzpaletten, PAL}$	18,0 MJ/kg
$\bar{H}_{u, PS, Holzpaletten, REG}$	17,5 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: 22 kg

Masse Weichfaserstab: 0,02 kg zuzüglich 50 ml Äthylalkohol

Tabelle 5: Einflußfaktoren der Meßtechnik

Bestimmung der physikalisch/chemischen Größe ist zur Zeit

- möglich mit ausreichender Genauigkeit
- möglich mit unzureichender Genauigkeit
- nicht möglich

- ausreichend schnelle Messung (zeitliche Änderung der Meßgröße)

Einige Größen, die gegenwärtig nicht oder nur unzureichend meßtechnisch erfaßbar sind:

- * Messung der örtlichen und zeitlichen Luft- bzw. Rauchgas feuchtigkeit und des Tropfengehaltes im Bereich des Brandes bei Temperaturen $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- * Messung der zeitlichen Änderung des Tropfenspektrums und der Tropfengeschwindigkeiten bei einer Löschdüse unter dem Einfluß einer Rauchgasströmung bzw. unter dem Einfluß von Flammen
- * Strahlungseigenschaften vom Rauch, den Flammen, des Tropfenschwarmes der Brandlast und der Bauteile (z.B. Einstrahlzahlen, Emissionsgrad)
- * Verbrennungswärmen beim verkohlten Stoff und den Pyrolysegasen
- * Luftansaugung durch den Brand und den Sprinklersprühnebel durch die Zwischenräume im Lager
- * Wärmeverluste z.B. vom Rauch an die Decke, nachfolgender Abkühlung und Wiederabsinken der Rauchsicht
- * Vermischung der heißen und kalten Luftschichten
- * Turbulenzerscheinungen
- * Sauerstoffkonzentrationsgradienten innerhalb des Lagerstapels z.B. durch Einfluß des Sprühnebels

Tabelle 6: 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 /22/
PAL3 (PS)	88 /22/
PAL4 (PS)	88 /22/
PAL5 (HW)	88 /22/
PAL6 (PS)	88 /22/
PAL7 (PS)	88 /22/
PAL8 (HW)	88 /22/
PAL9 (HW)	88 /22/
PAL10 (PS)	88 /22/

Tabelle 7: Probleme bei der numerischen Simulation

Allgemeine Problematik:

Um einen realen Brand beim Löscheinsatz vollständig beschreiben zu können, müßten alle relevanten Einflußgrößen berücksichtigt werden.

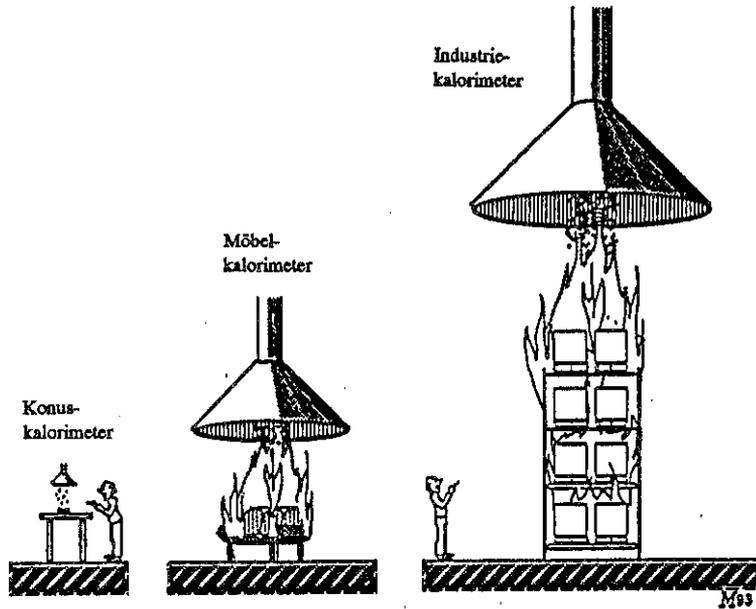
Abweichungen zwischen Brandversuch im Realmaßstab und der numerischen Simulation können zustande kommen durch:

- keine exakten Eingabeparameter
- Berechnungsergebnisse aus einer numerischen Simulation müssen mit der Meßgenauigkeit in Einklang stehen (z.B. die Meßgröße Temperatur bzw. der Temperaturmeßfehler geht mit der 4. Potenz bei der Berechnung der Wärmestrahlung ein)
- fehlende Eingabeparameter (z.B. keine Meßwerte vorhanden => Vernachlässigung oder physikalisch/chemische Größe ist bisher meßtechnisch nicht erfaßbar)
- fehlerhafte Berechnung von Werten infolge zu großer Zeitschritte bzw. zu großer Maschenweite (z.B. um die Rechenzeit beim Programmlauf zu begrenzen) oder aufgrund mathematischer Instabilitäten
- Im Modell verwendete Idealisierungen und Vereinfachungen weichen beträchtlich von der Realität ab
- Für die exakte Berechnung der Wechselwirkungen eines Sprinklers mit einem Brand ist die Berechnung des Strömungsfeldes erforderlich.

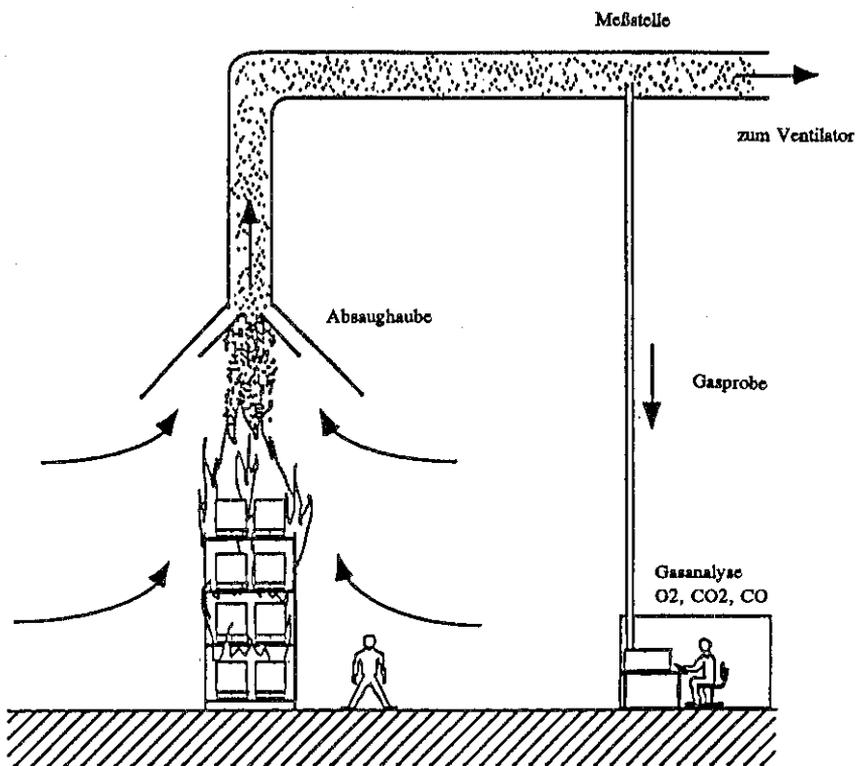
Dies ist nur mit 3-dimensionalen Feldmodell möglich (schnellste Rechner (Supercomputer) erforderlich).

Schlußfolgerungen:

- 1) Eine numerische Simulation sollte durch ein breites Spektrum an Versuchen kalibriert werden und nicht nur an einzelnen Werten.
- 2) Der Anwender einer numerischen Simulation sollte in der Lage sein, das Berechnungsergebnis auf Korrektheit überprüfen zu können (Vergleich mit Meßergebnissen).
- 3) Auf Brandversuche im realen Maßstab können nicht verzichtet werden.



Das Konuskalorimeter wird angewendet bei einer Brandlastprobengröße bis zu 10 cm * 10 cm, das Möbelkalorimeter für Brände bis zum Ausmaß eines brennenden Sofas (max. 2 MW) und das Industriekalorimeter für große Brände bis max. 10 MW.



Die Brandgase und die Umgebungsluft werden von einer Absaughaube angesaugt und über einen kreisförmigen Kanal zur Meßstelle transportiert. Hier wird die Gastemperatur und Gasgeschwindigkeit gemessen. Weiterhin wird eine Gasprobe in einem Rohr den Gasanalysegeräten zugeführt.

Bild 1 Darstellung der verschiedenen Kalorimeterarten zur Bestimmung der Wärmefreisetzung bei Bränden nach Dahlberg /24/.

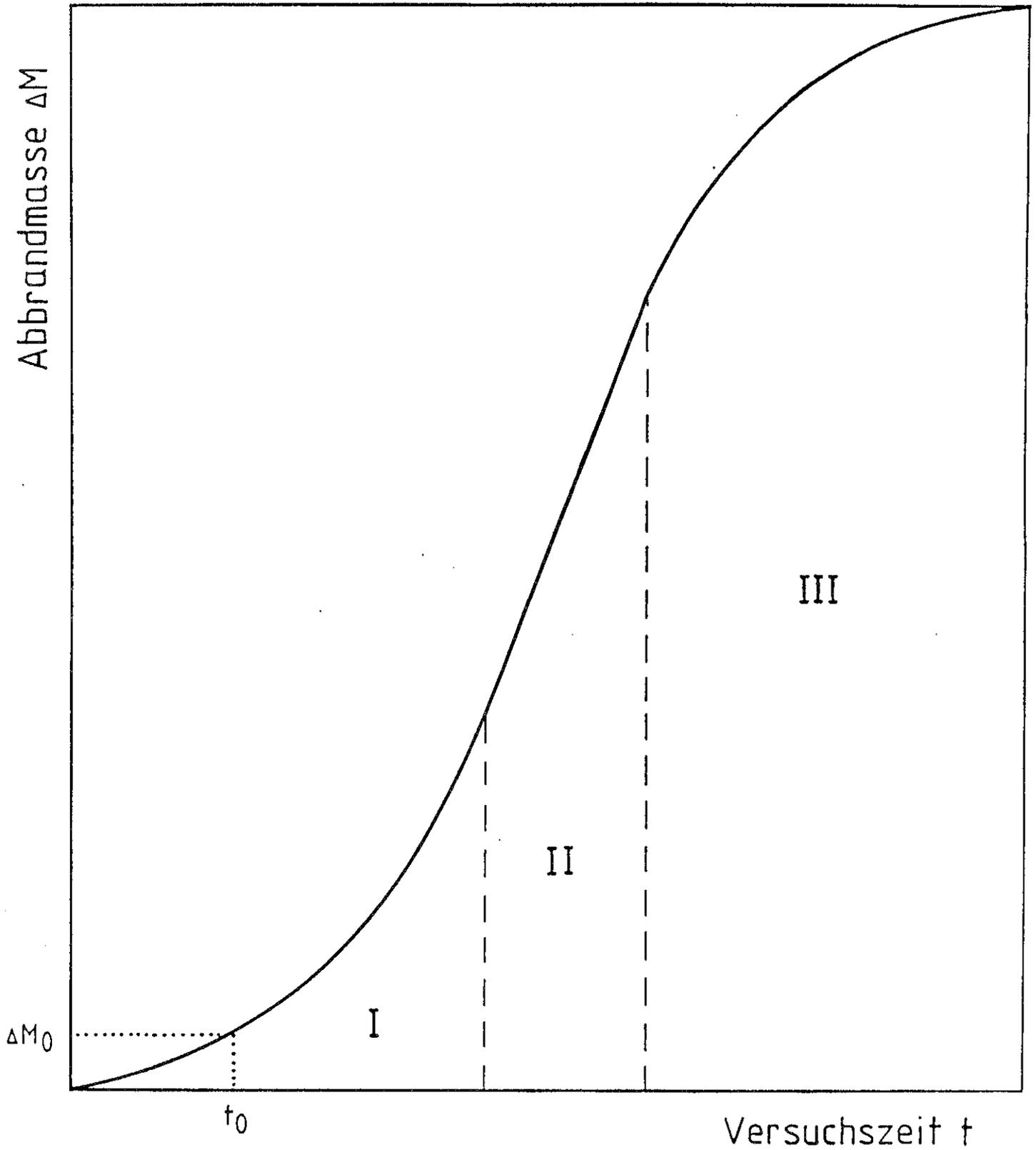


Bild 2 Idealisierter Verlauf der Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit.
Bereich I Brandentwicklungsphase
Bereich II Stationärer Abbrand
Bereich III Abklingphase

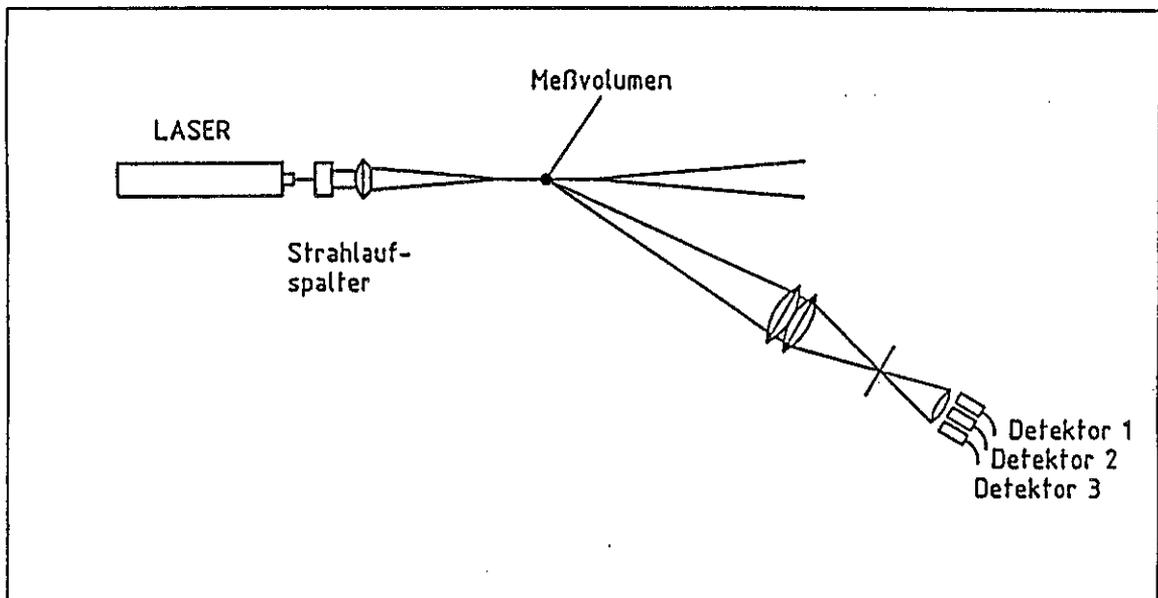


Bild 3 Prinzipskizze des Phasen/Doppler-Teilchen-
analysators der Firma Lechler GmbH, Fellbach
nach /20/.

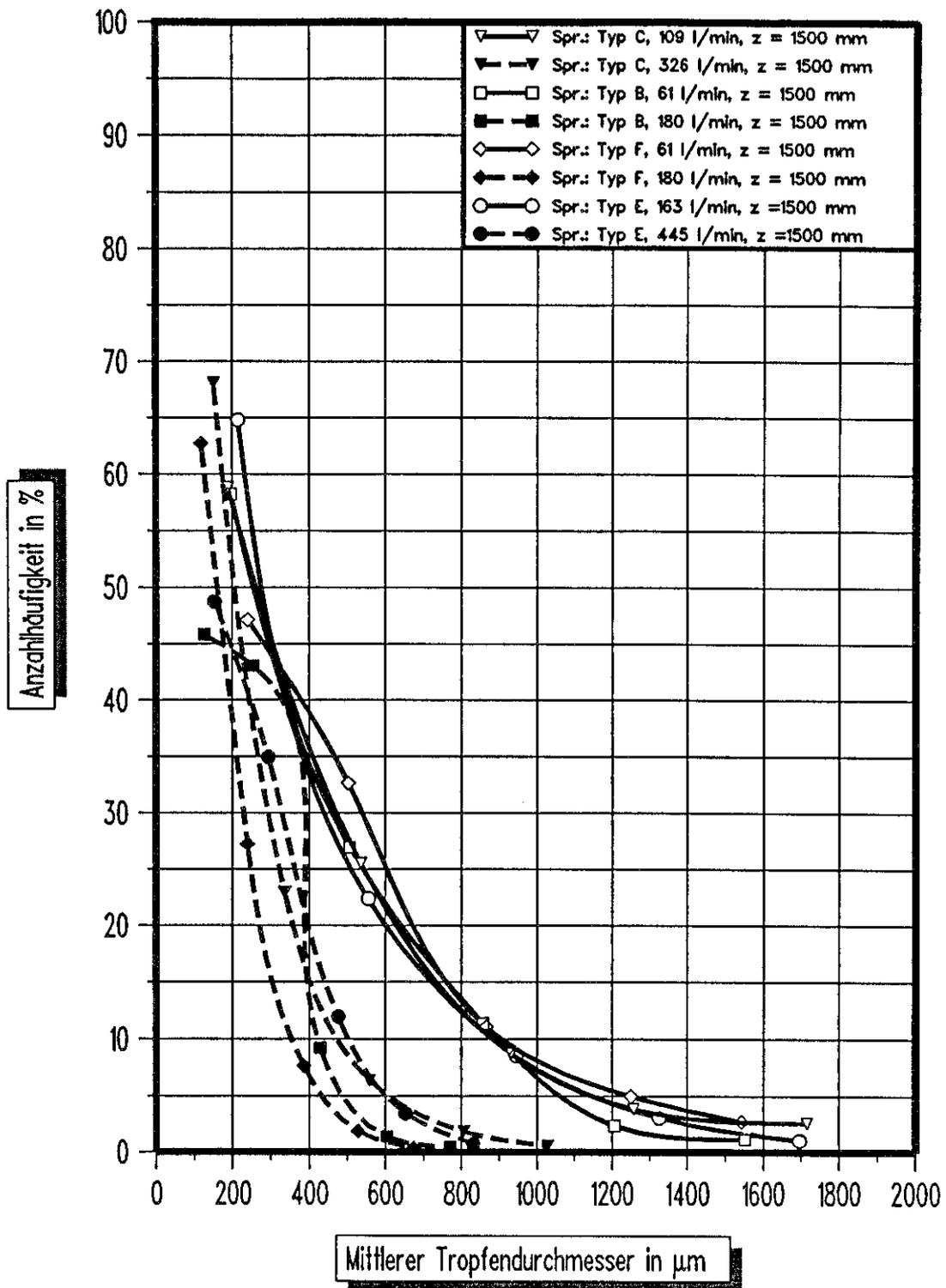


Bild 4 Anzahlhäufigkeit von Tropfendurchmessern verschiedener Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler (Zusammenfassung in 5 Fraktionen) nach /20/.

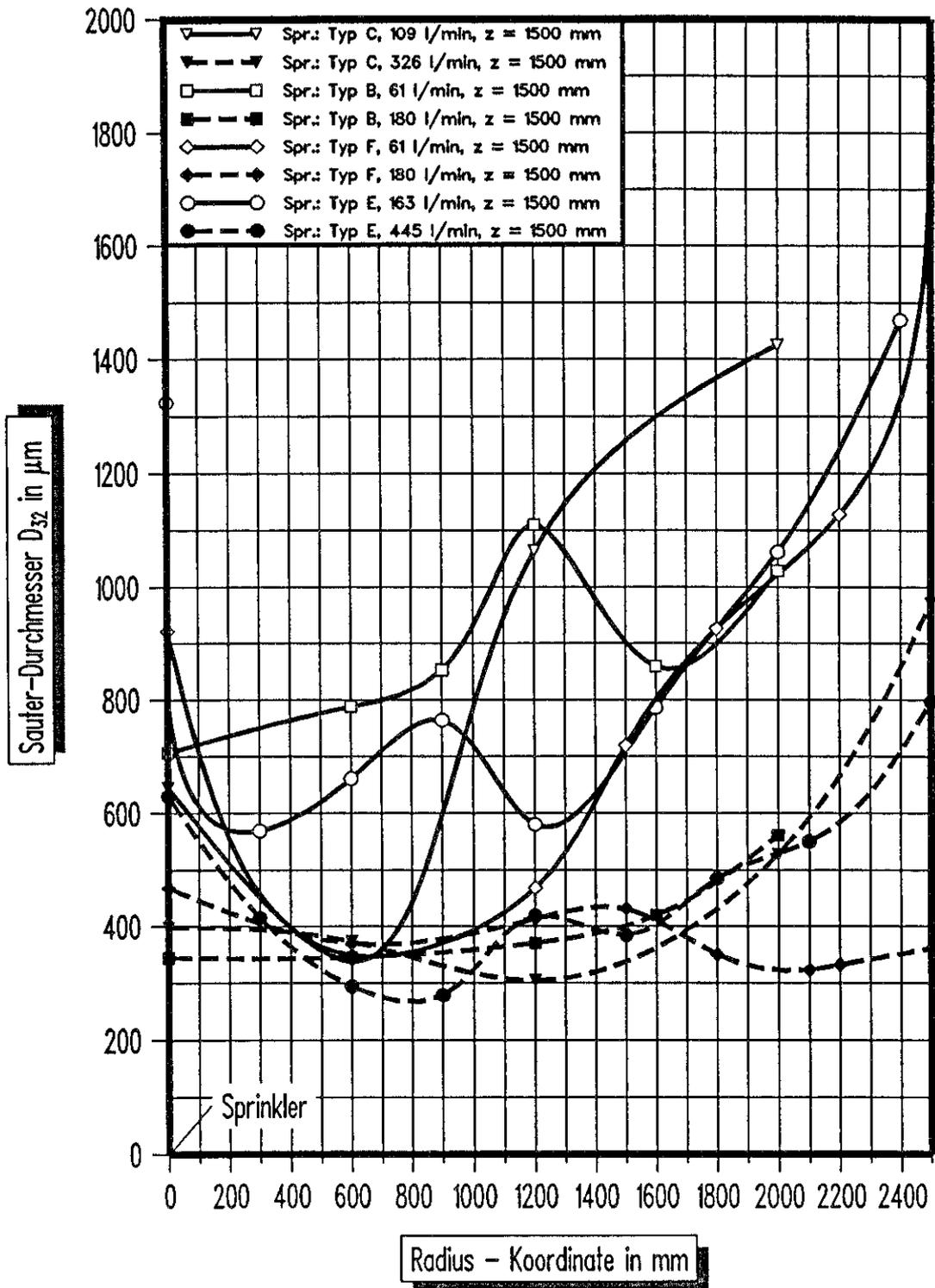


Bild 5 Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinkler-typen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühhadius nach /20/.

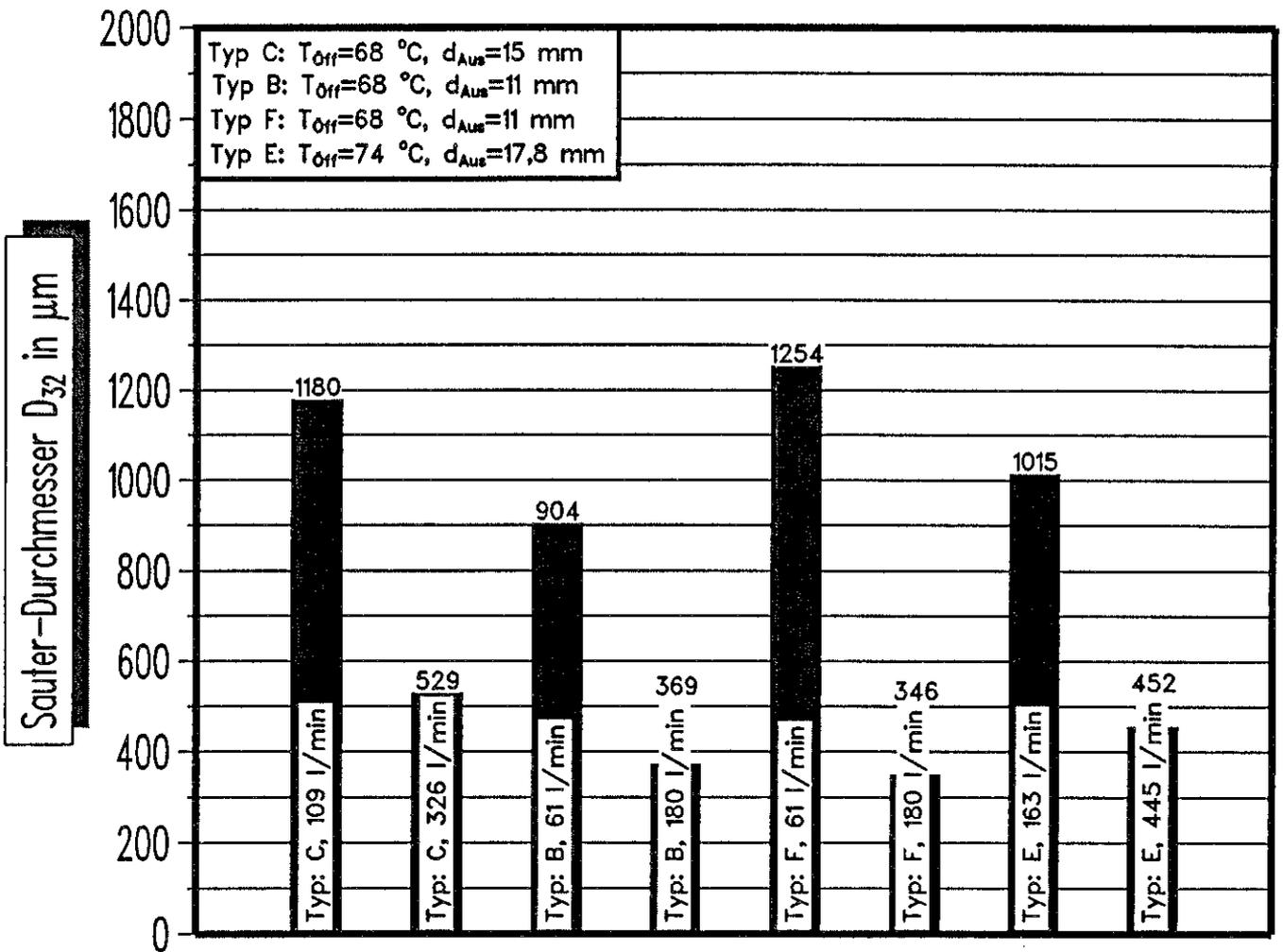


Bild 6 Über dem Sprühkegelradius gemittelter Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler nach /20/.

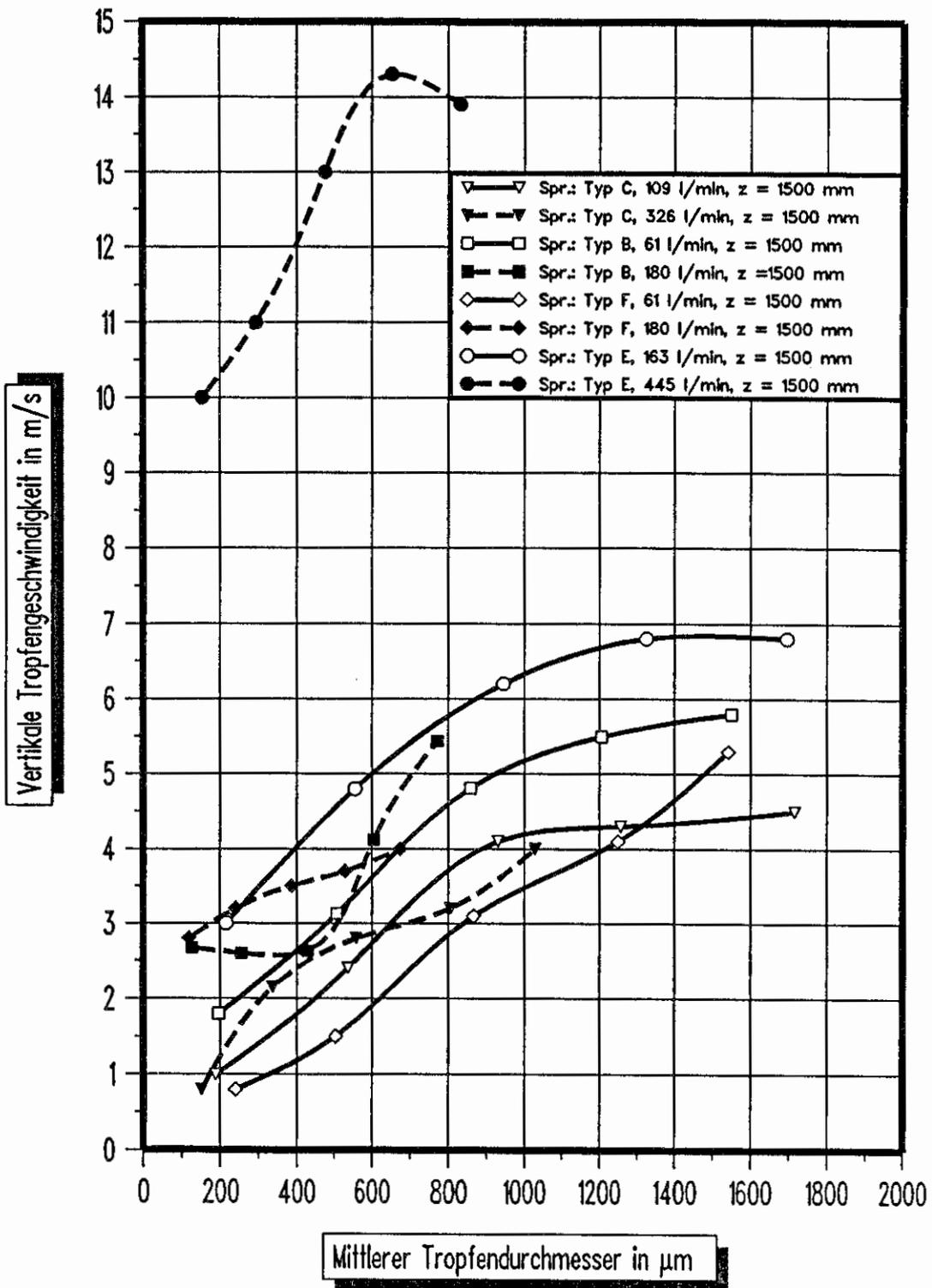


Bild 7 Mittlere vertikale Geschwindigkeiten der verschiedenen Tropfengrößen bei unterschiedlichen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler nach /20/.

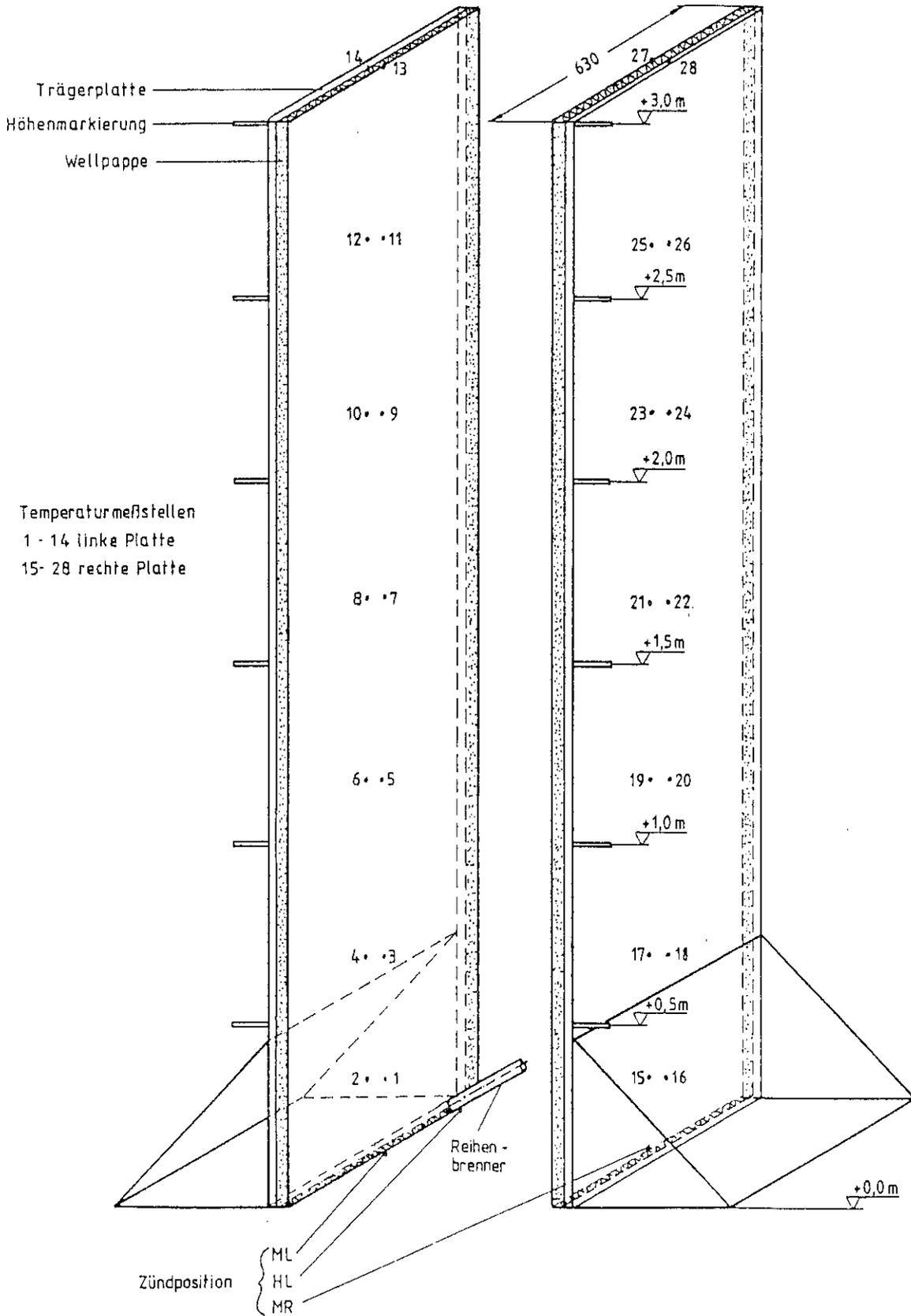


Bild 8 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit 2 Lagerattrappen unter Angabe der Temperaturmeßstellen nach /4/.

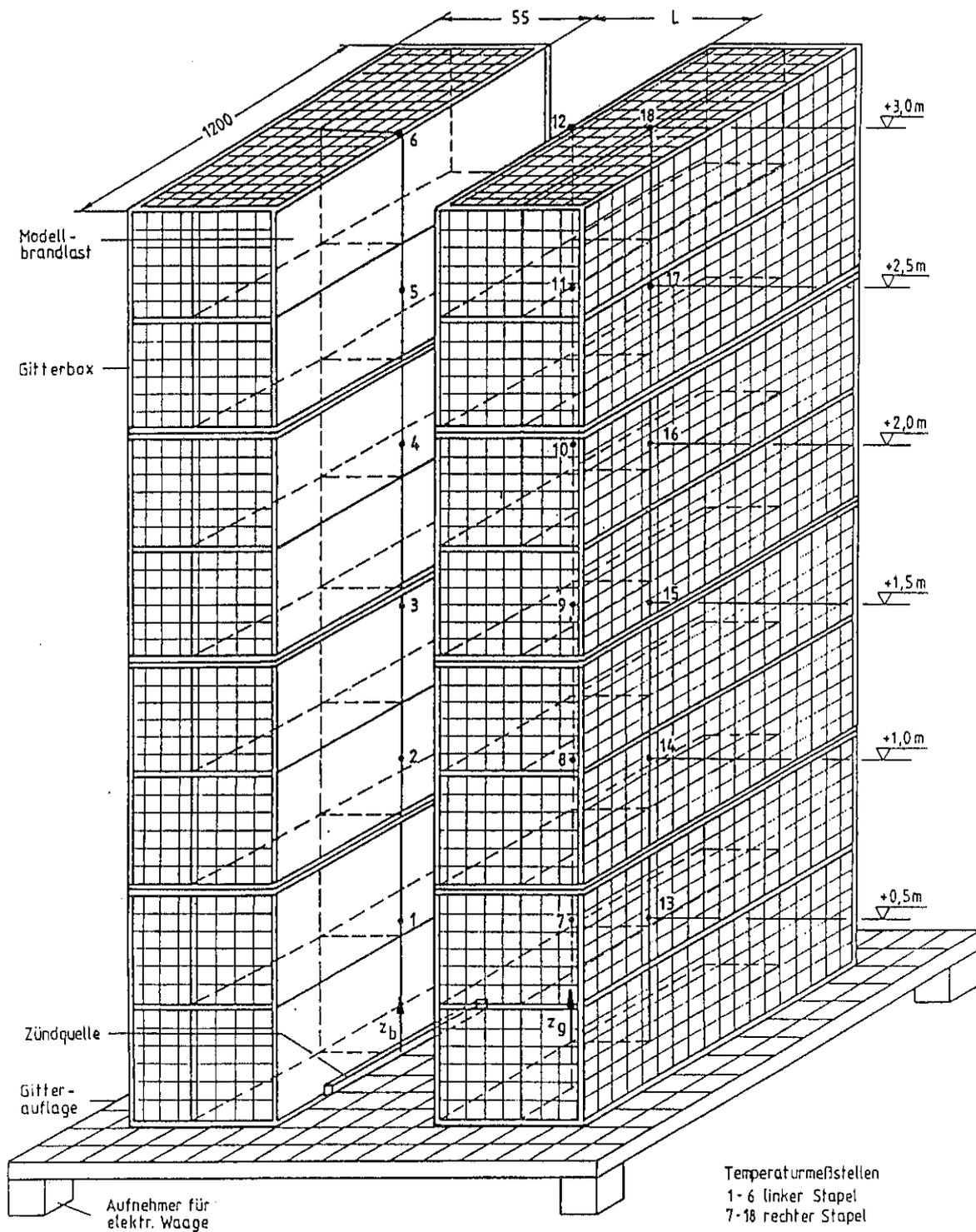


Bild 9 Gitterboxlager - 2 Stapel (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /5/.

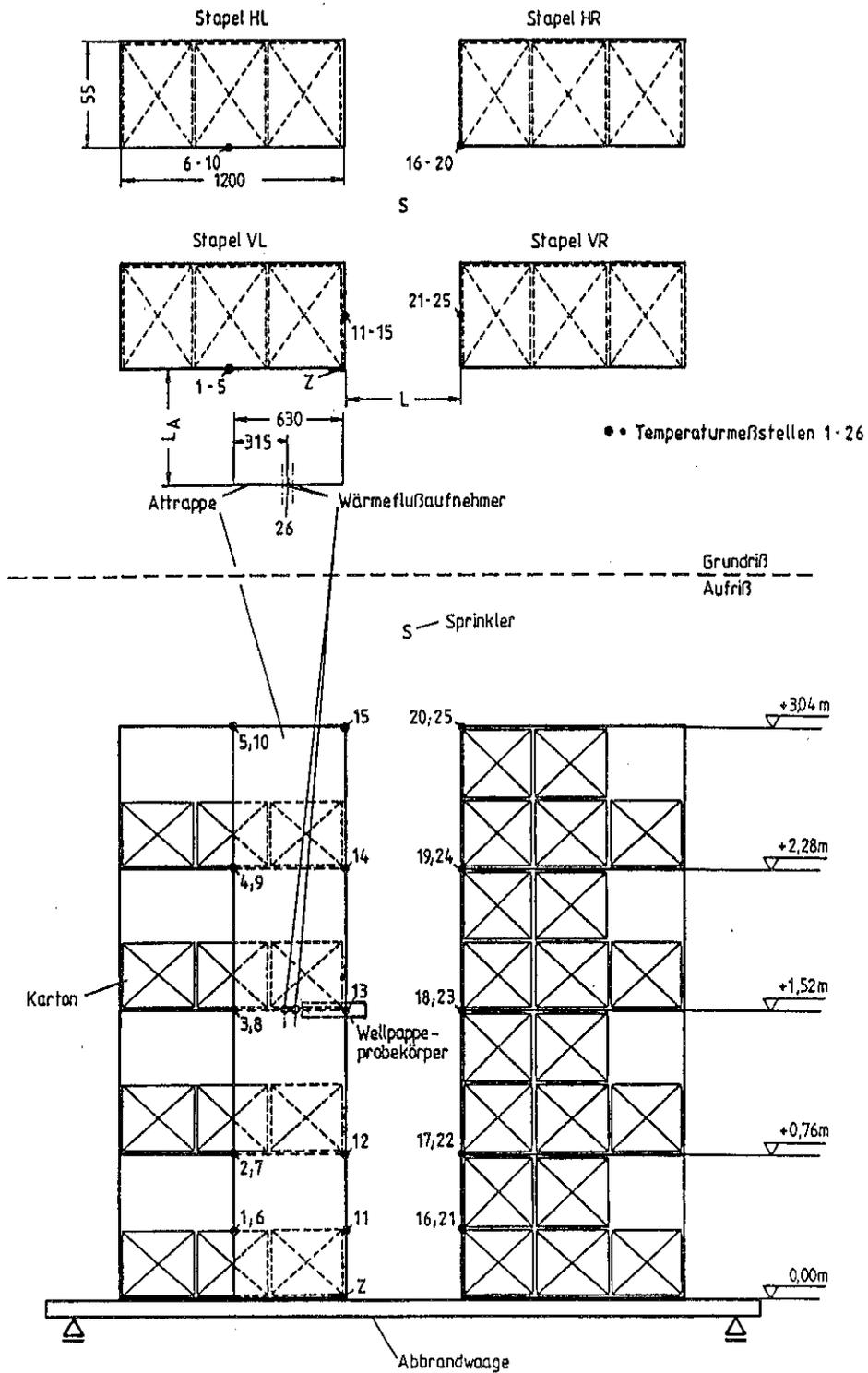
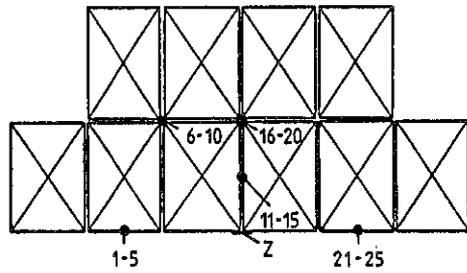


Bild 10 Gitterboxlager - 4 Stapel (Prinzipiskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /6/.



• Temperaturmessstellen 1-25

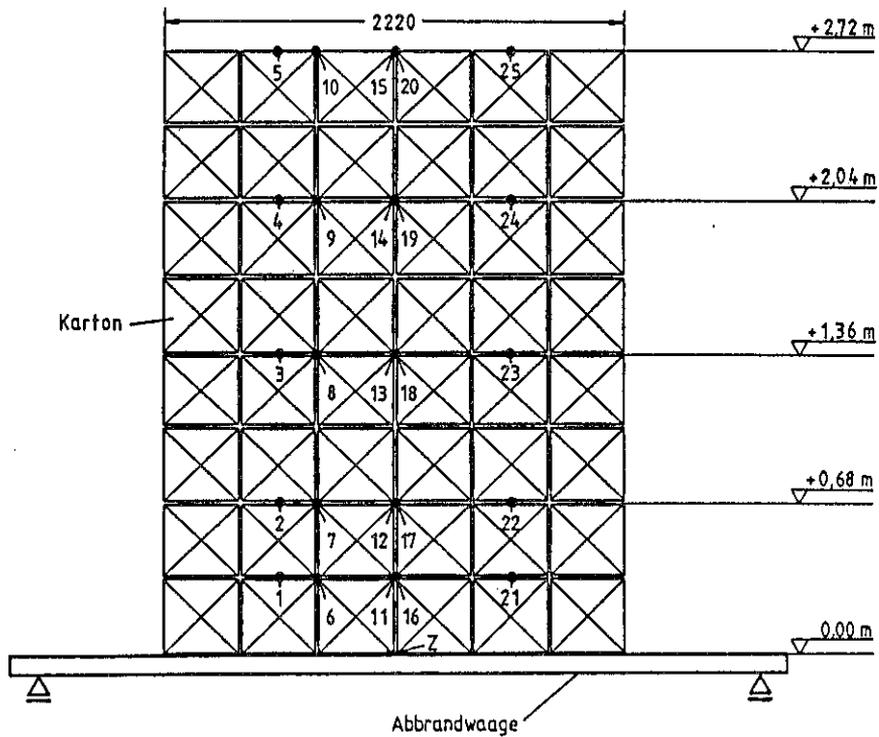
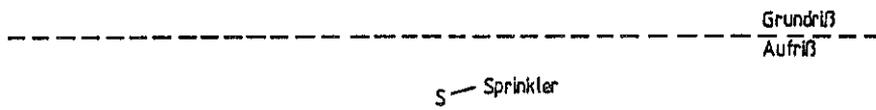


Bild 11 Blocklager (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmessstellen) nach /6/.

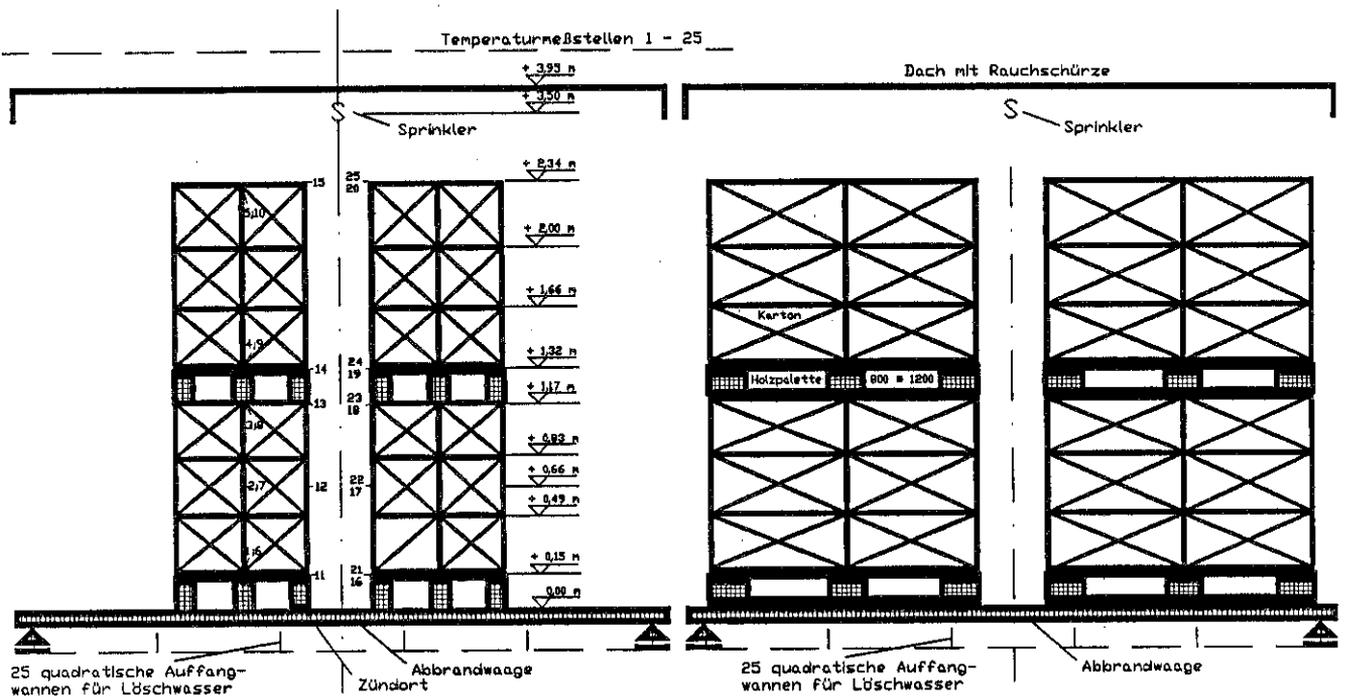
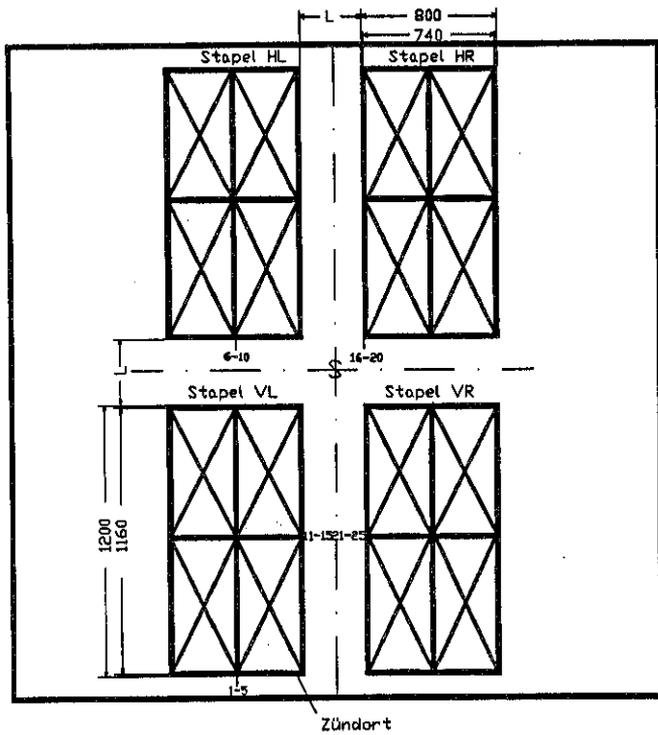


Bild 12 Palettenblocklager (Prinzipiskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen) nach /22/.

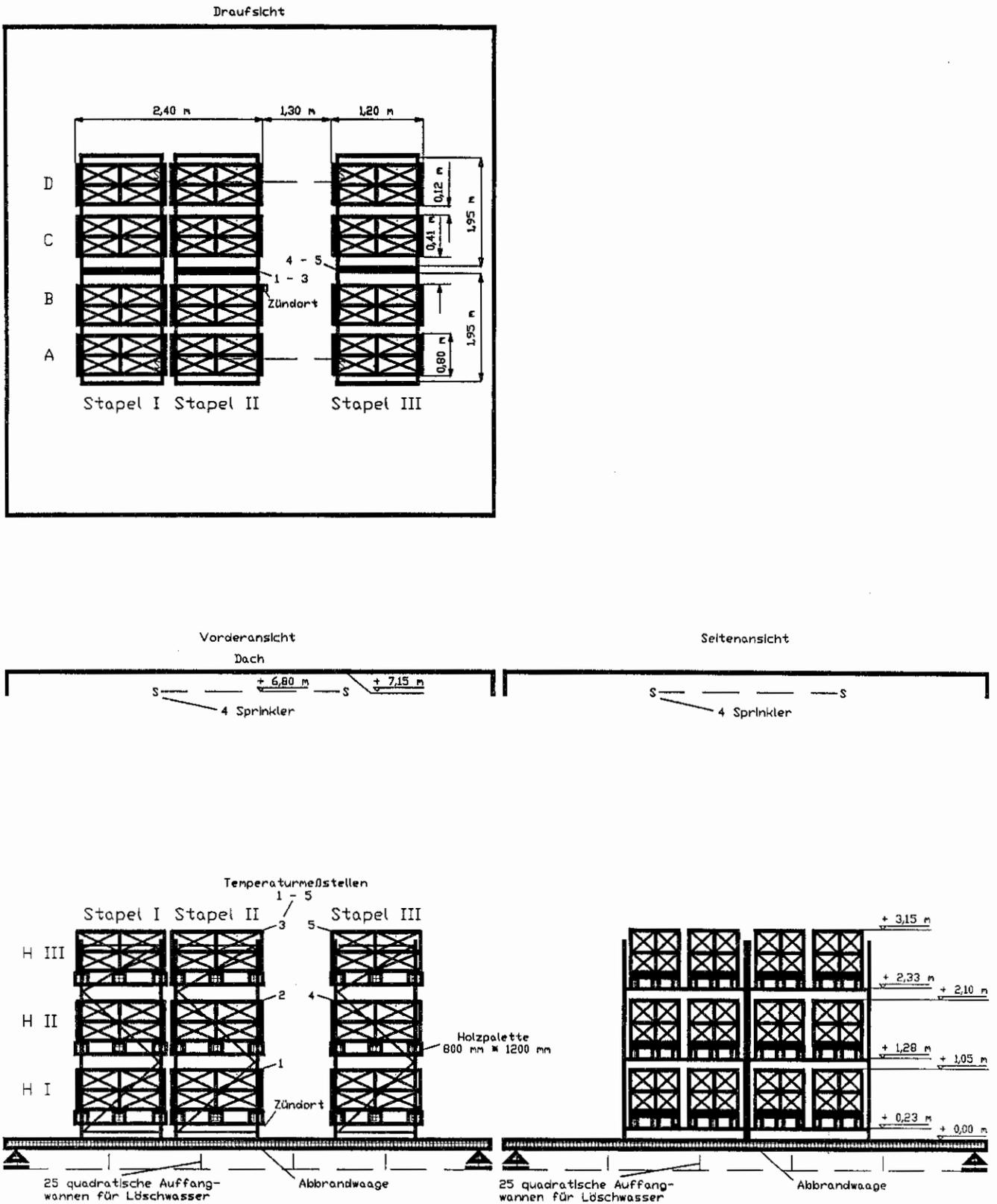


Bild 13 Regalpalettenlager (Prinzipiskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen).

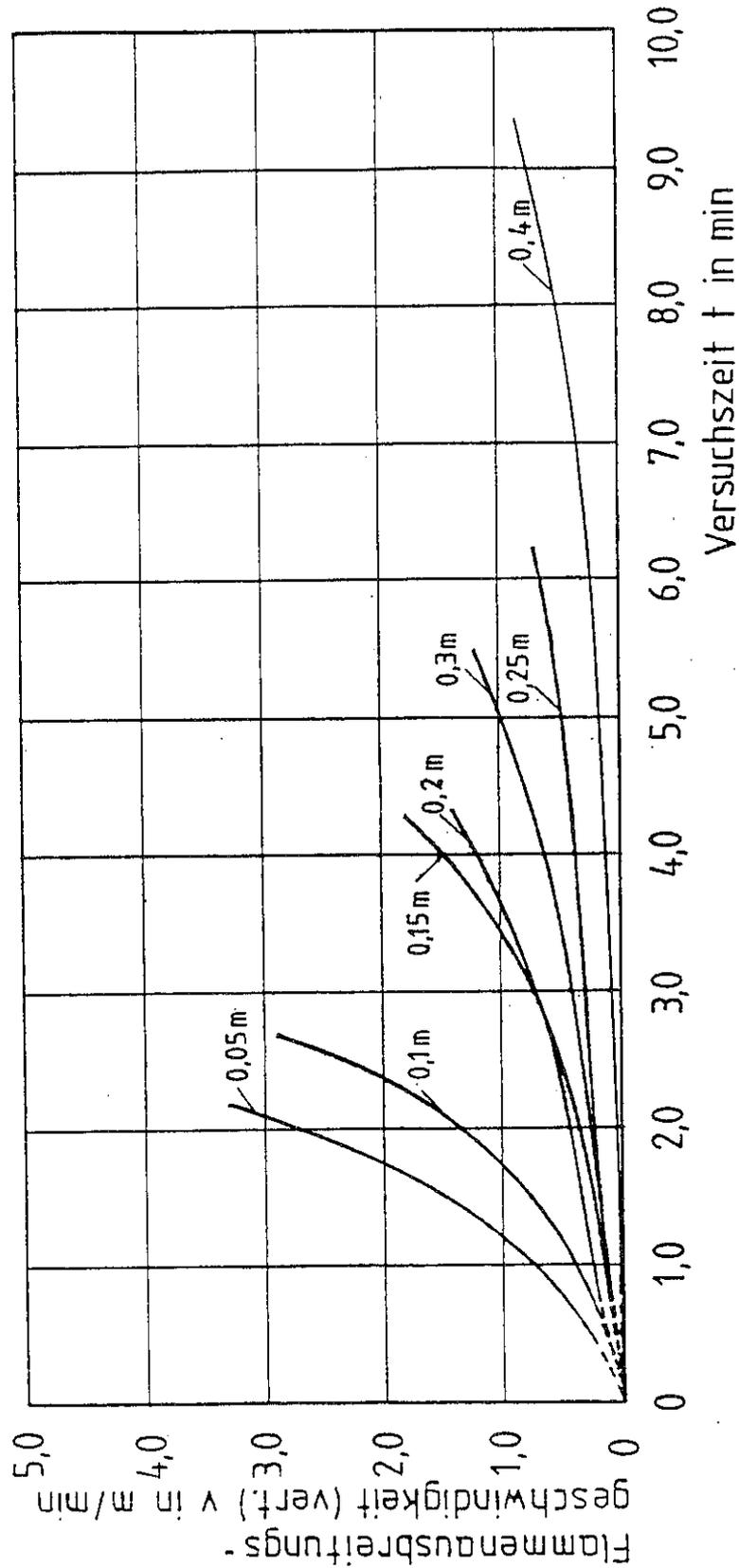


Bild 14 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit an der linken Lageratrappe als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen zwischen den Lageratrappen nach /4/.

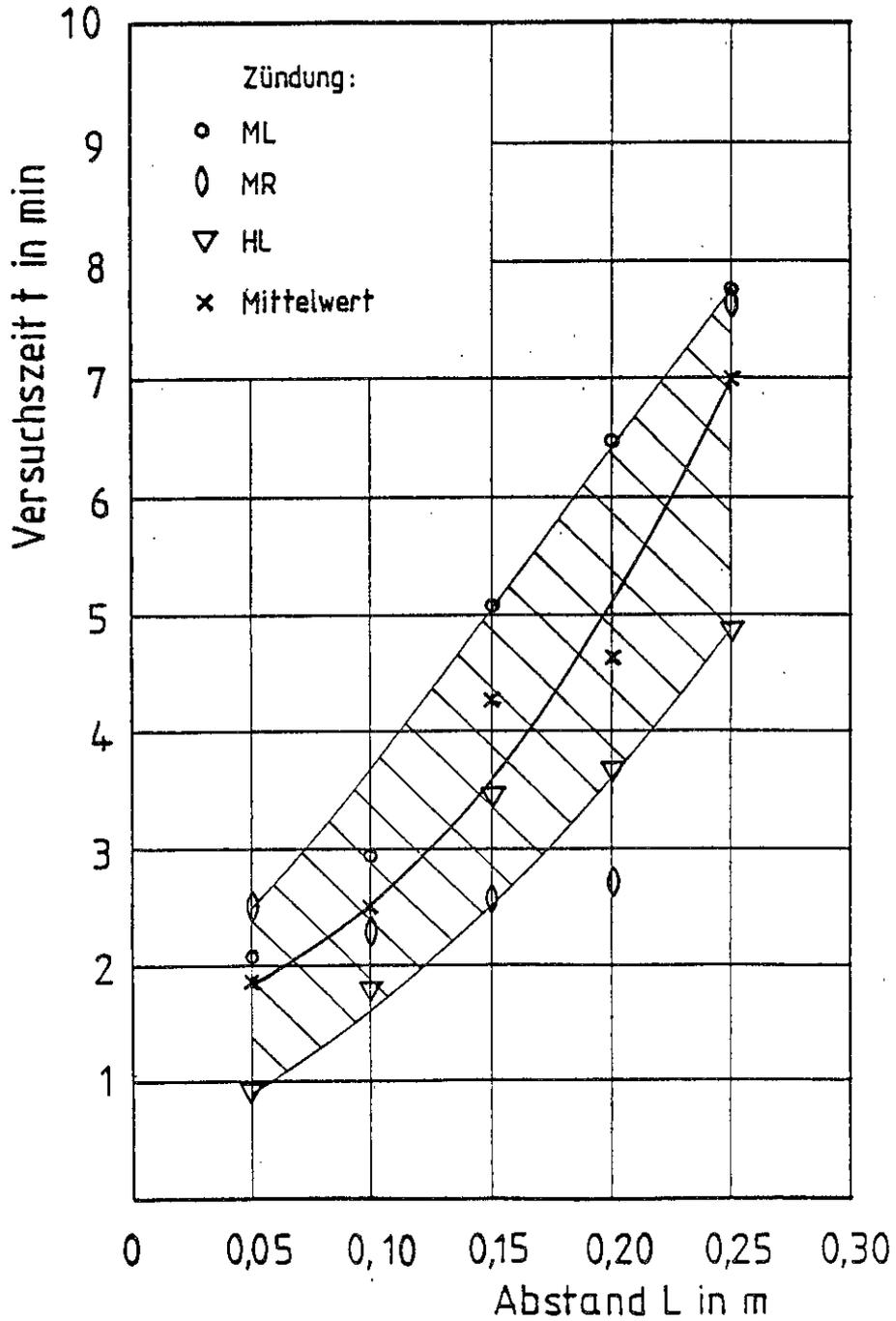


Bild 15 Versuchszeit, bei der sich die gegenüberstehende Lageratruppe durch Wärmeaustausch entzündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle (siehe auch Bild 8) nach /4/.

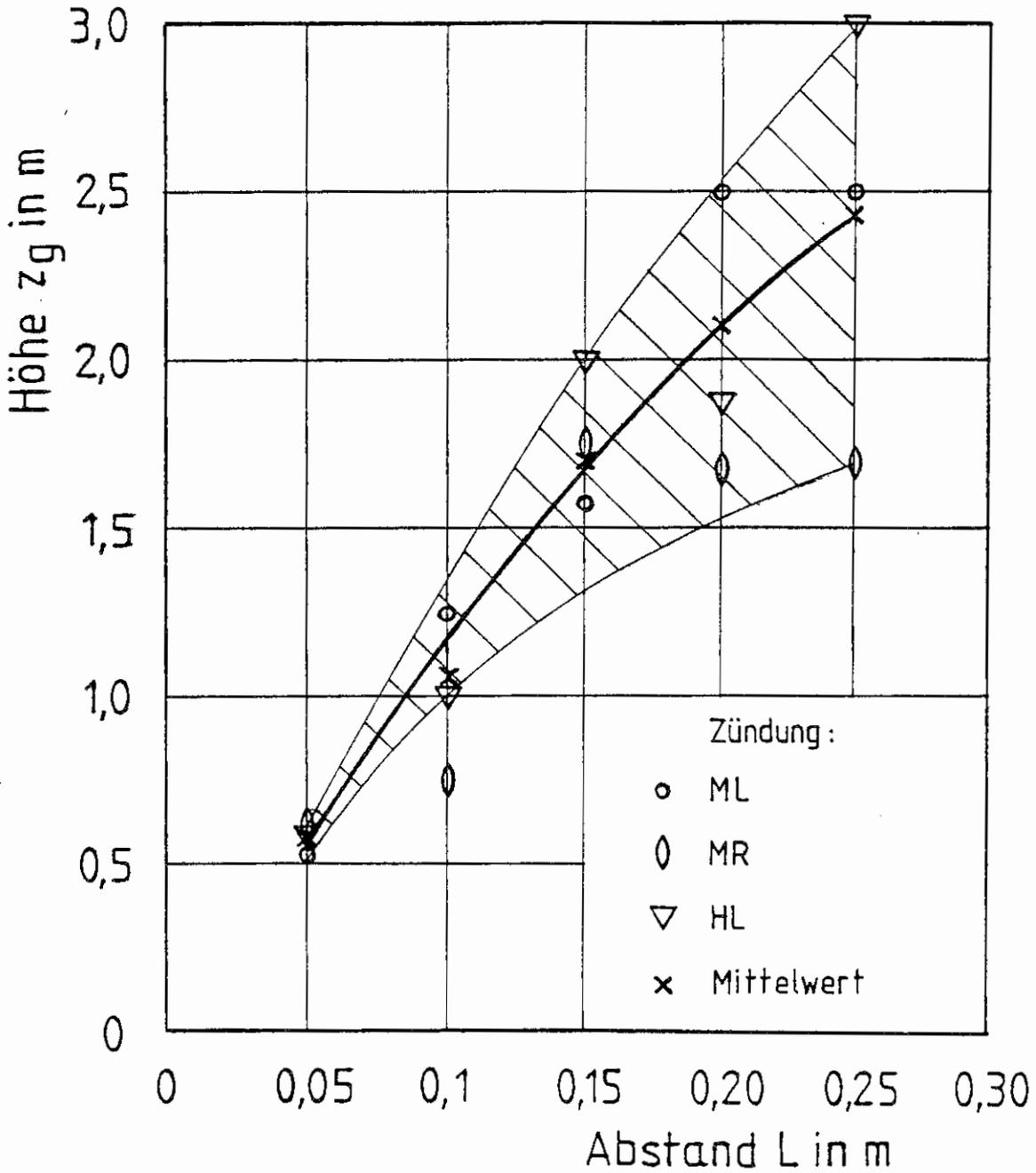


Bild 16 Höhe, bei der sich die gegenüberstehende Lagerattrappe durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer entzündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle (siehe auch Bild 8) nach /4/.

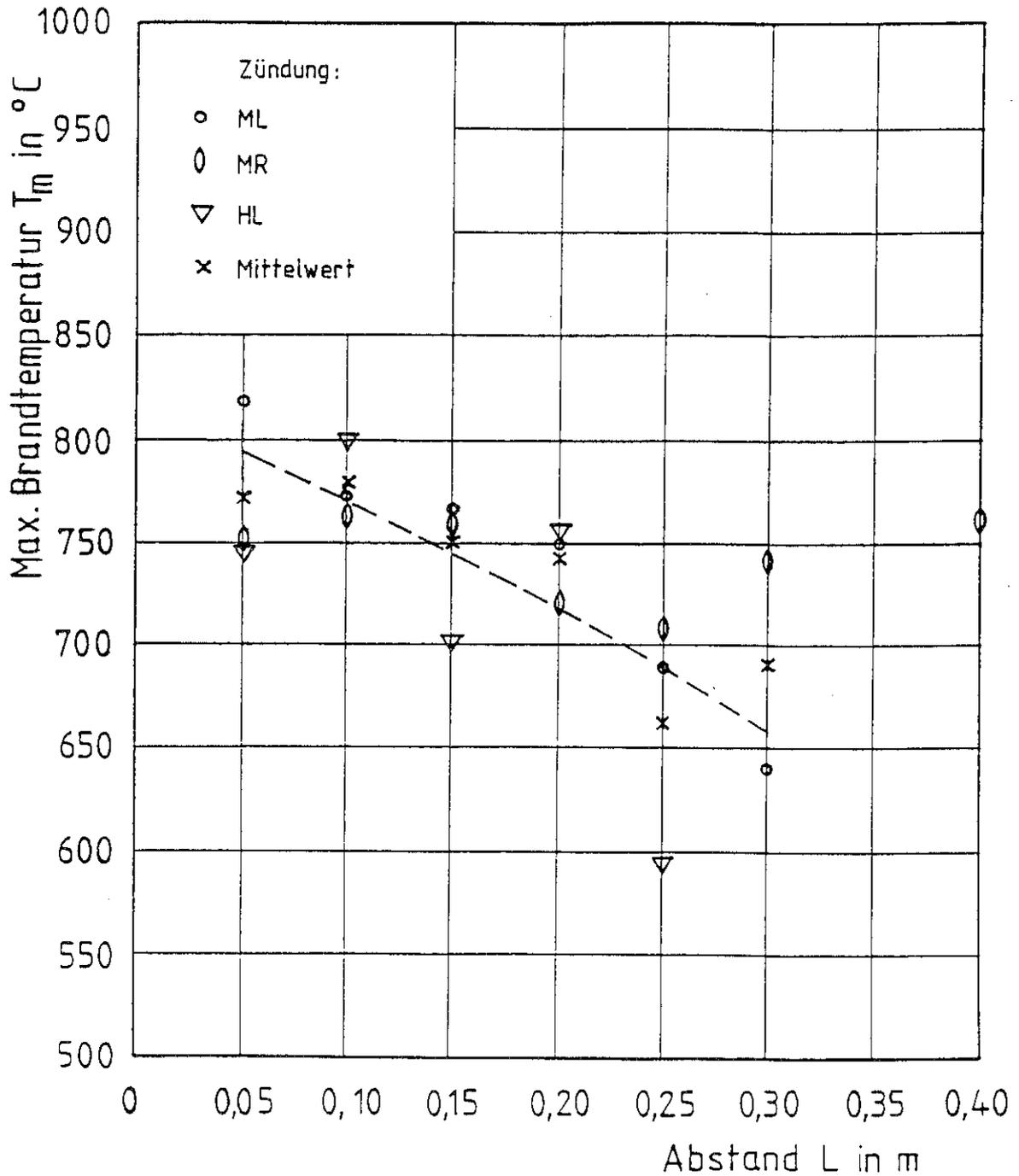


Bild 17 Maximalwert der gemessenen Temperaturen als Funktion des Abstandes unter Variation der Zündquelle bei 2 Lagerattrappen, (siehe auch Bild 8) nach /4/.

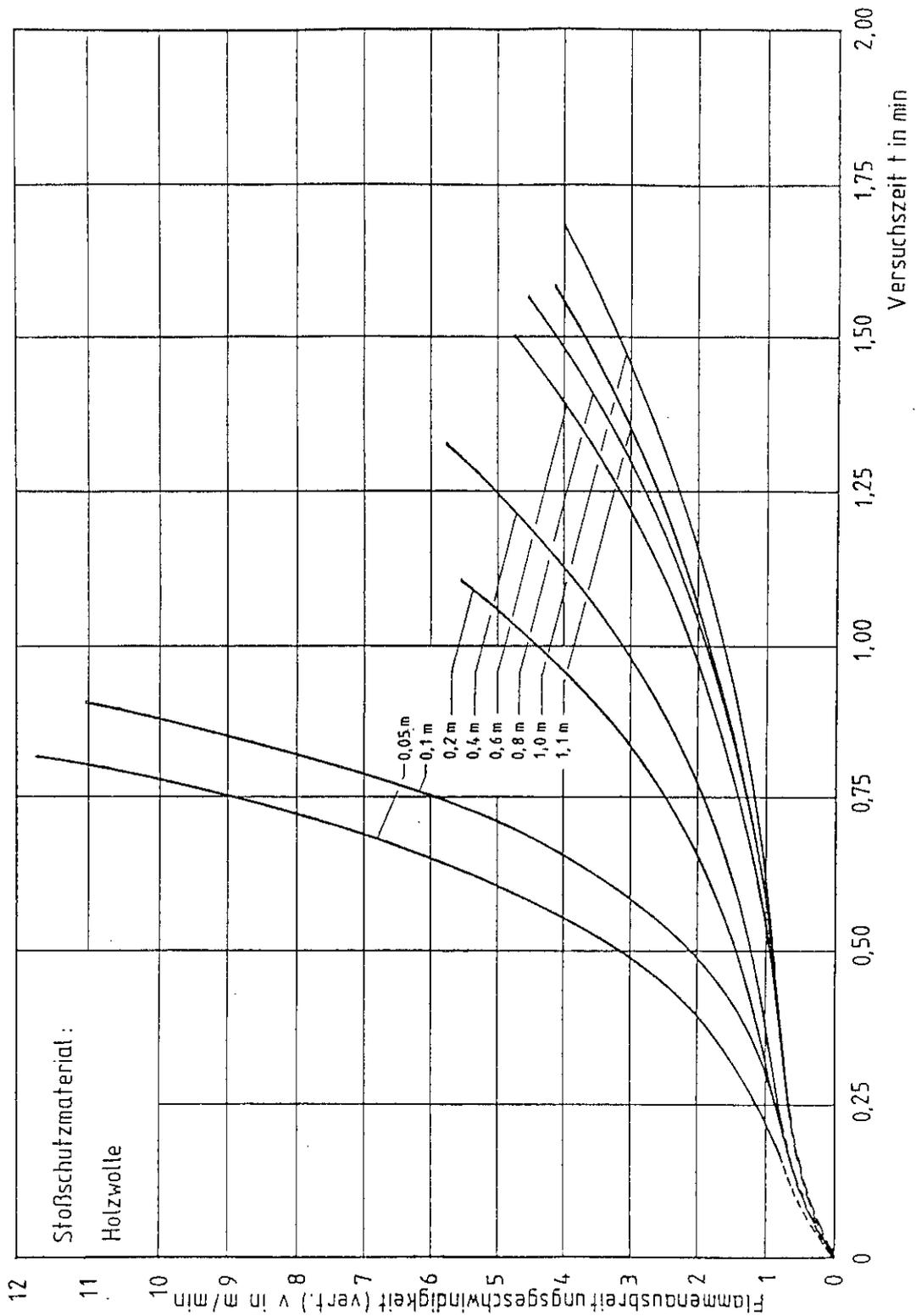


Bild 18 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit am linken Stapel als Funktion der Versuchszeit bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterialies Holzwolle nach /5/.

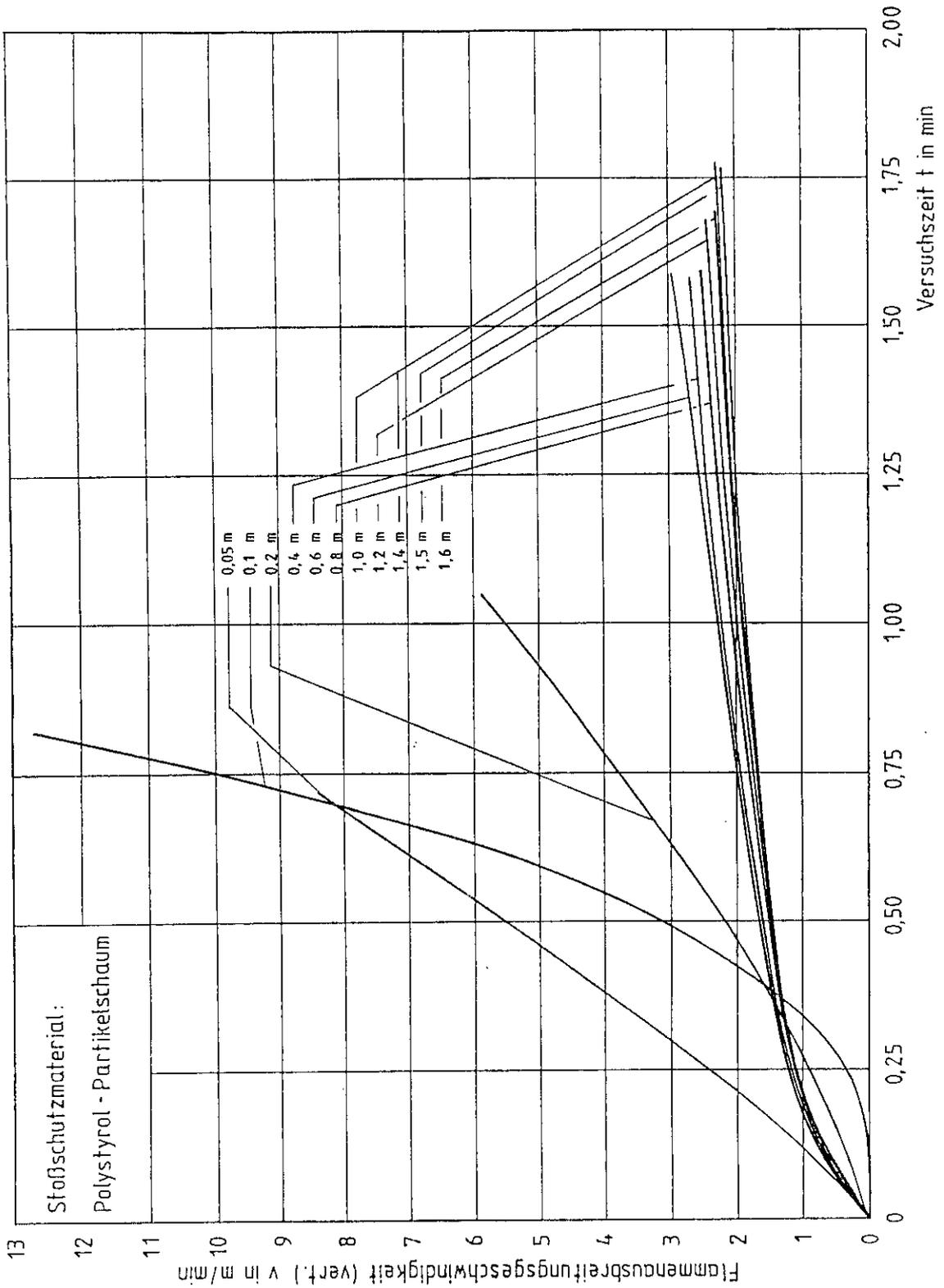


Bild 19 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit am linken Stapel als Funktion der Versuchszeit bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterials Polystyrol-Partikelschaum nach /5/.

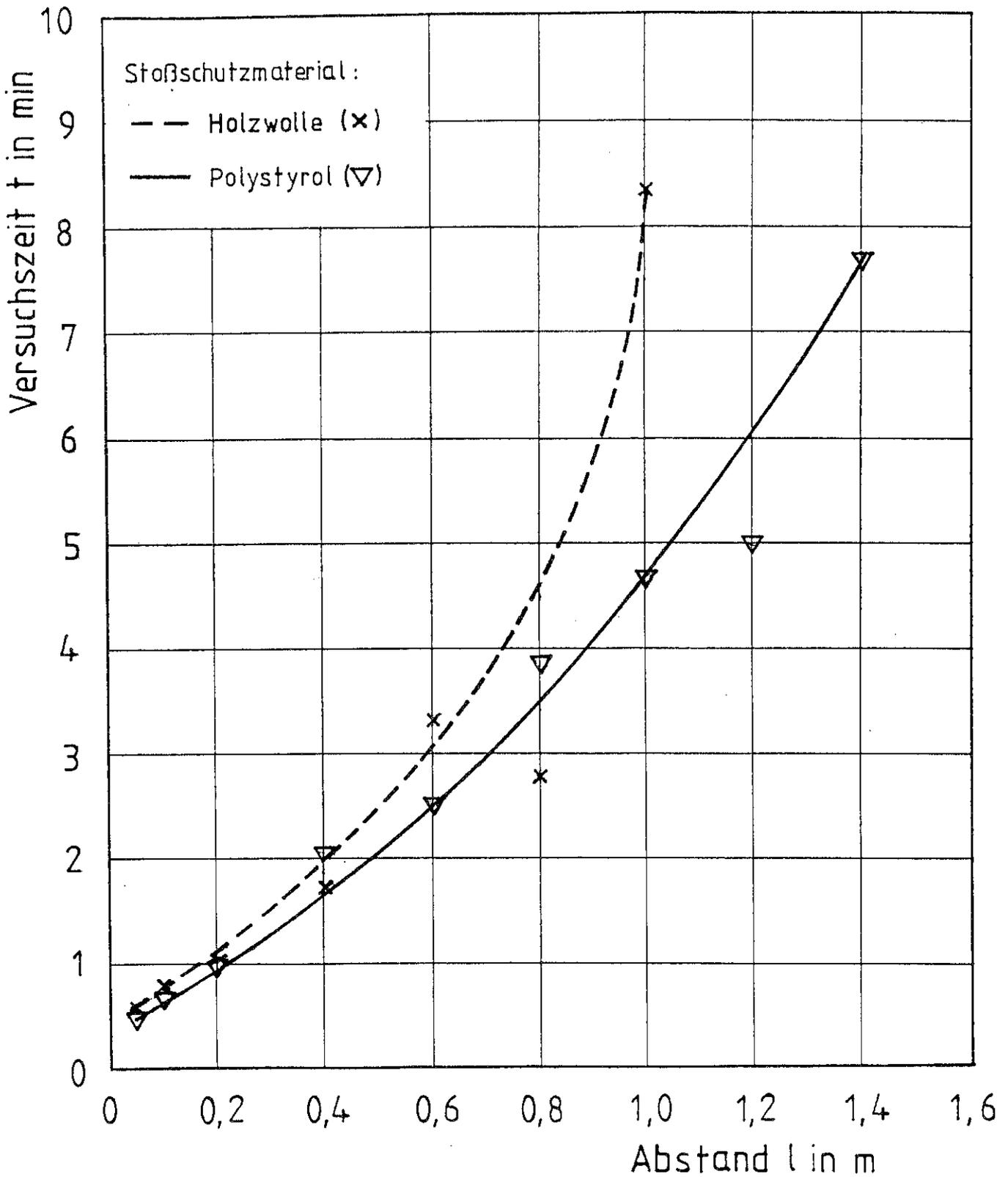


Bild 20 Versuchszeit, bei der sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer entzündet bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung verschiedener Stoßschutzmaterialien nach /5/.

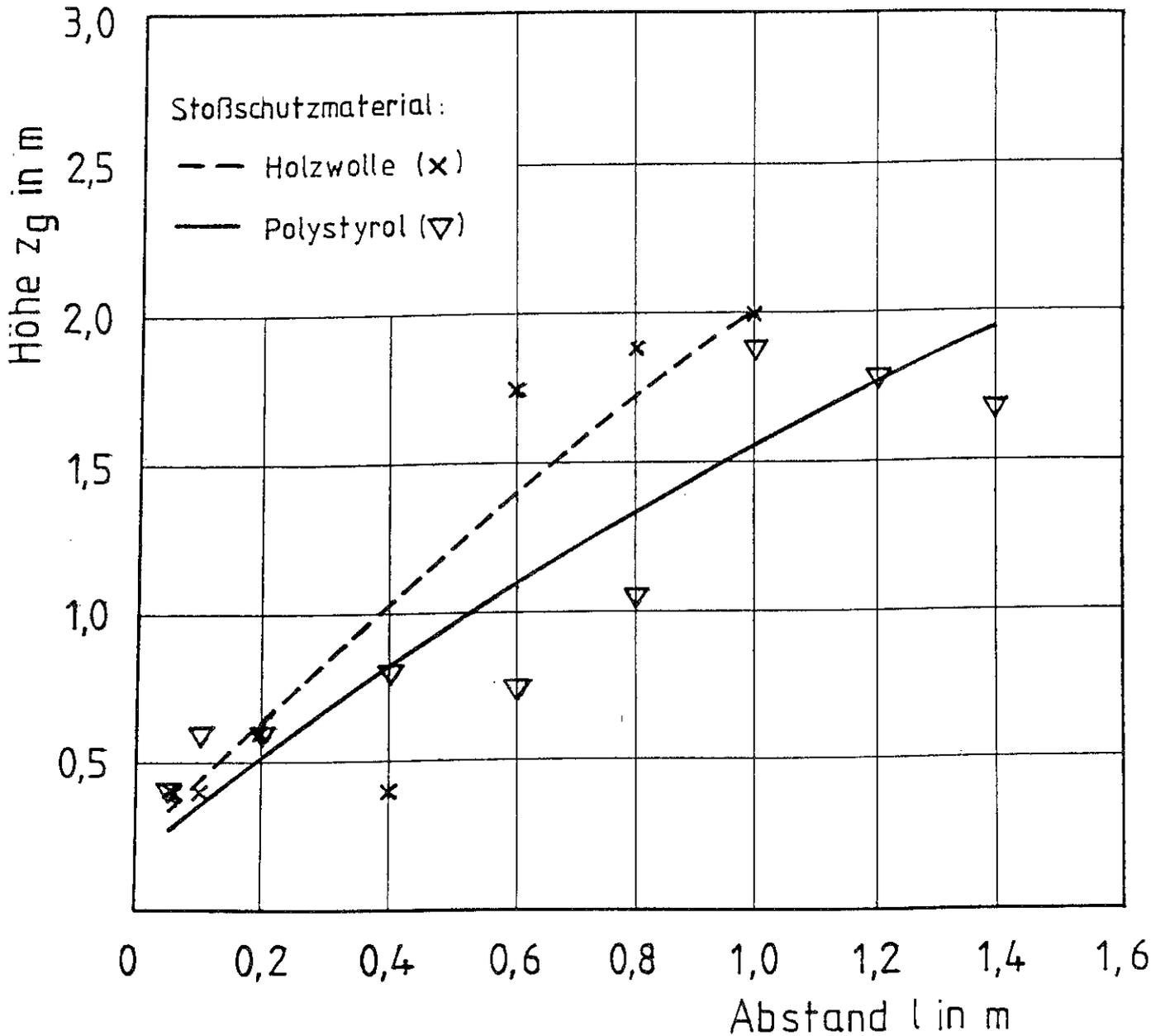


Bild 21 Höhe, bei der sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer entzündet bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung verschiedener Stoßschutzmaterialien nach /5/.

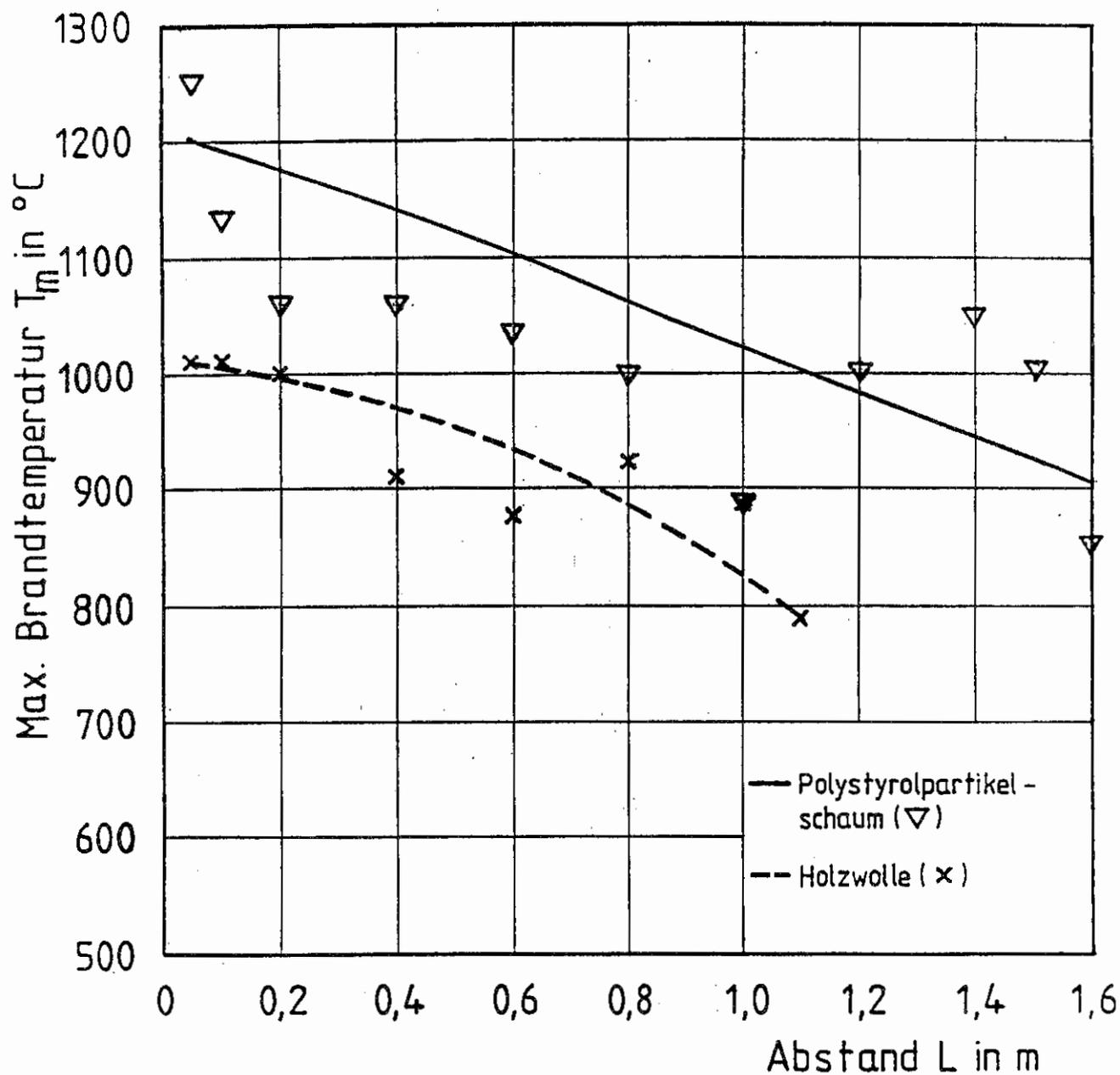


Bild 22 Maximalwert der gemessenen Temperaturen bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung verschiedener Stoßschutzmaterialien nach /5/.

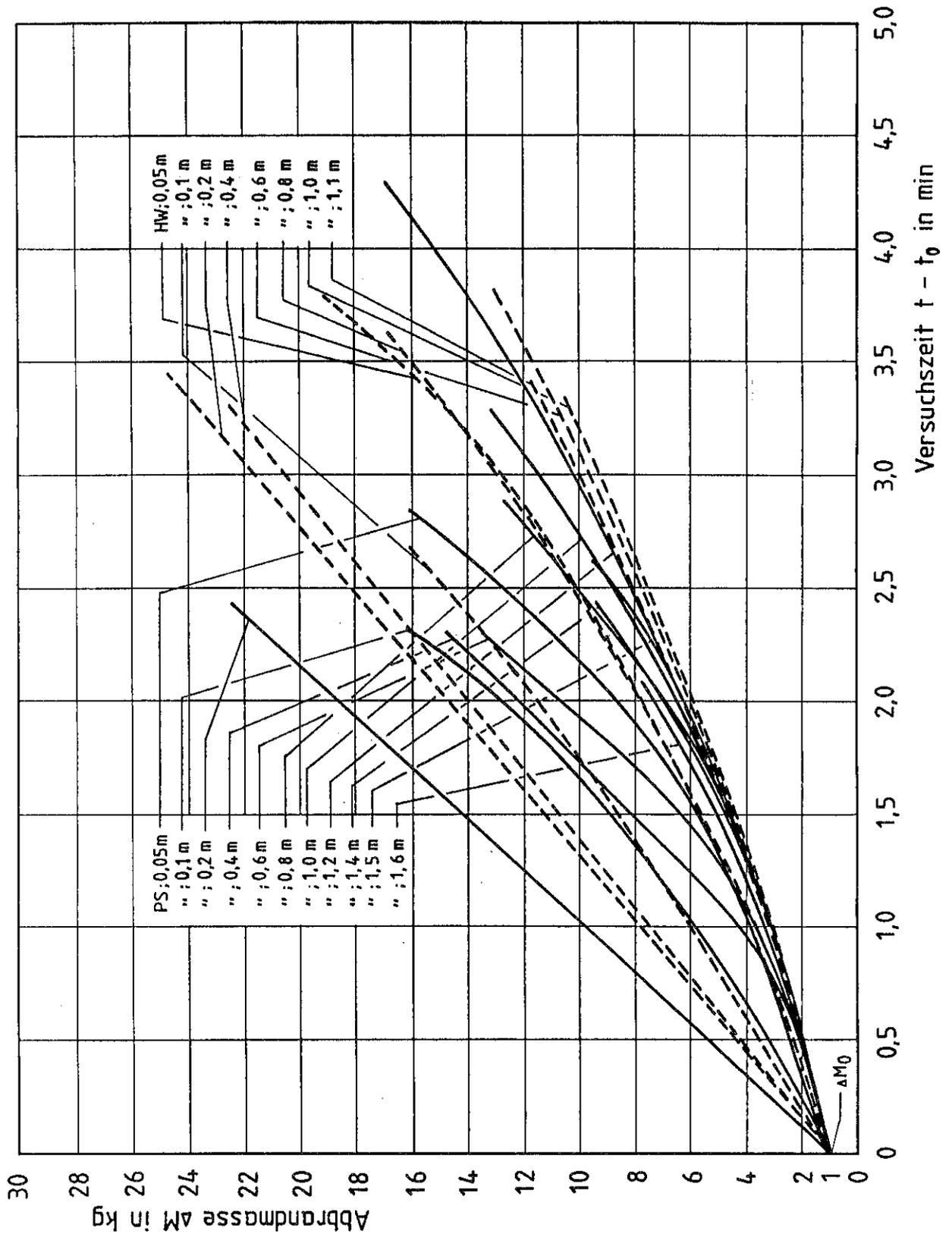


Bild 23 Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung verschiedener Stoßschutzmaterialien nach /5/.

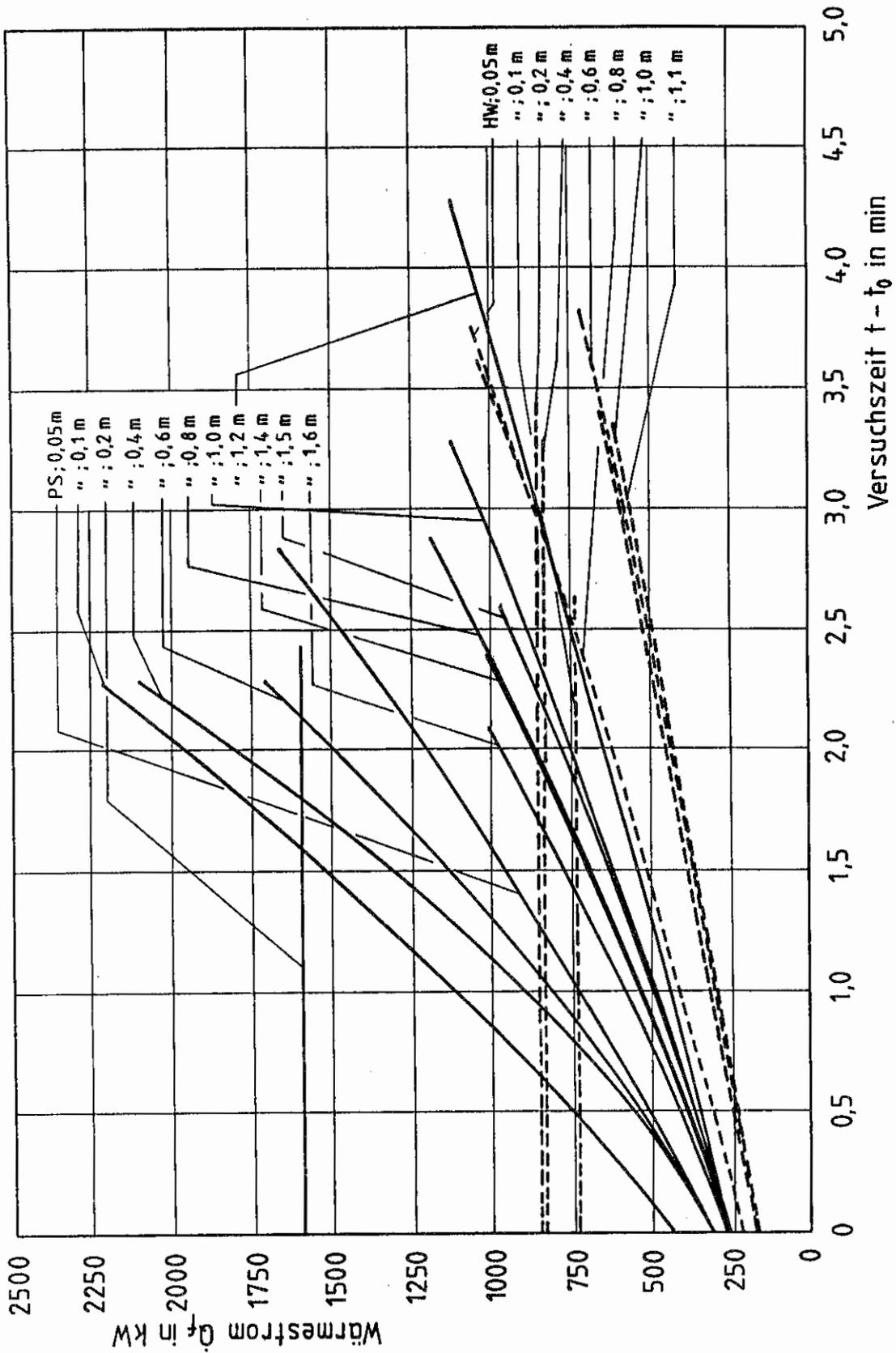


Bild 24 Fühlbarer Wärmestrom als Funktion der Versuchszeit bei einem Gitterboxlager (2 Stapel) bei verschiedenen Abständen unter Verwendung verschiedener Stoßschutzmaterialien nach /5/.

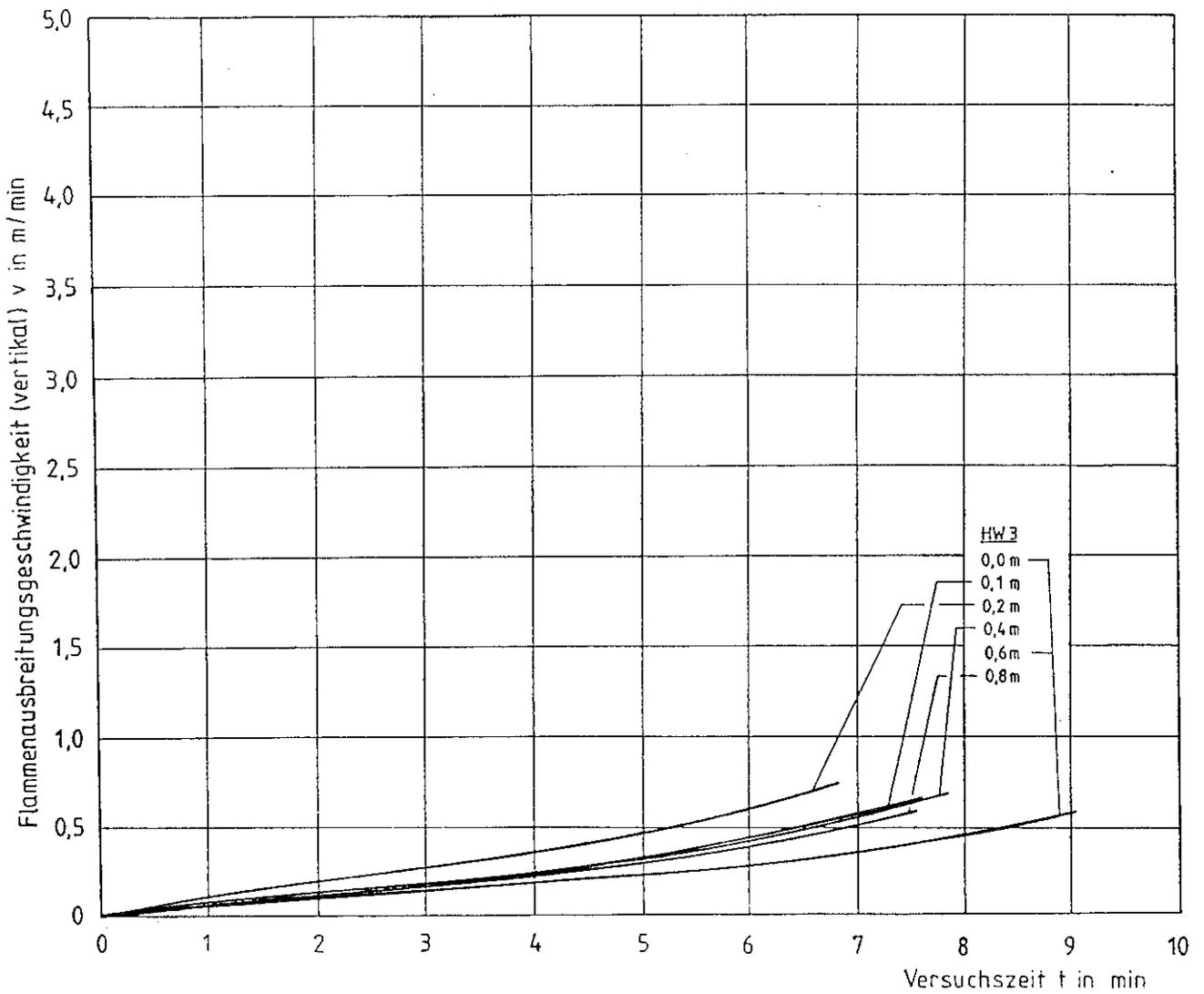


Bild 25 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit am Stapel VL bei einem Gitterboxlager (4 Stapel) bei verschiedenen Abständen nach /6/.

Bild 25.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

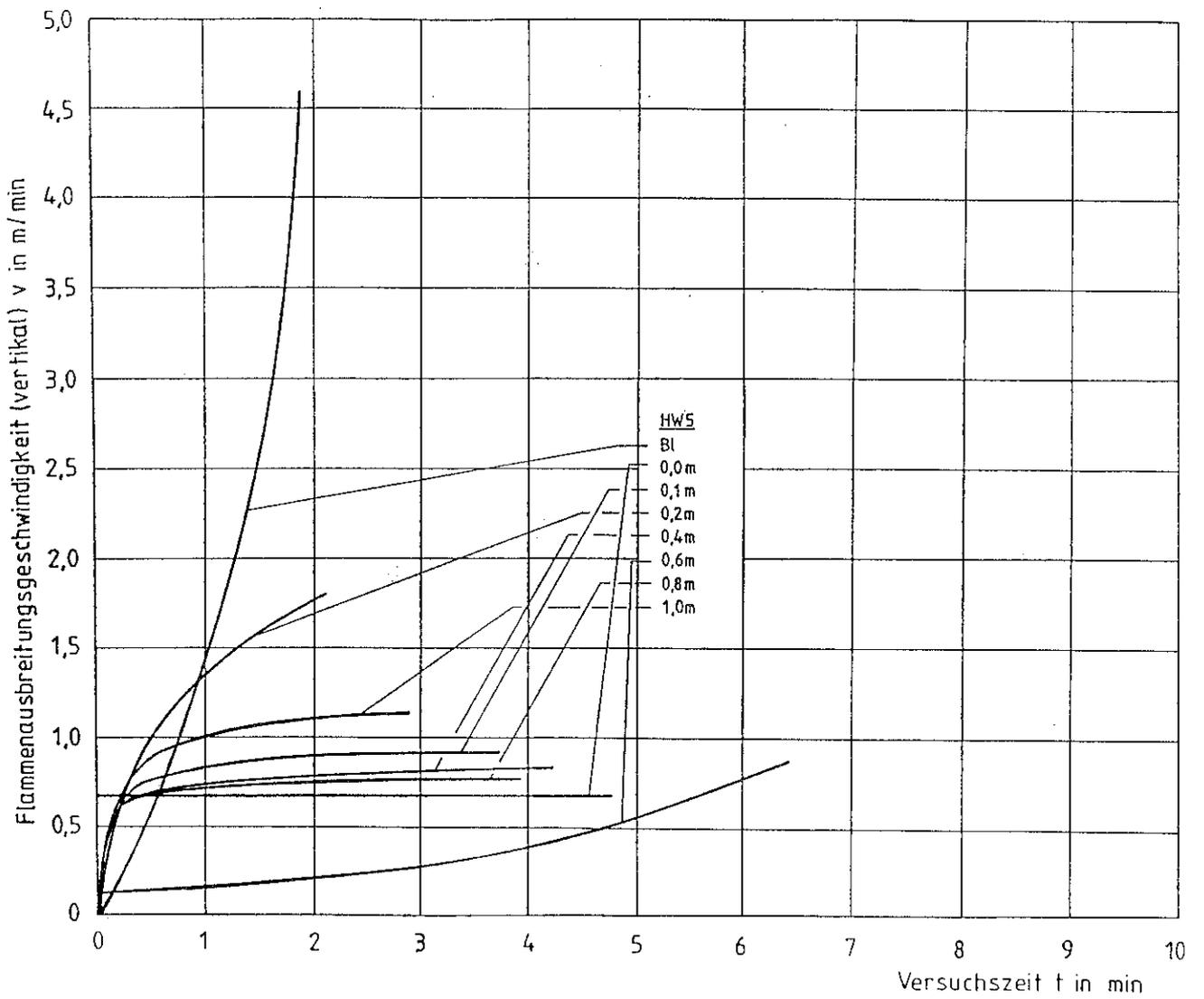


Bild 25.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

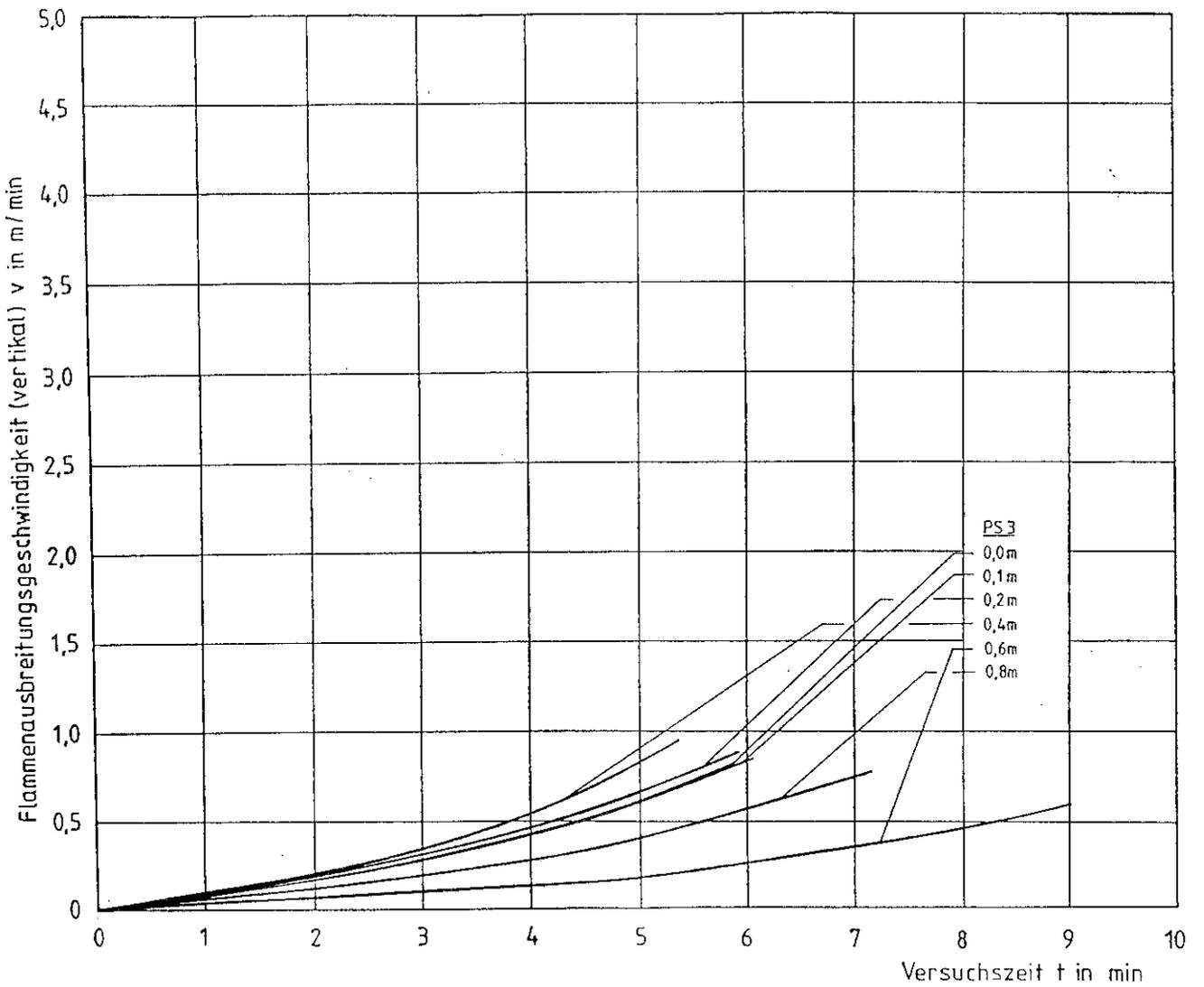


Bild 25.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

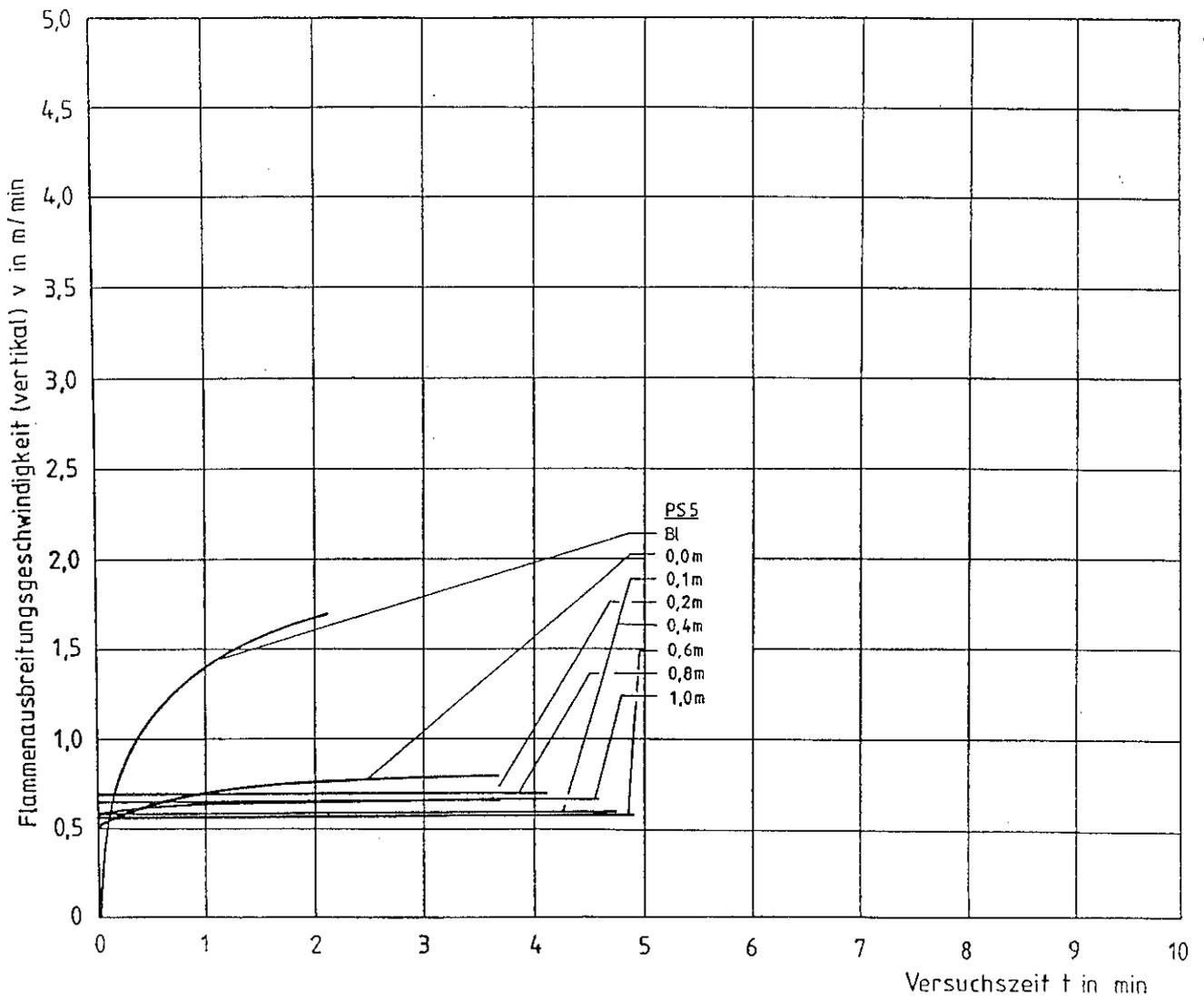


Bild 25.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

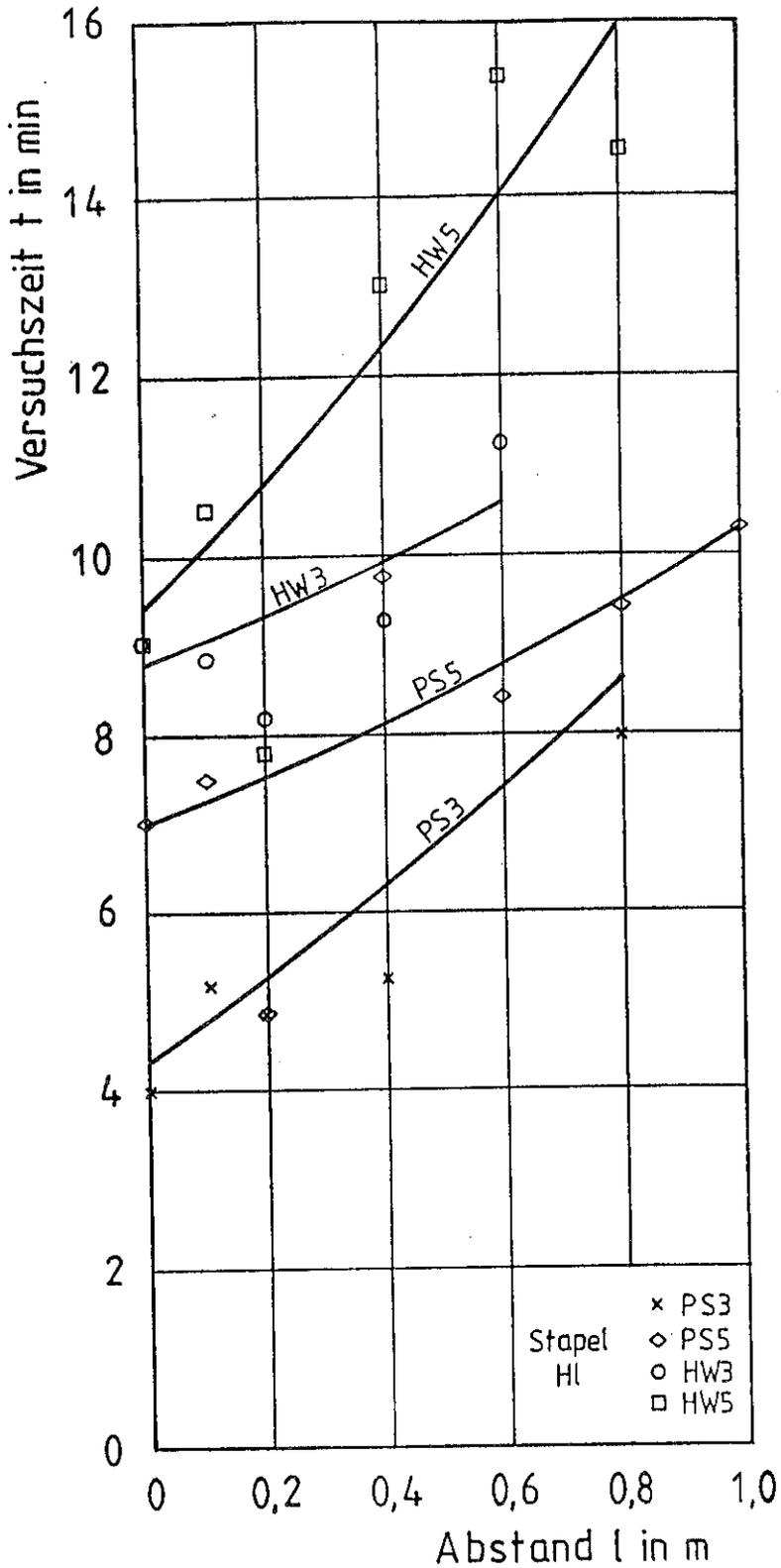


Bild 26 Versuchszeit, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzünden nach /6/.

Bild 26.1 Zündung Stapel HL

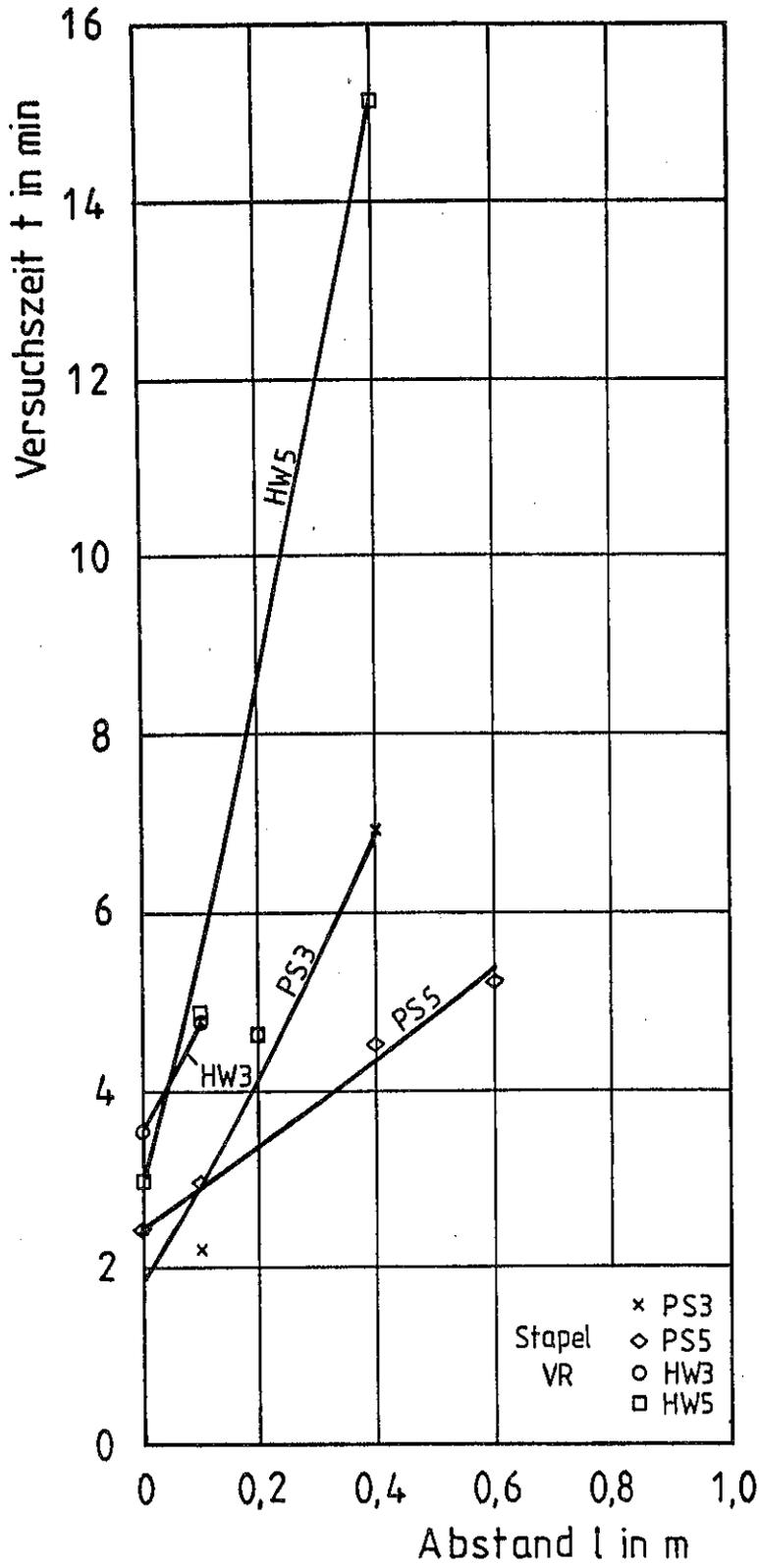


Bild 26.2 Zündung Stapel VR

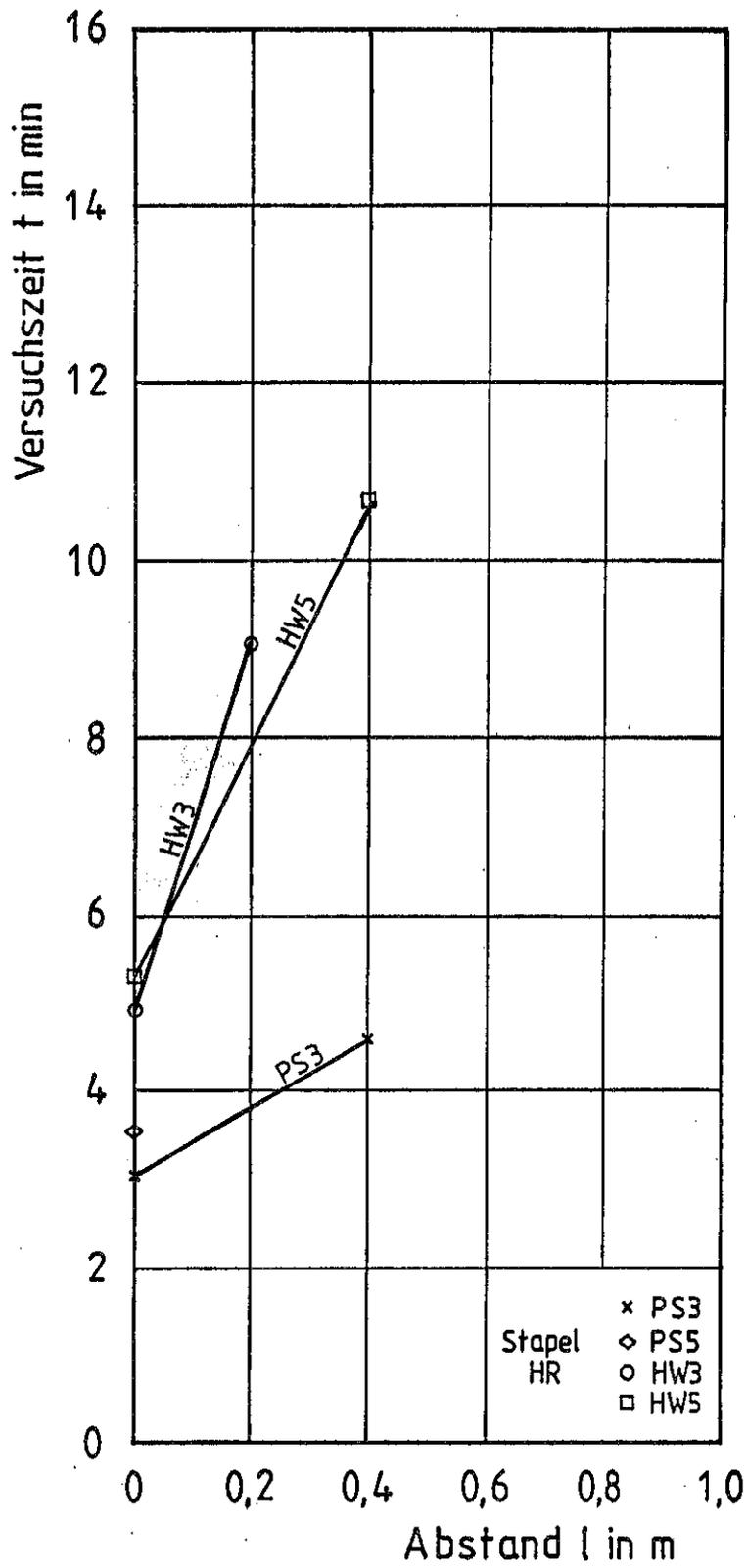


Bild 26.3 Zündung Stapel HR

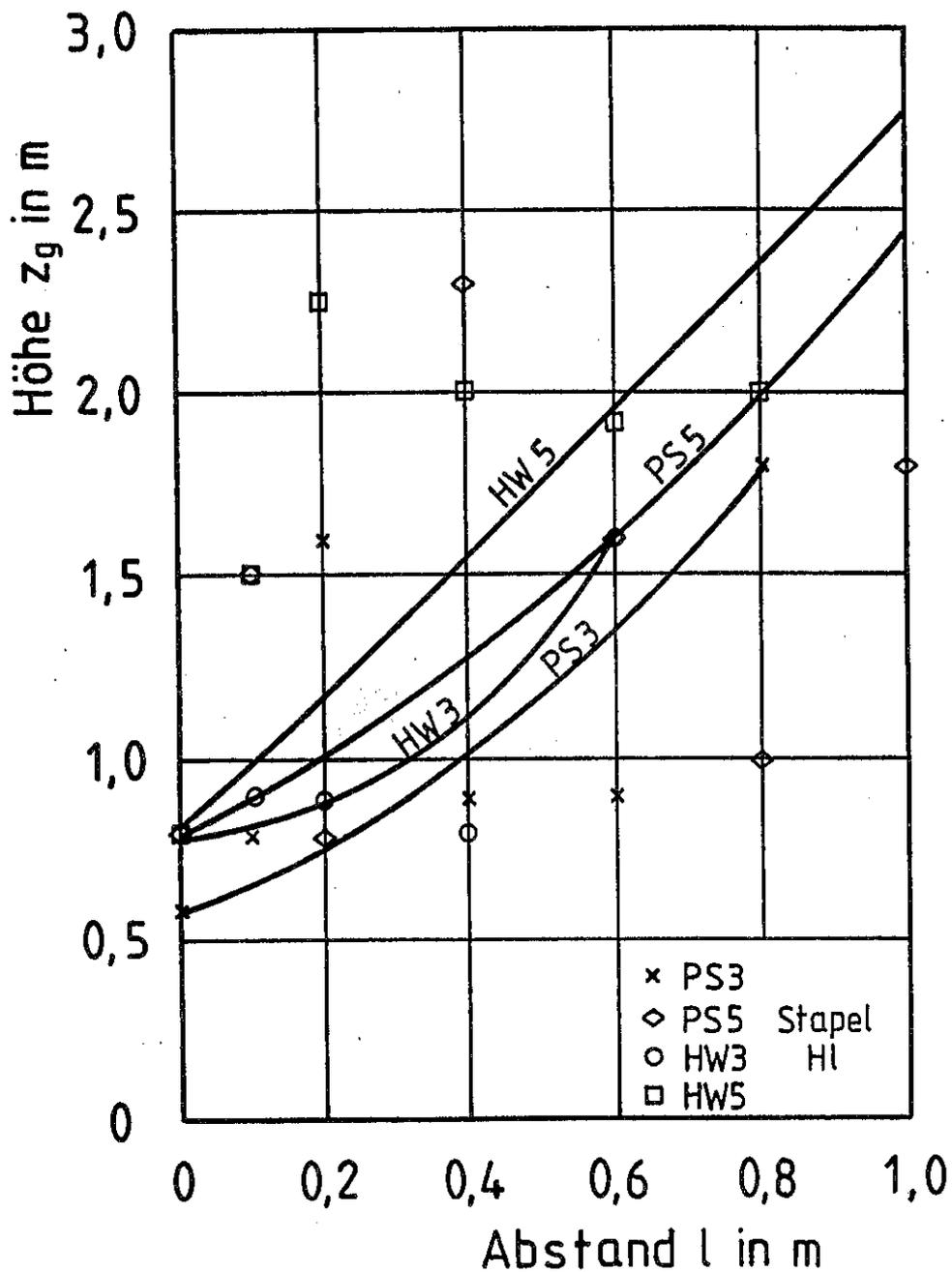


Bild 27 Höhe, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeaus-
tausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung
der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzünden nach
/6/.

Bild 27.1 Zündung Stapel HL

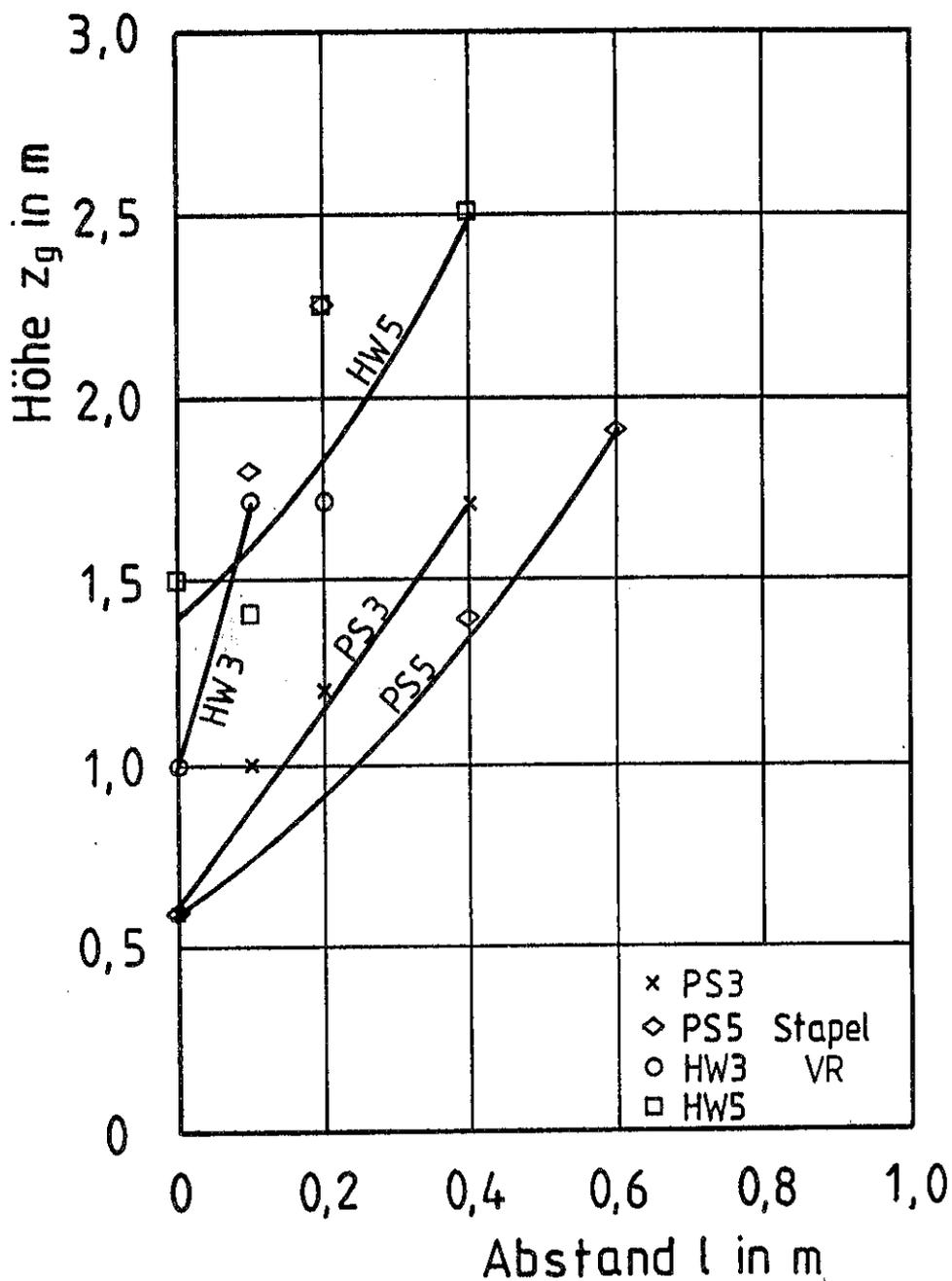


Bild 27.2 Zündung Stapel VR

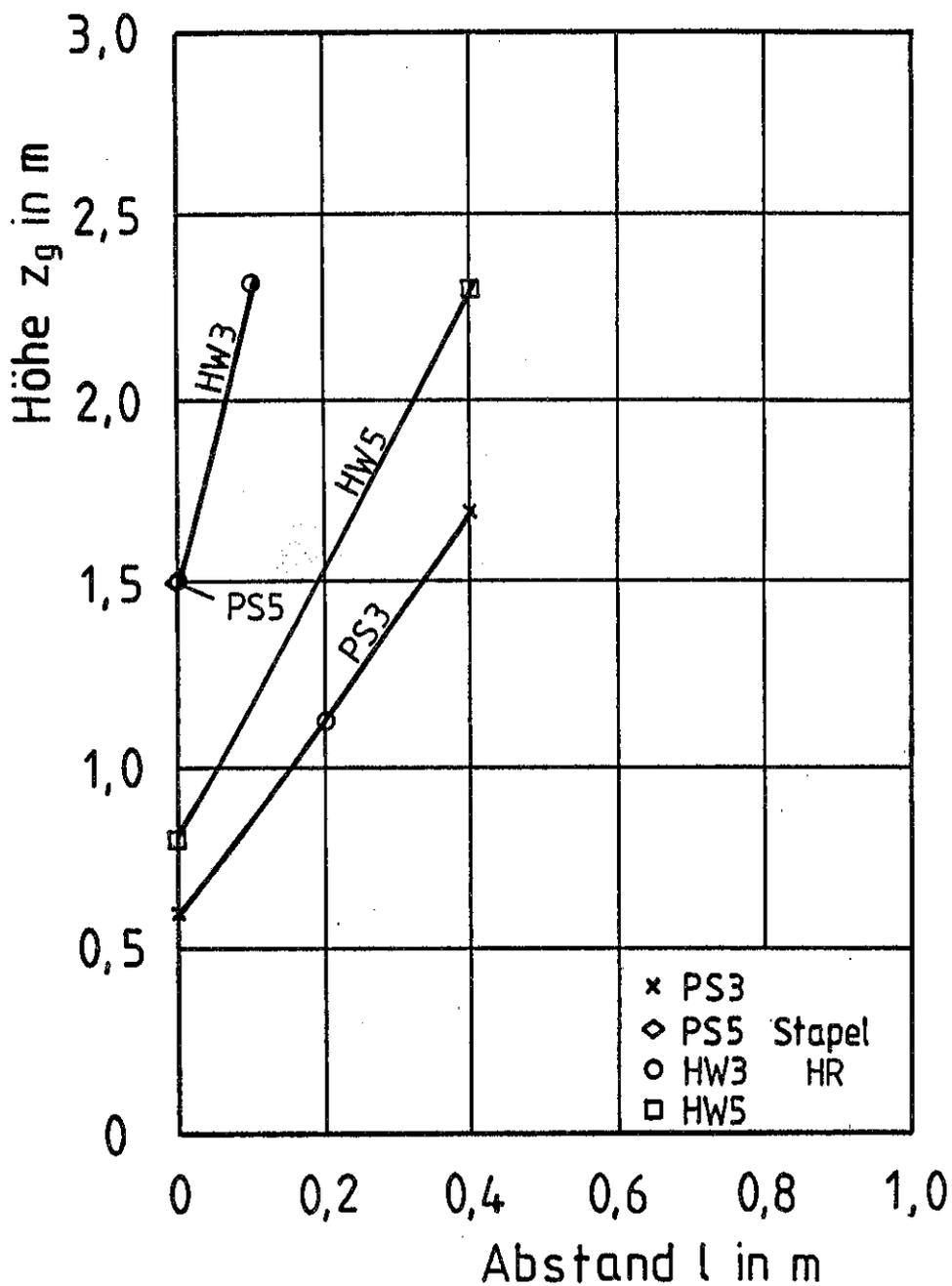


Bild 27.3 Zündung Stapel HR

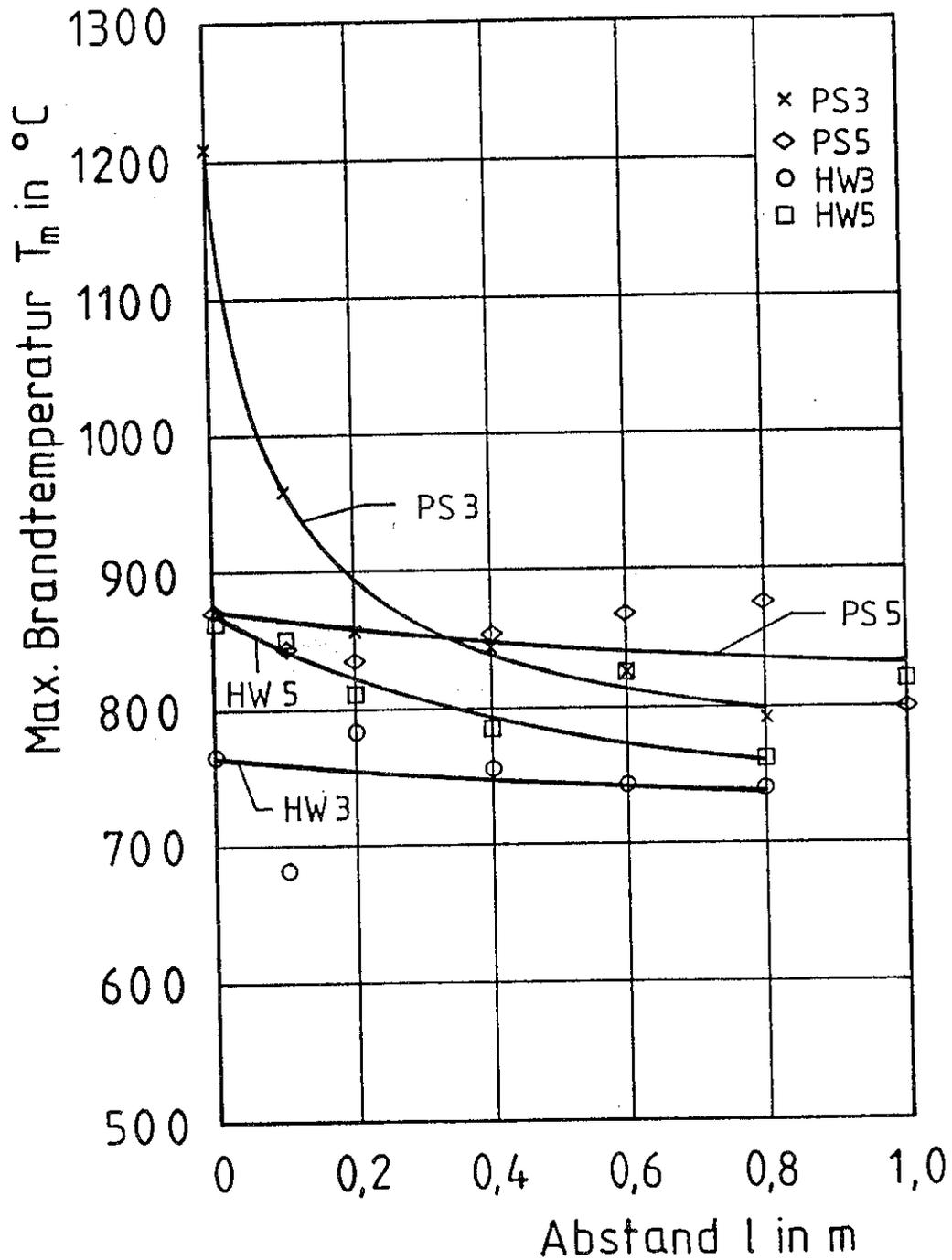


Bild 28 Maximalwert der gemessenen Temperaturen bei einem Gitterboxlager (4 Stapel) als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Stoßschutzmaterialien nach /6/.

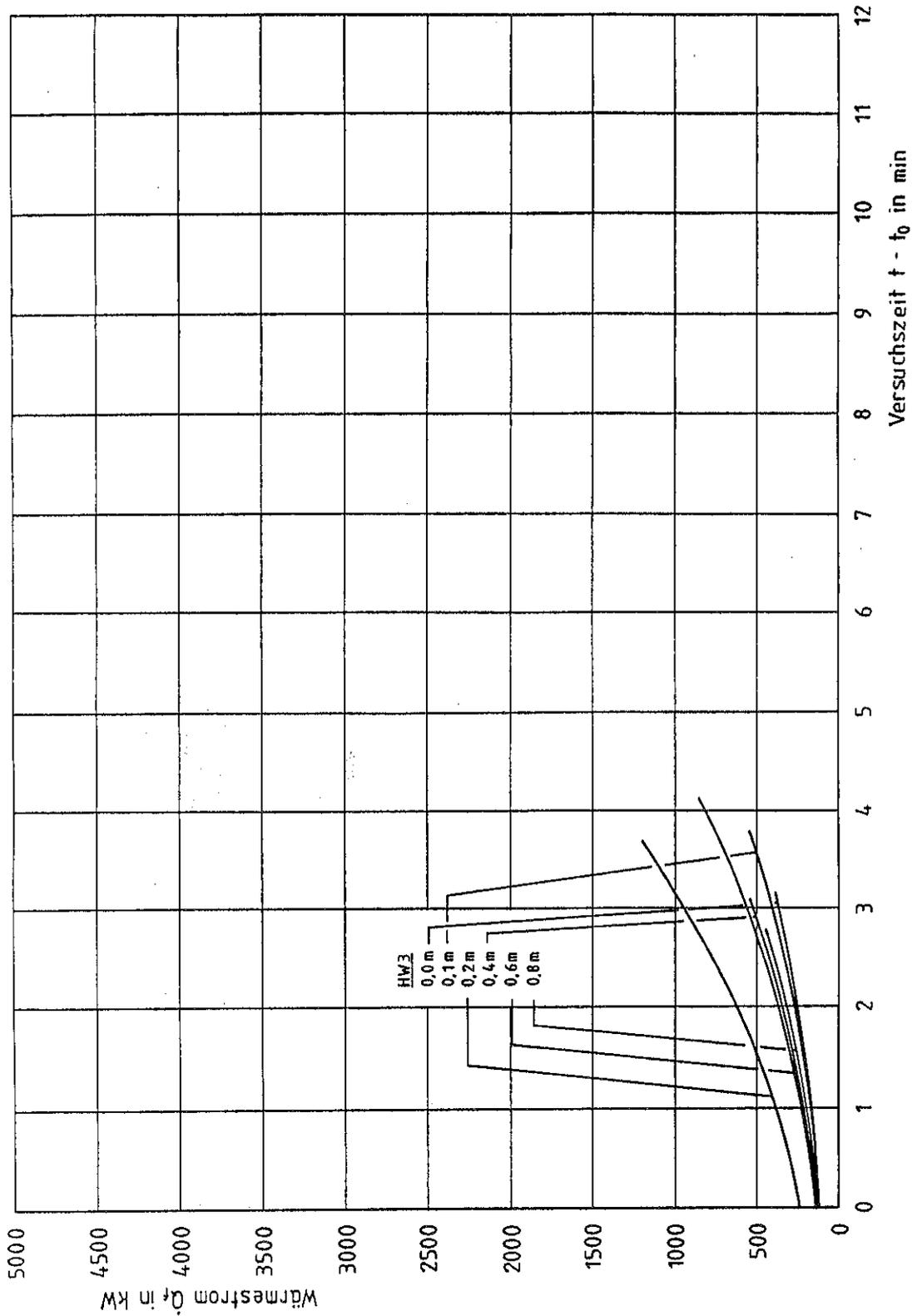


Bild 29 Fühlbarer Wärmestrom bei einem Gitterboxlager (4 Stapel) bzw. Blocklager als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung unterschiedlicher Stoßschutzmaterialien nach /6/.

Bild 29.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

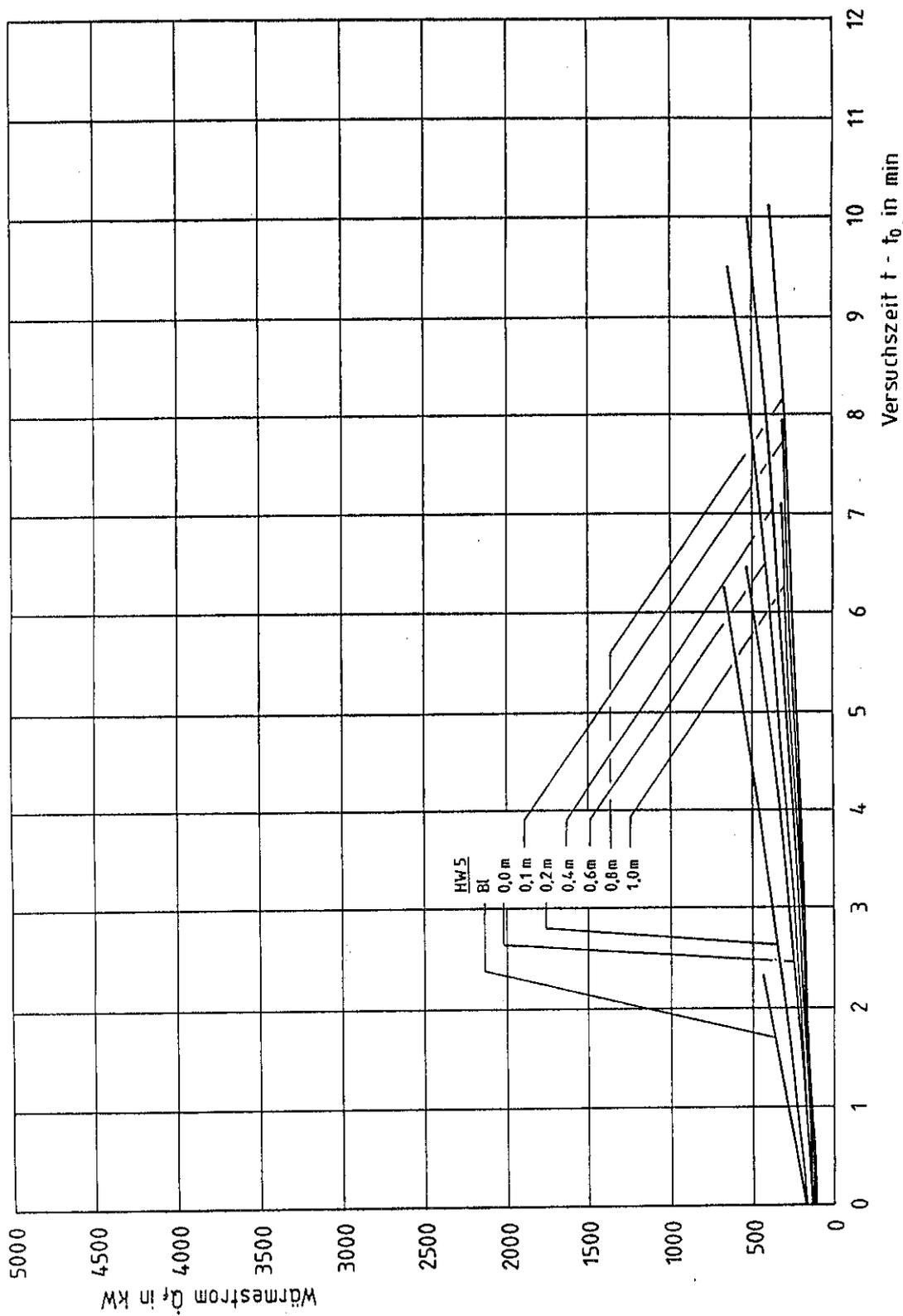


Bild 29.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

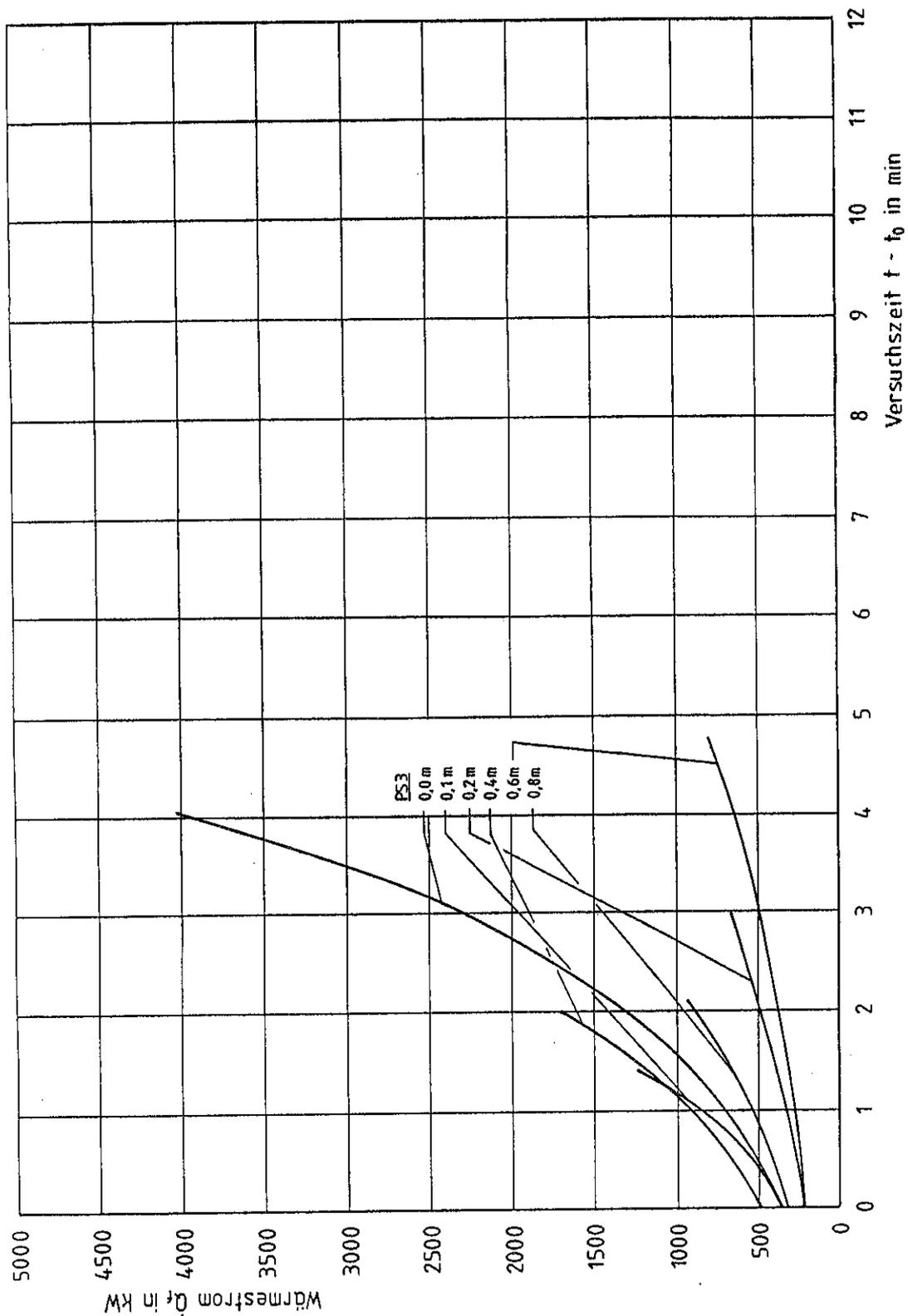


Bild 29.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

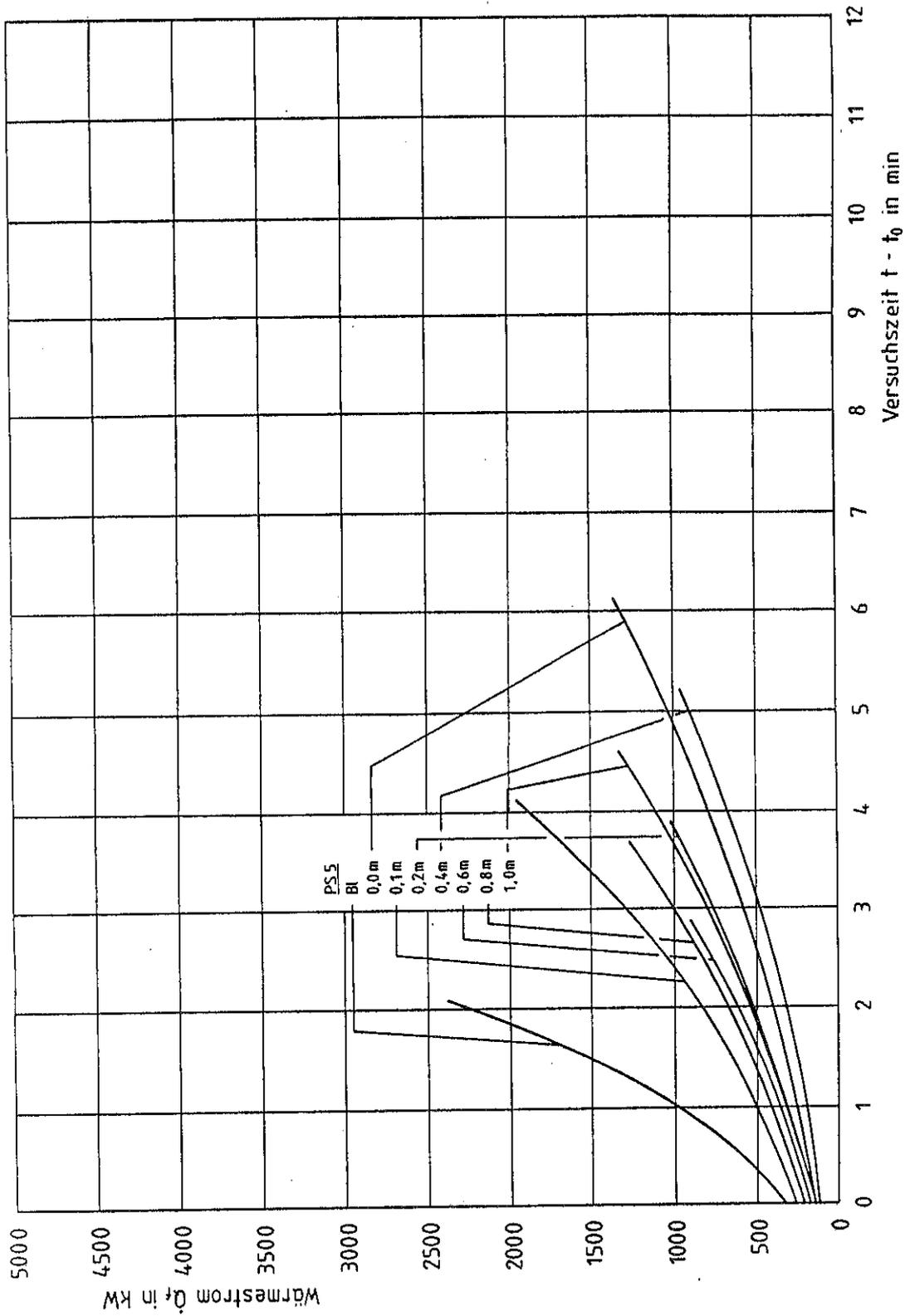


Bild 29.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

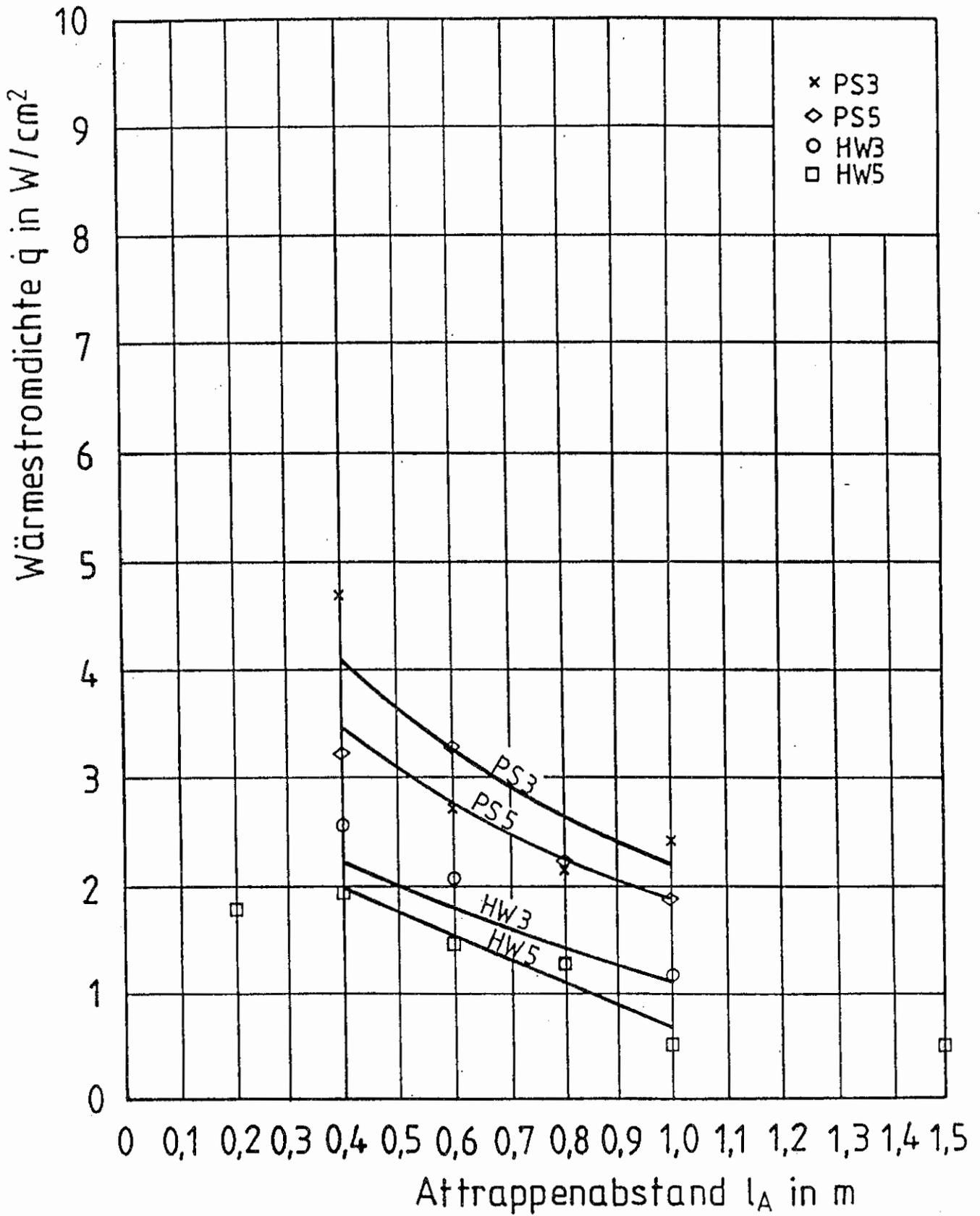


Bild 30 Maximale Wärmestromdichte an der Lagerattrappe als Funktion des Abstandes (siehe Bild 10) nach /6/.

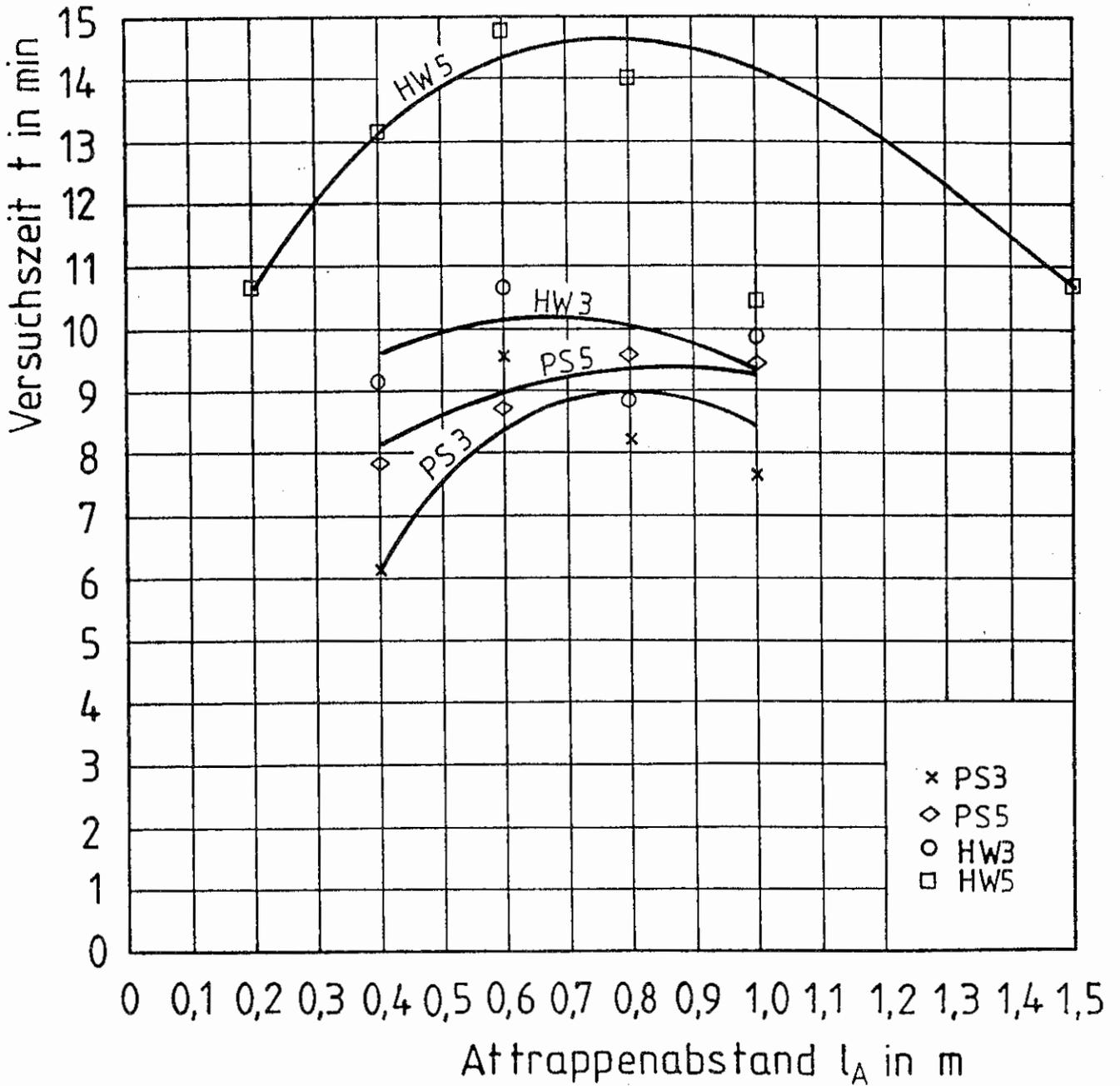


Bild 31 Versuchszeit bei der der Maximalwert der Wärmestromdichte an der Lagerattrappe auftritt als Funktion des Abstandes (siehe Bild 10) nach /6/.

Mittlere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in m/min

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

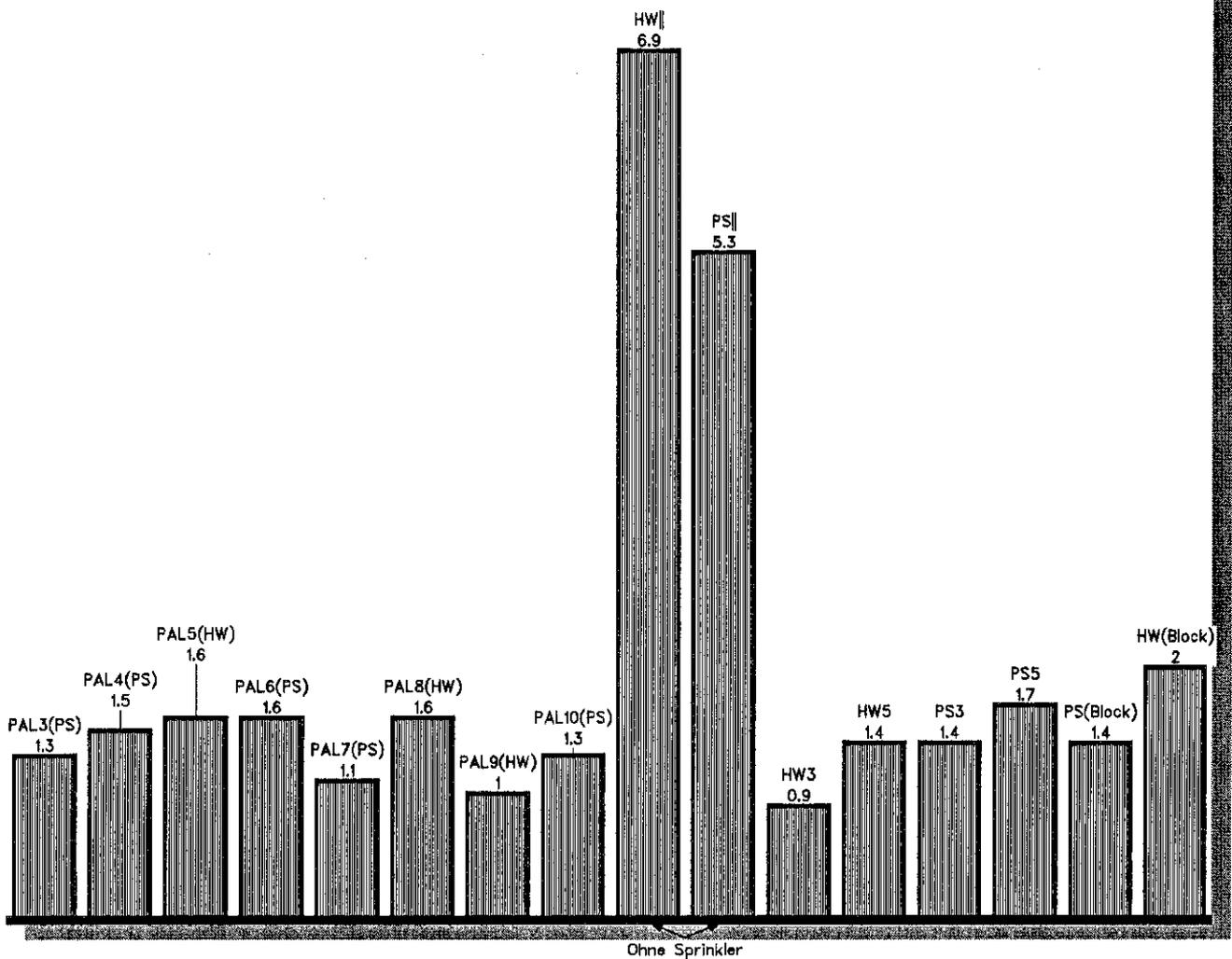
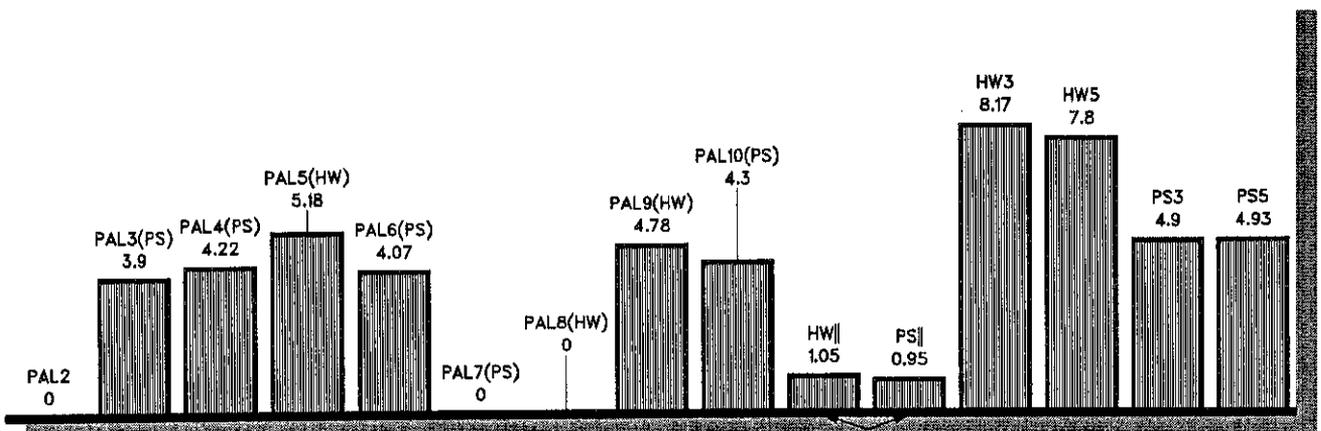


Bild 32 Mittlere vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Lagerarten und Lagerkonfigurationen nach /22/.

Stapel HL – Zeit t_z in min



Höhe z_z in m

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

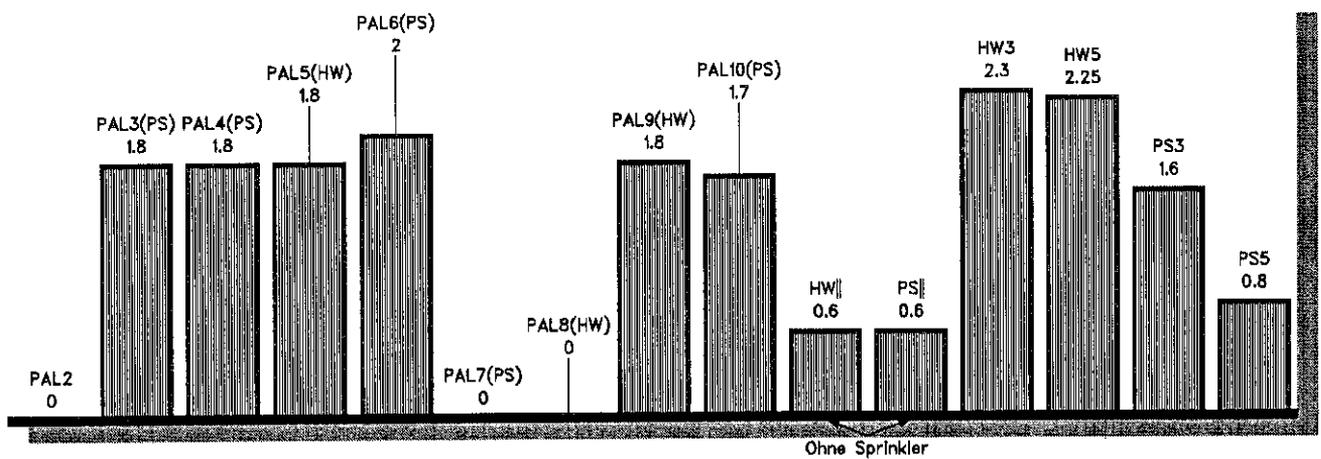
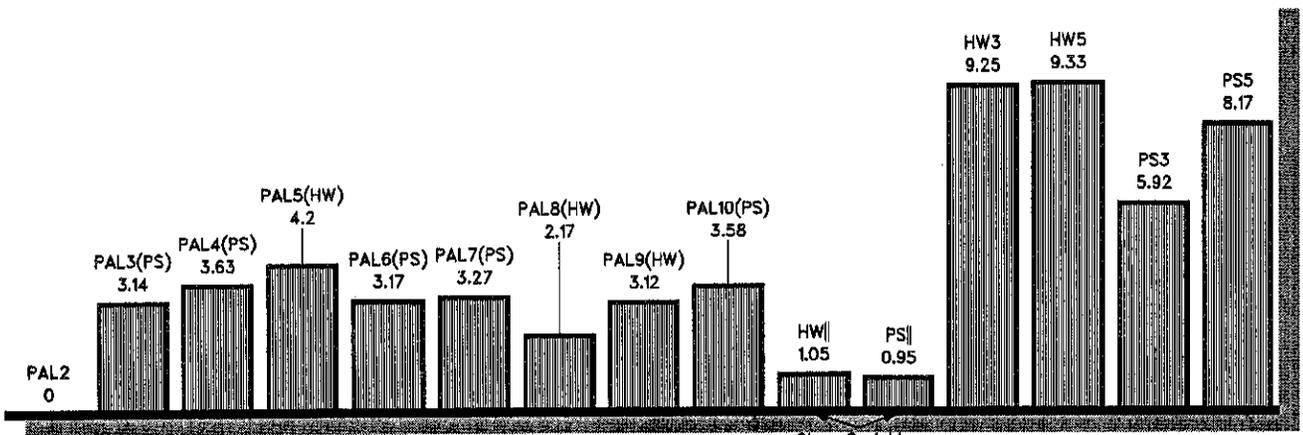


Bild 33 Zeit t_z , bei der sich der Stapel HL in der Höhe z_z durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet nach /22/.

Stapel VR – Zeit t_z in min



Höhe z_z in m

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

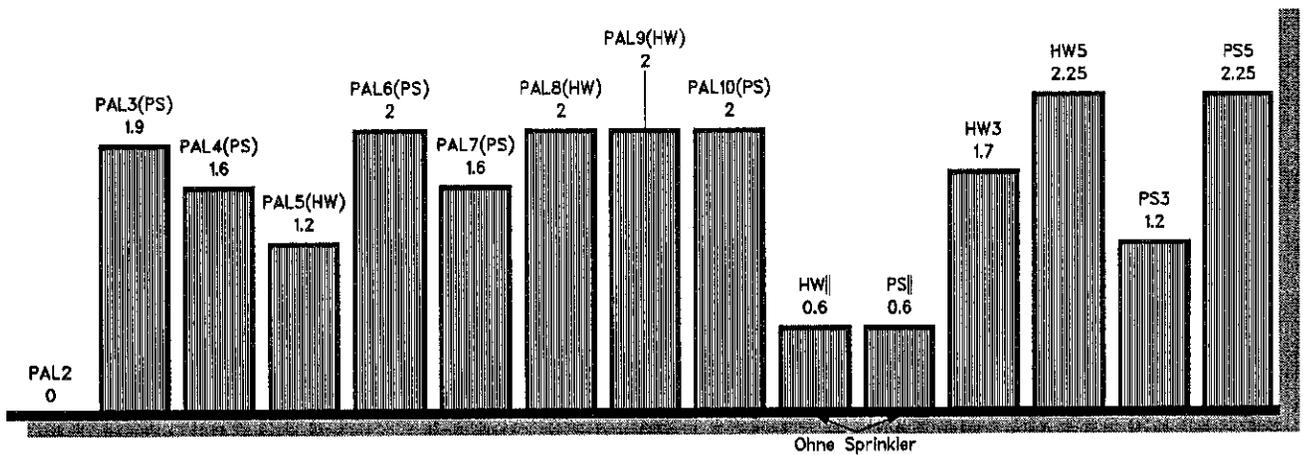


Bild 34 Zeit t_z , bei der sich der Stapel VR in der Höhe z_z durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet nach /22/.

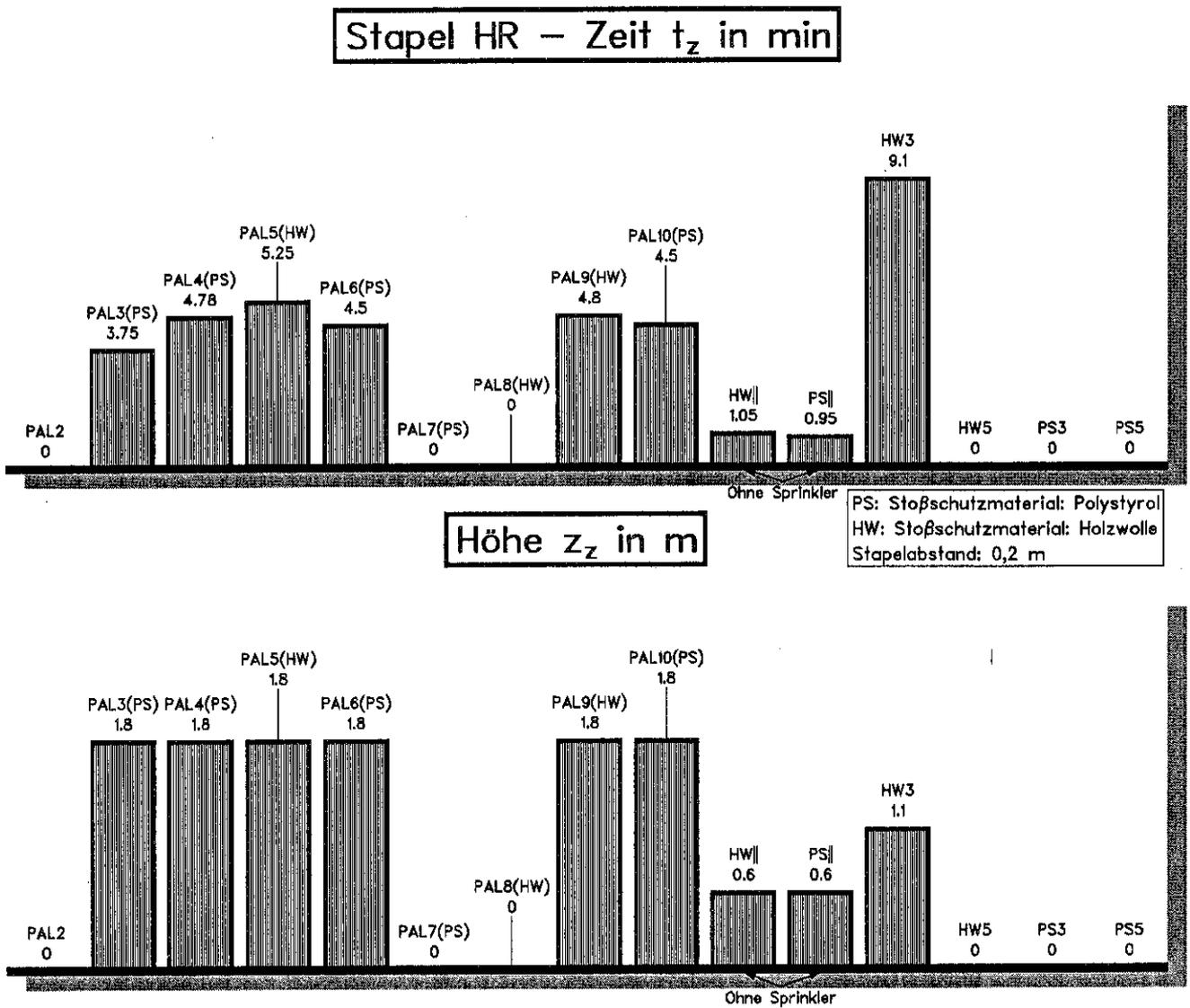


Bild 35 Zeit t_z , bei der sich der **Stapel HR** in der Höhe z_z durch Wärmeübertragung oder Flugfeuer bei den verschiedenen Lagerarten entzündet nach /22/.

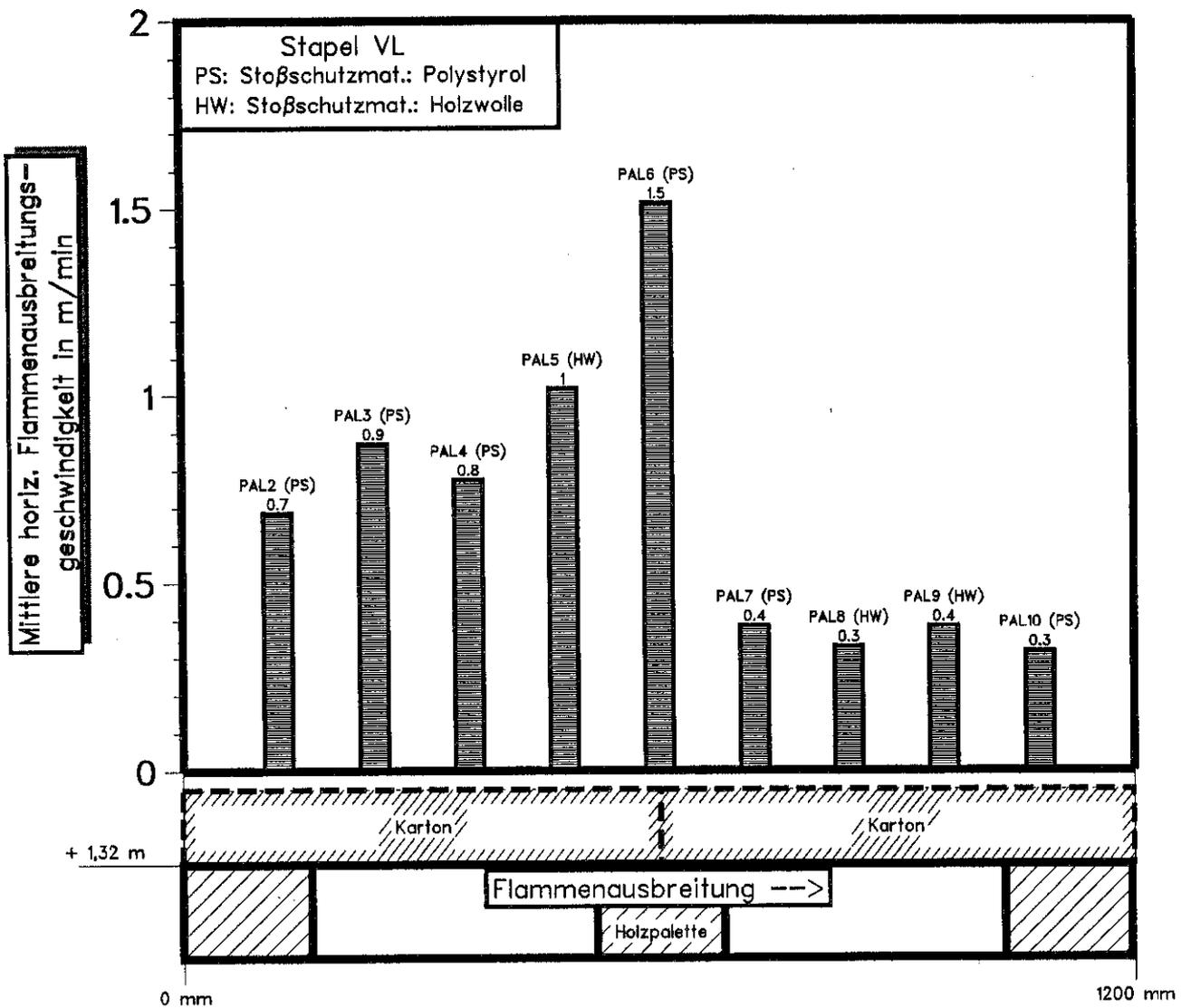


Bild 36 Mittlere horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im Zwischenraum der 2. Palette - Stapel VL nach /22/.

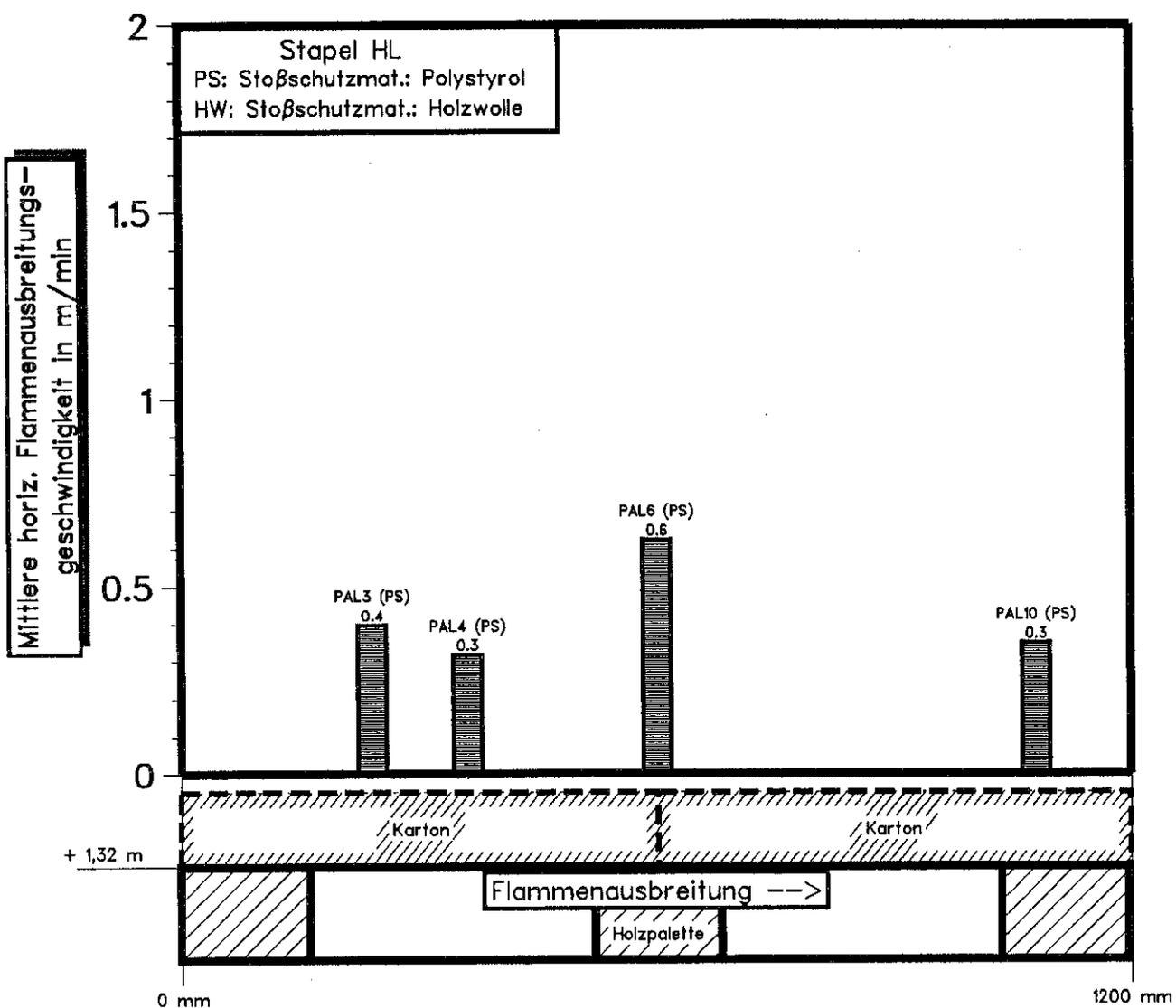


Bild 37 Mittlere horizontale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im Zwischenraum der 2. Palette - Stapel HL nach /22/.

Zeit t_0 in min

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle
Stapelabstand: 0,2 m
Ausnahme: REG(PS) (siehe Lageraufbau)

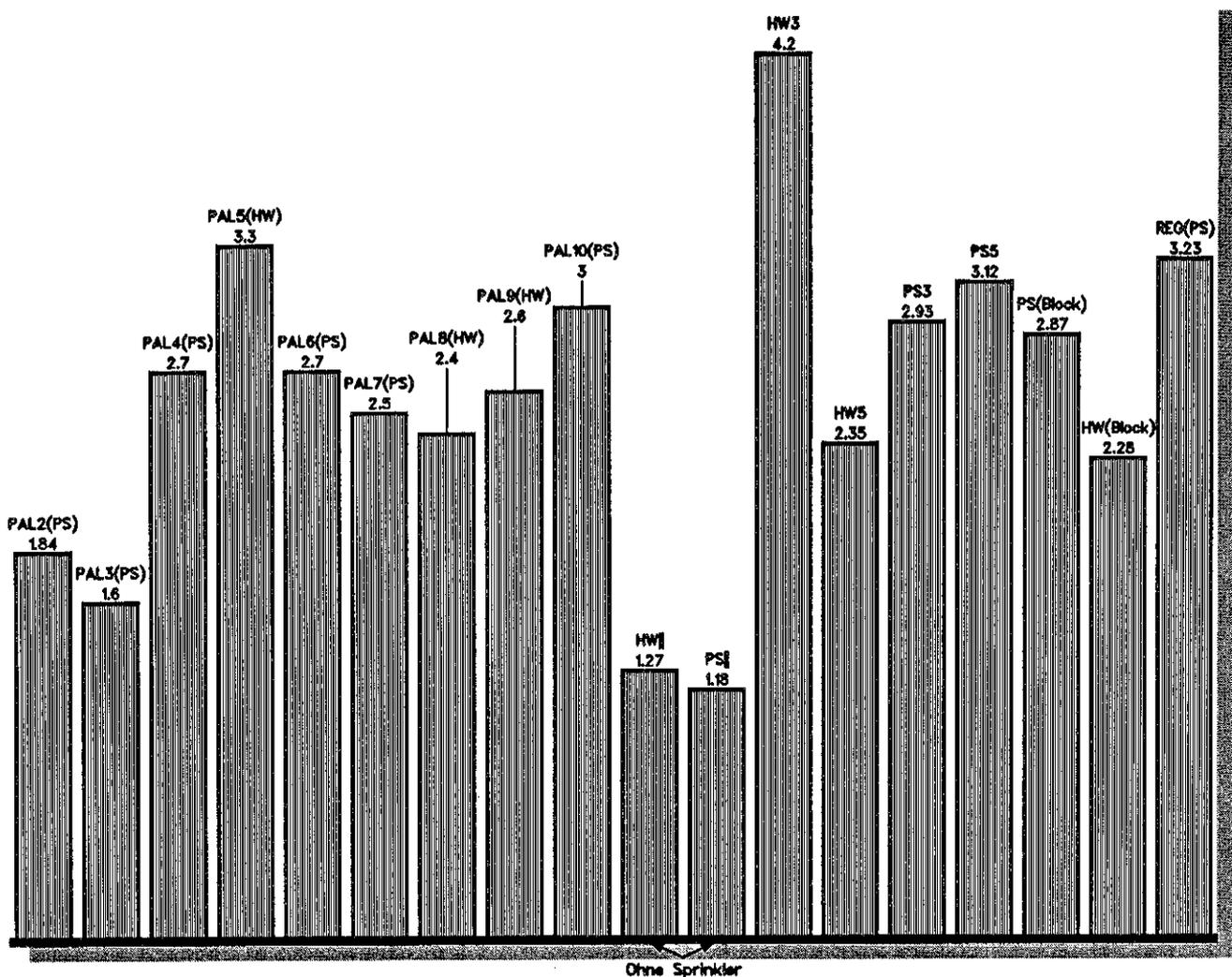


Bild 38 Versuchszeit t_0 als Funktion der verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien nach /22/.

Mittlere Abbrandrate in kg/min

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwolle
Stapelabstand: 0,2 m
Ausnahme: REG(PS) (siehe Lageraufbau)

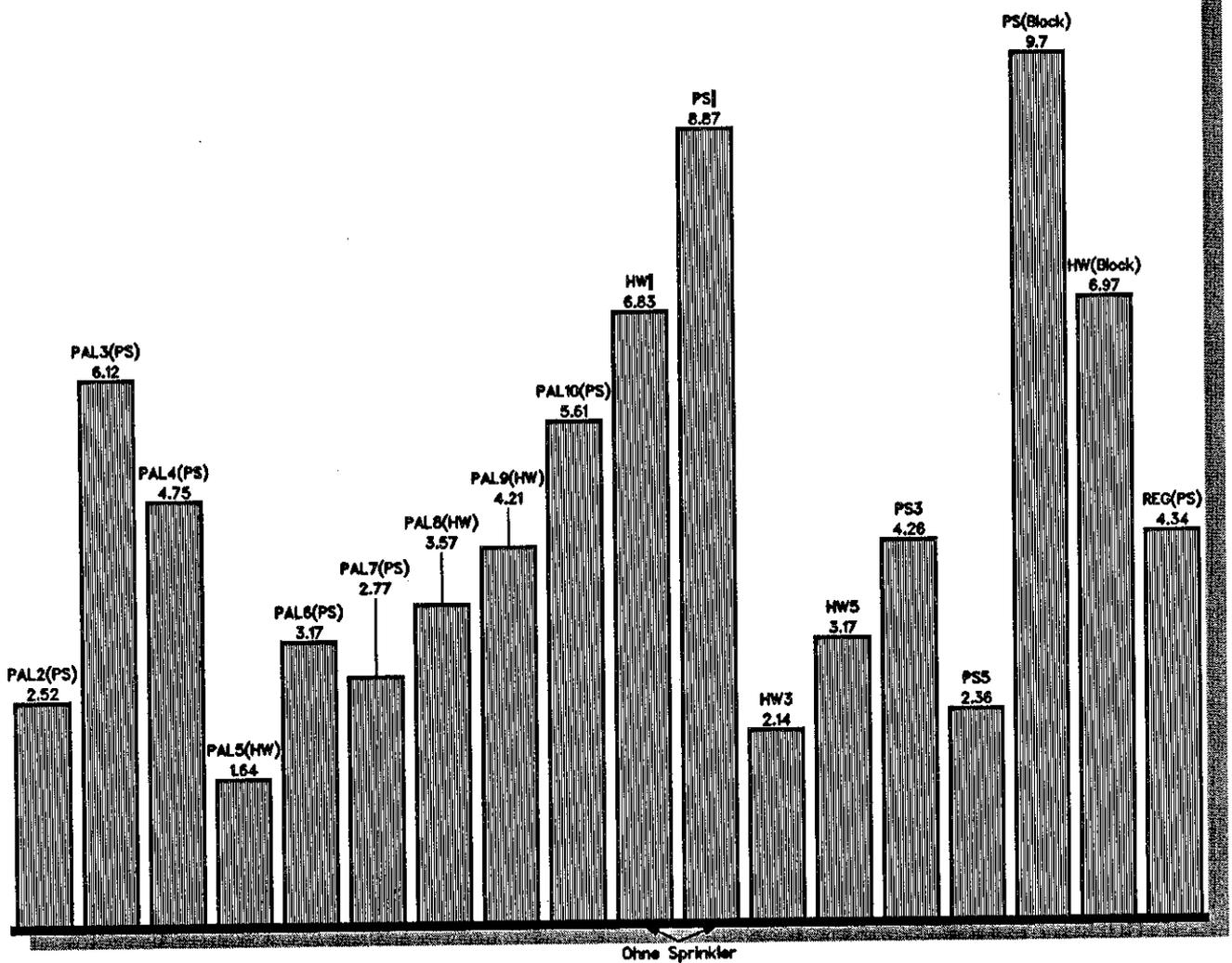


Bild 39 Mittlere Abbrandrate bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen während der Zeit $t - t_0$ nach /22/.

Mittlere Wärmefreisetzung in kW

PS: Stoßschutzmaterial: Polystyrol
HW: Stoßschutzmaterial: Holzwole
Stapelabstand: 0,2 m
Ausnahme: REG(PS) (siehe Lageraufbau)

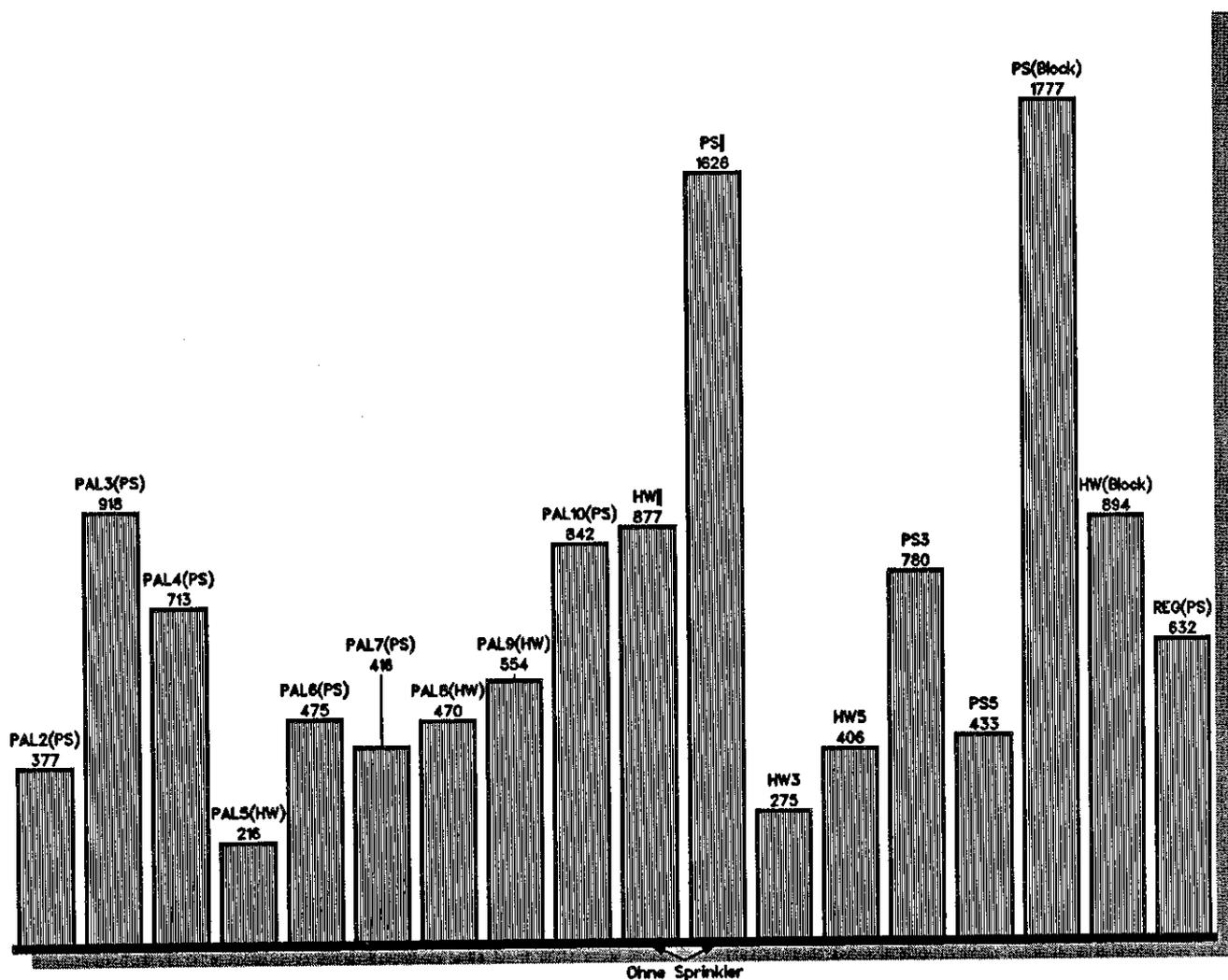


Bild 40 Mittlere Wärmefreisetzung bis zum Löscheinsatz bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen während der Zeit $t - t_0$ nach /22/.

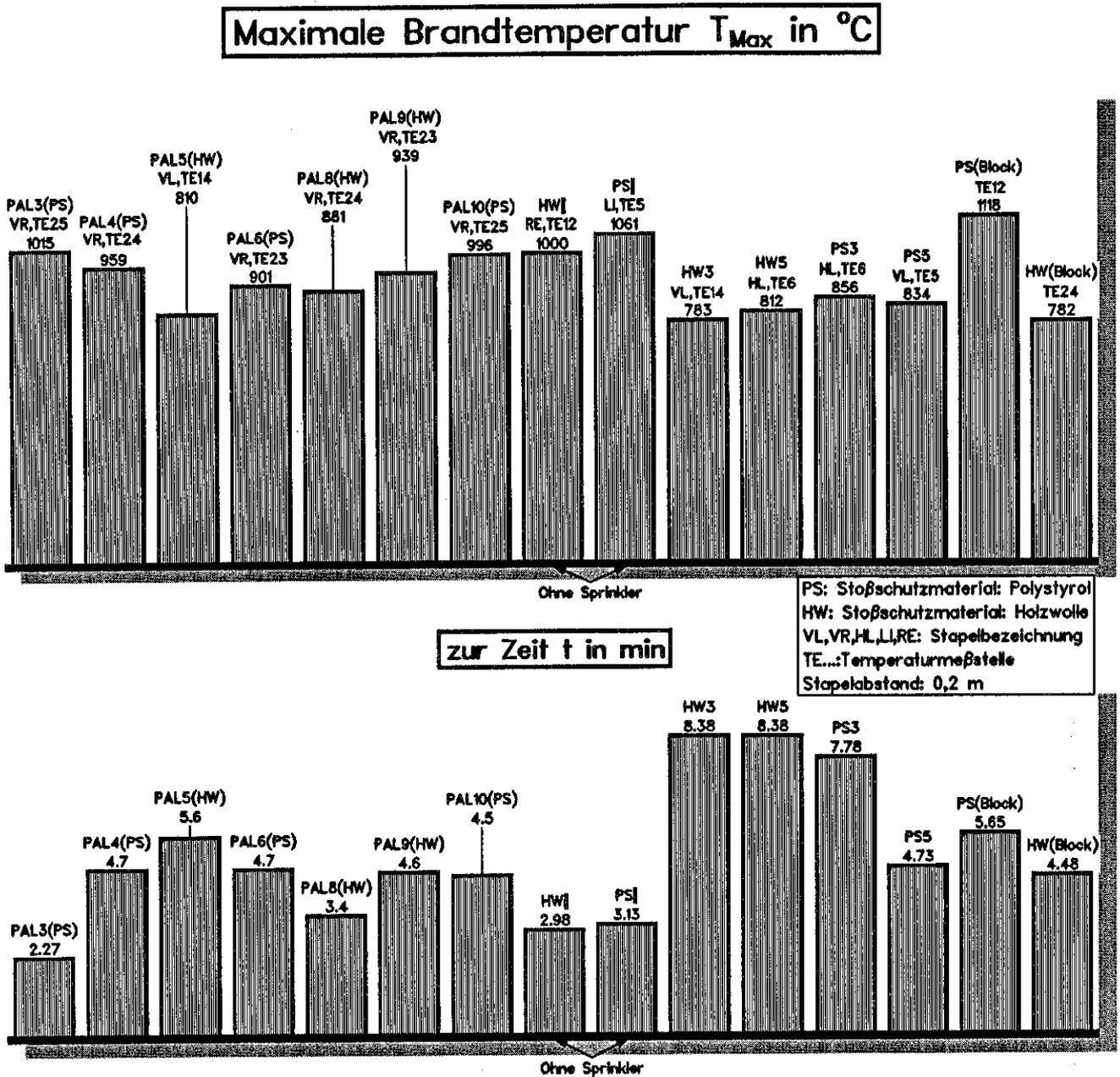


Bild 41 Maximalwert der gemessenen Temperaturen als Funktion der Zeit bei unterschiedlichen Lagerarten und Lagerkonfigurationen nach /22/.

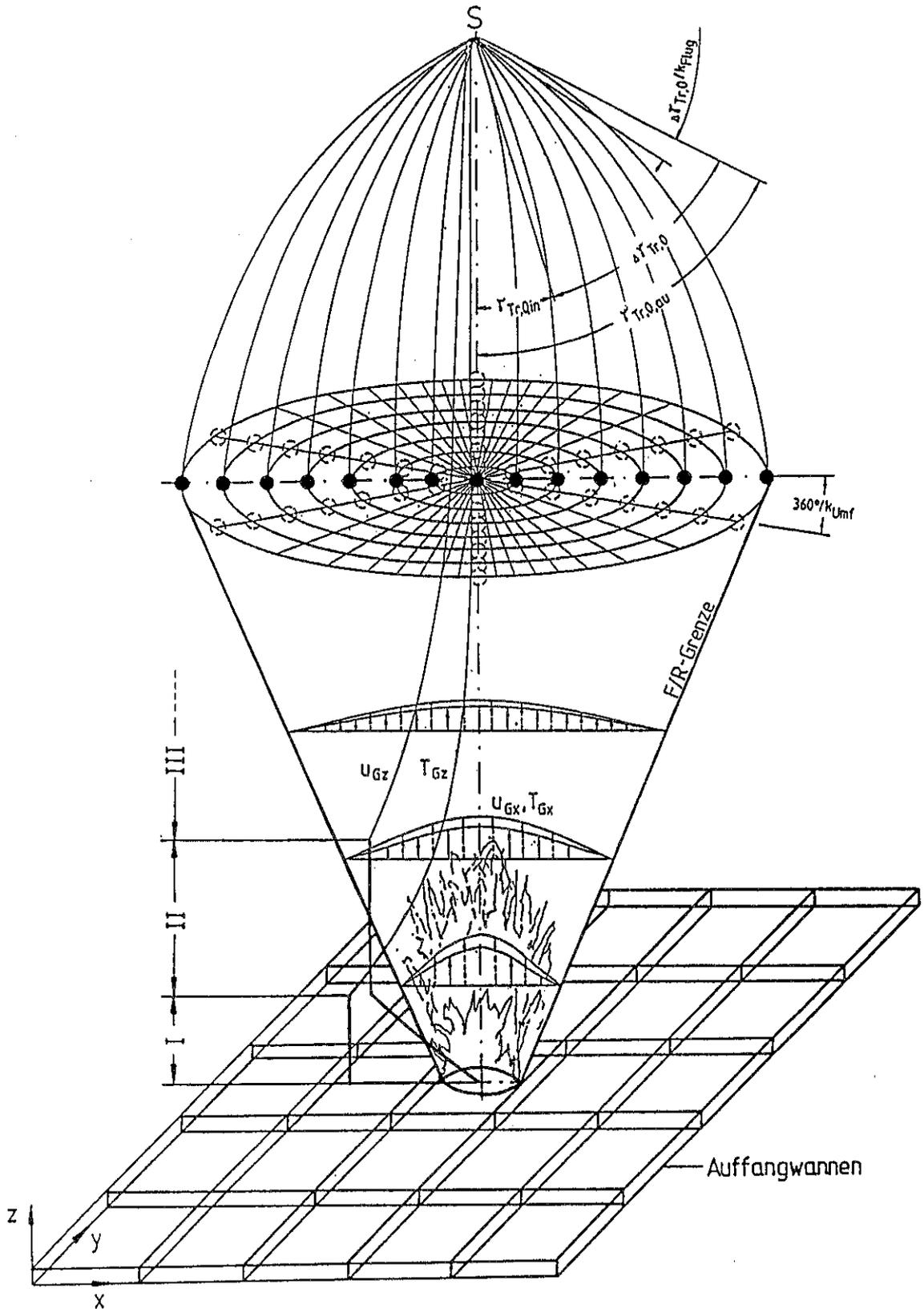


Bild 42 Modell zur Berechnung der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung und der Wasserbeaufschlagung von Auffangwannen nach /19/ und /20/.

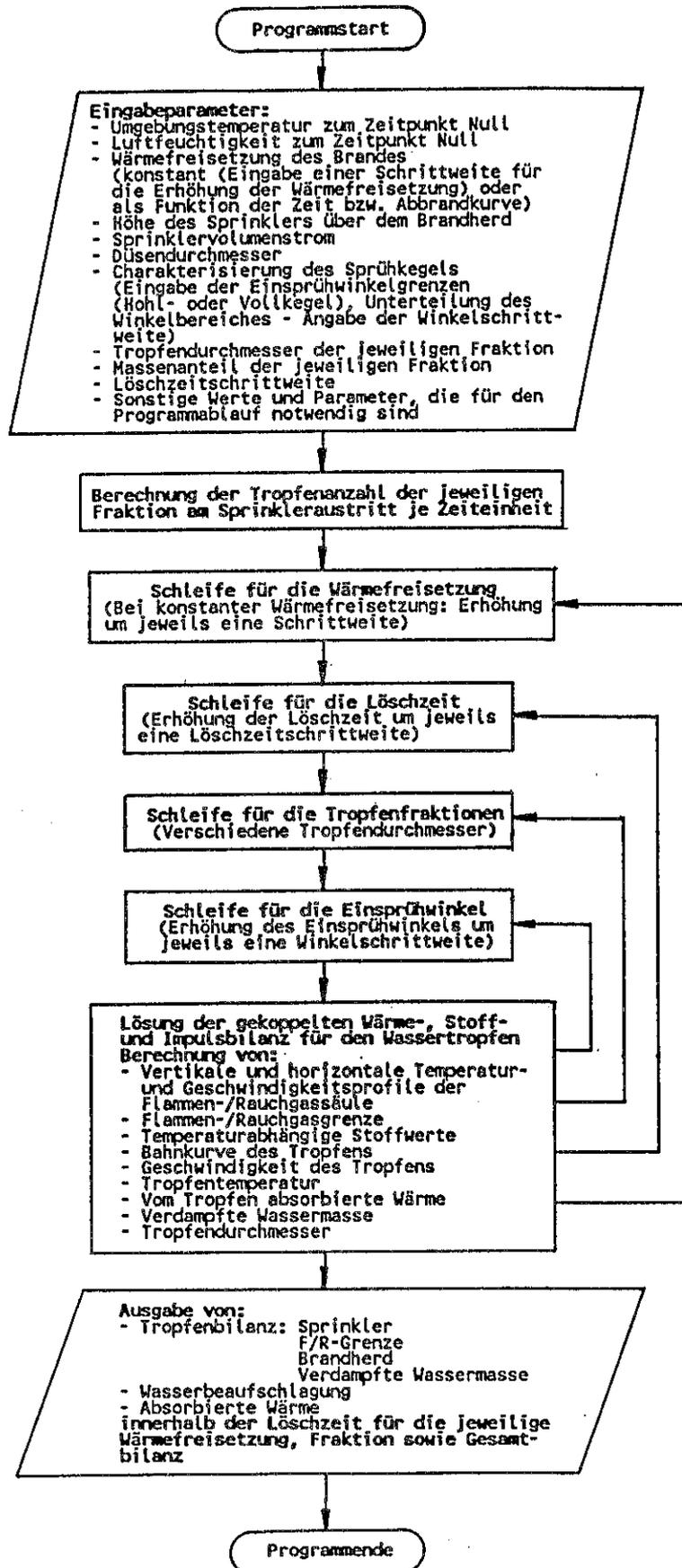


Bild 43 Flußdiagramm zur numerischen Simulation nach /19/ und /20/.

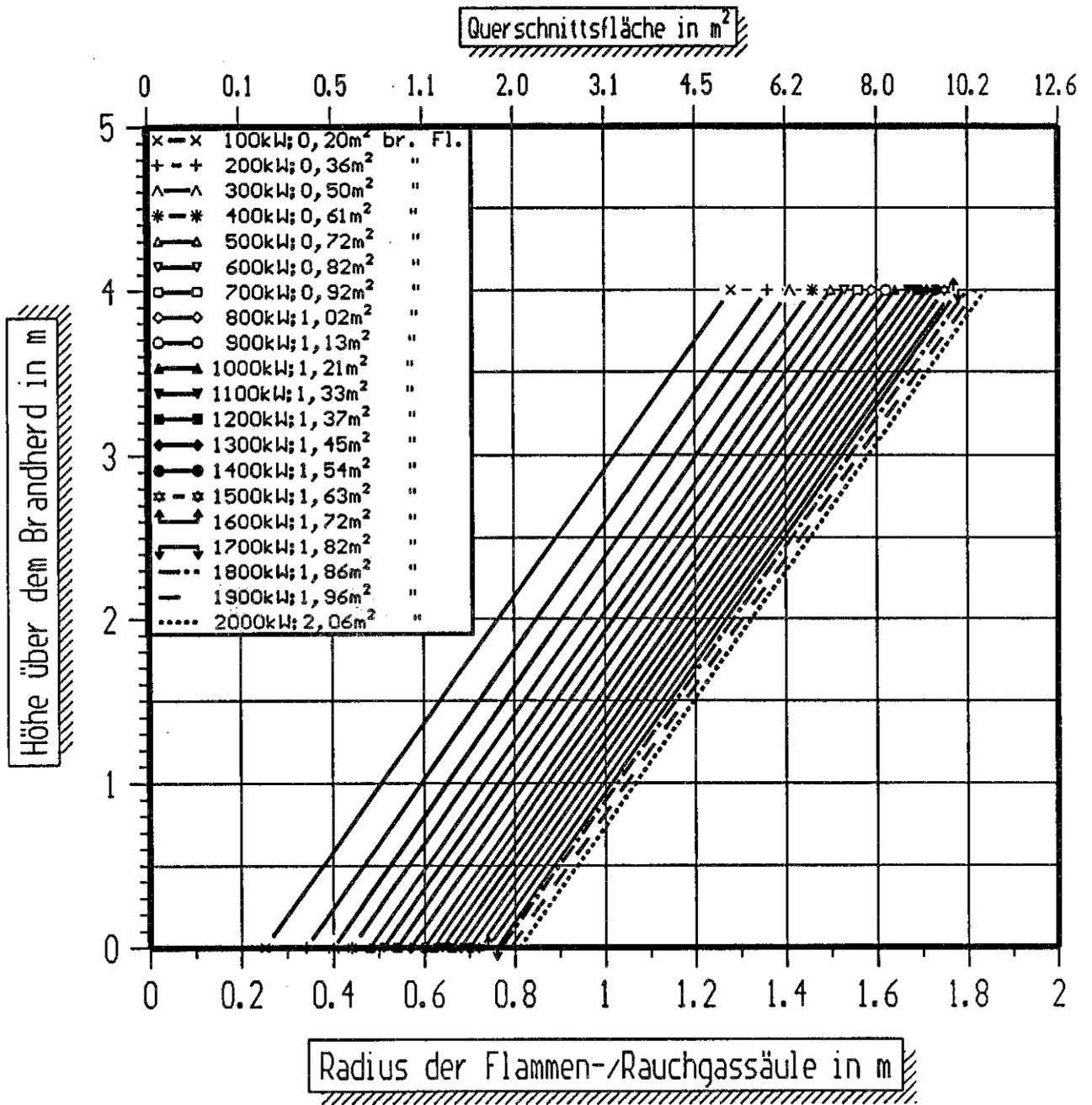


Bild 44 Radius der Flammen-/Rauchgassäule als Funktion der Wärmefreisetzung nach /19/.

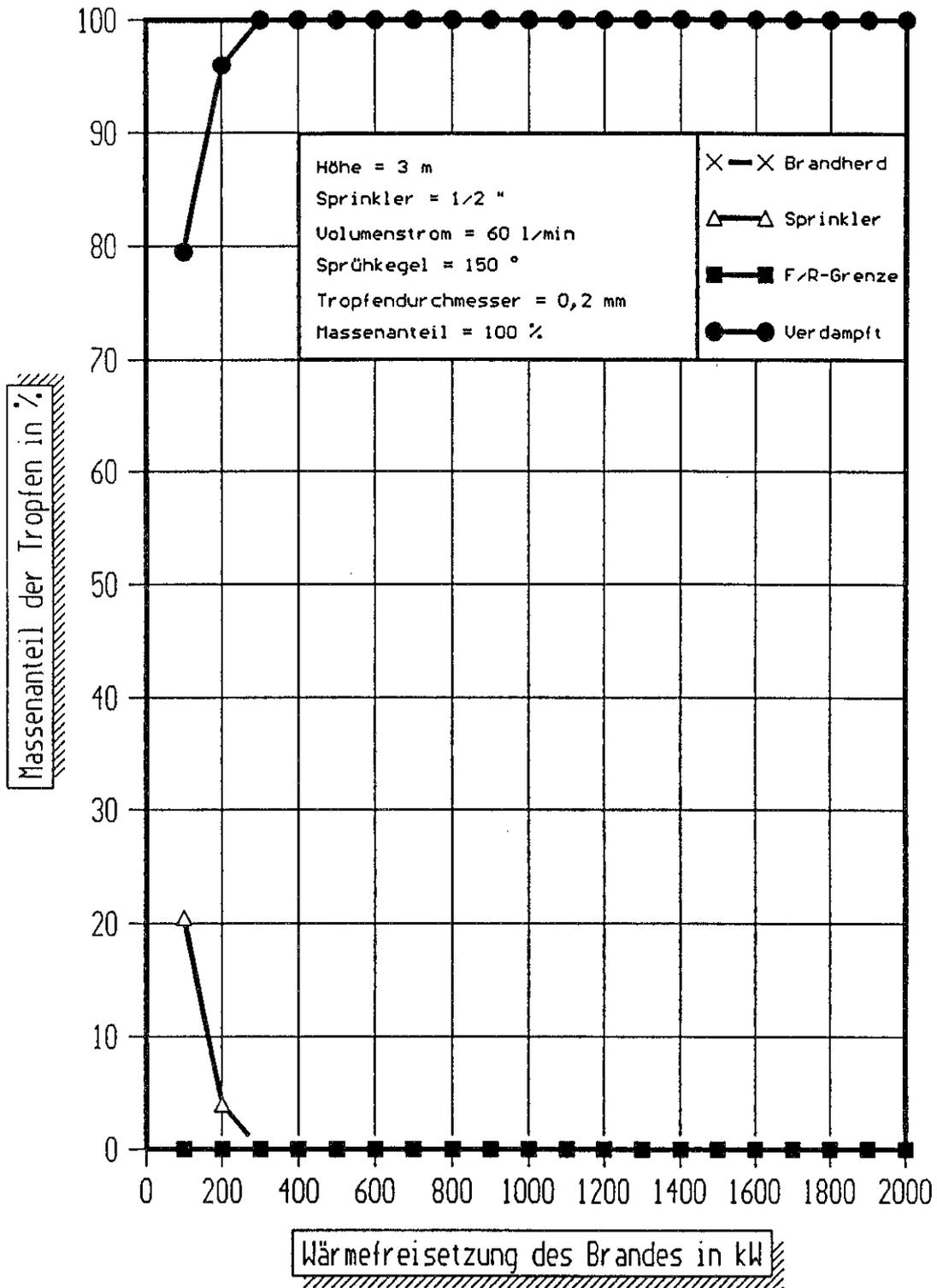


Bild 45 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

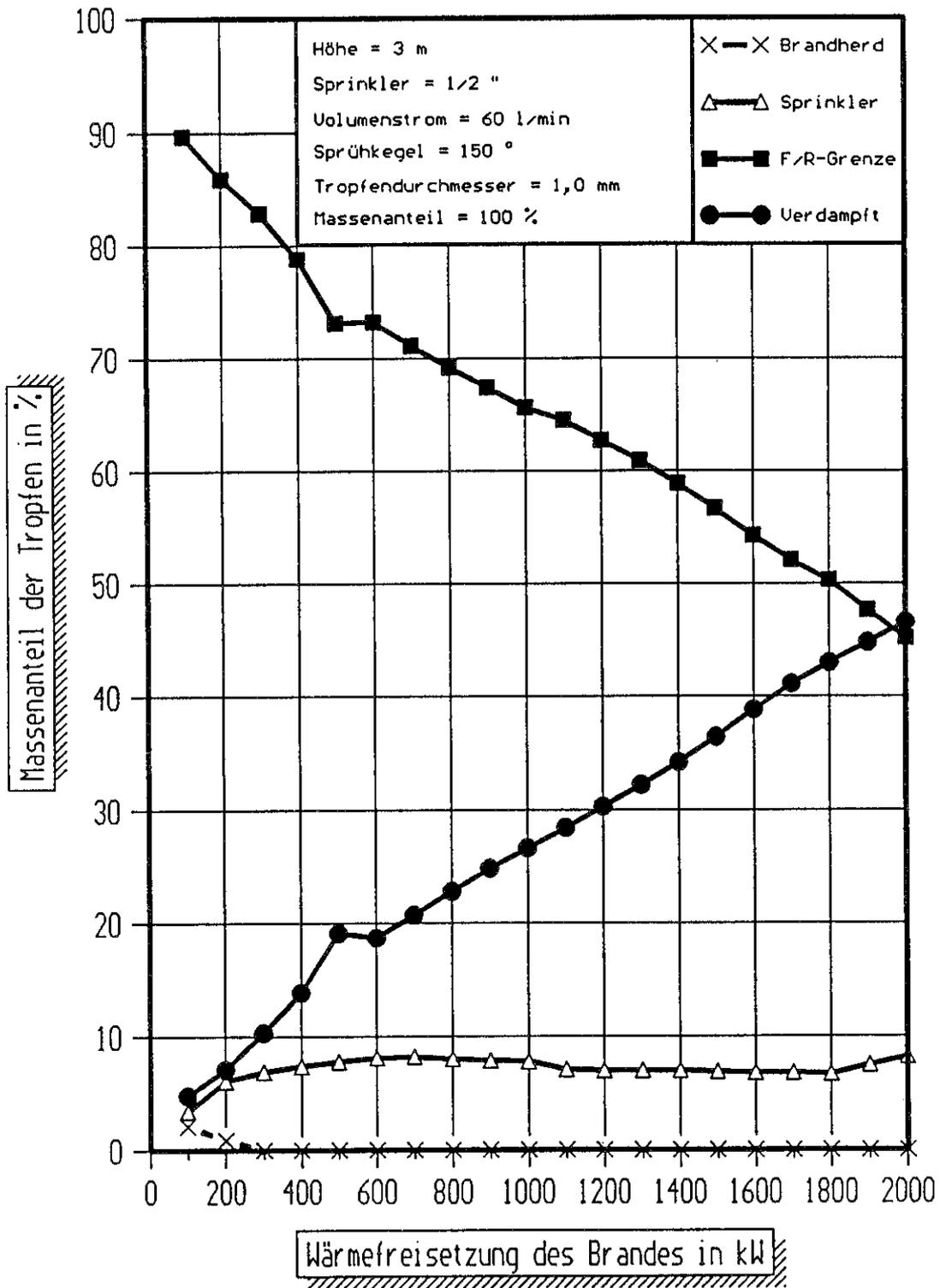


Bild 46 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

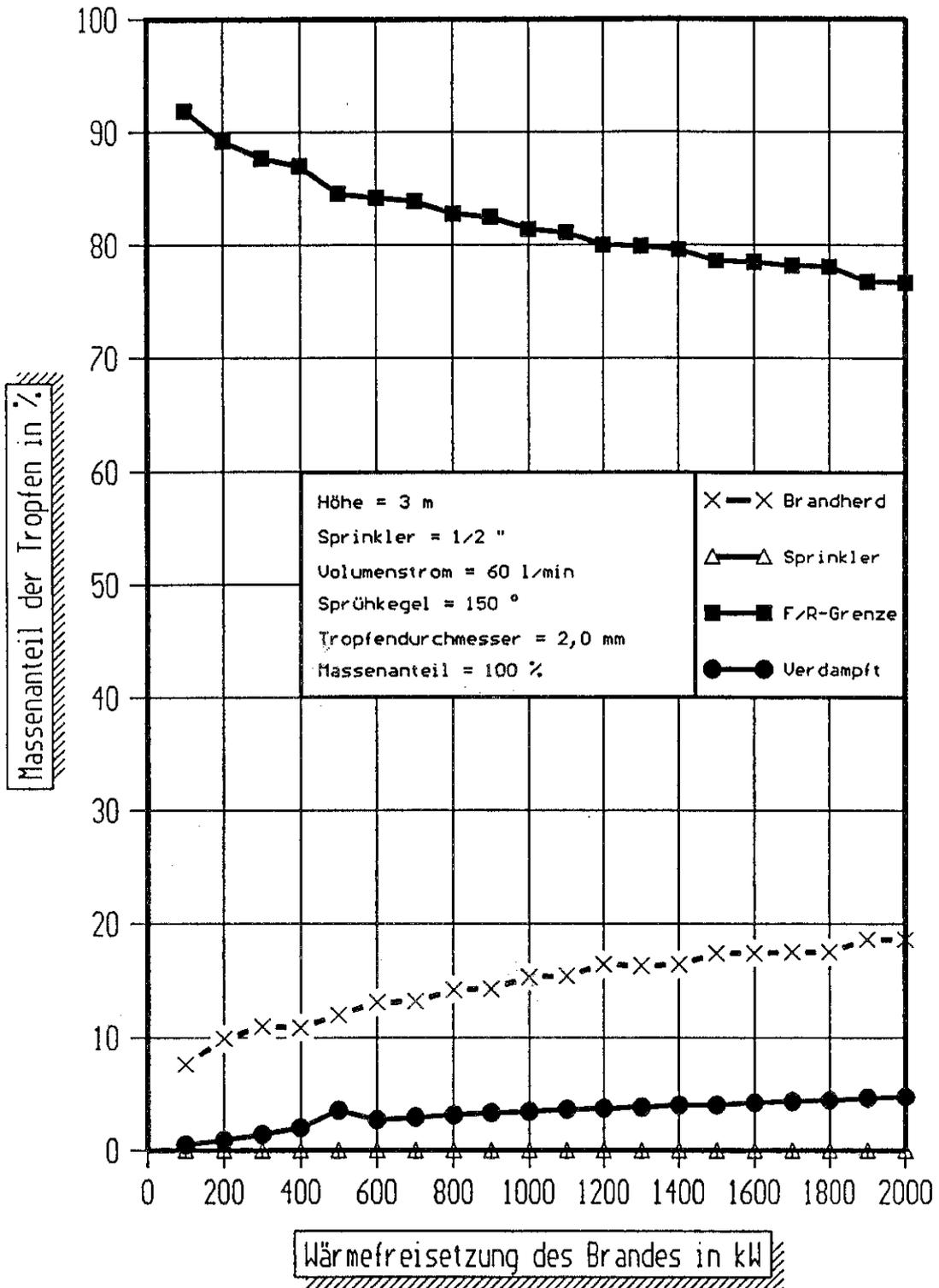


Bild 47 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

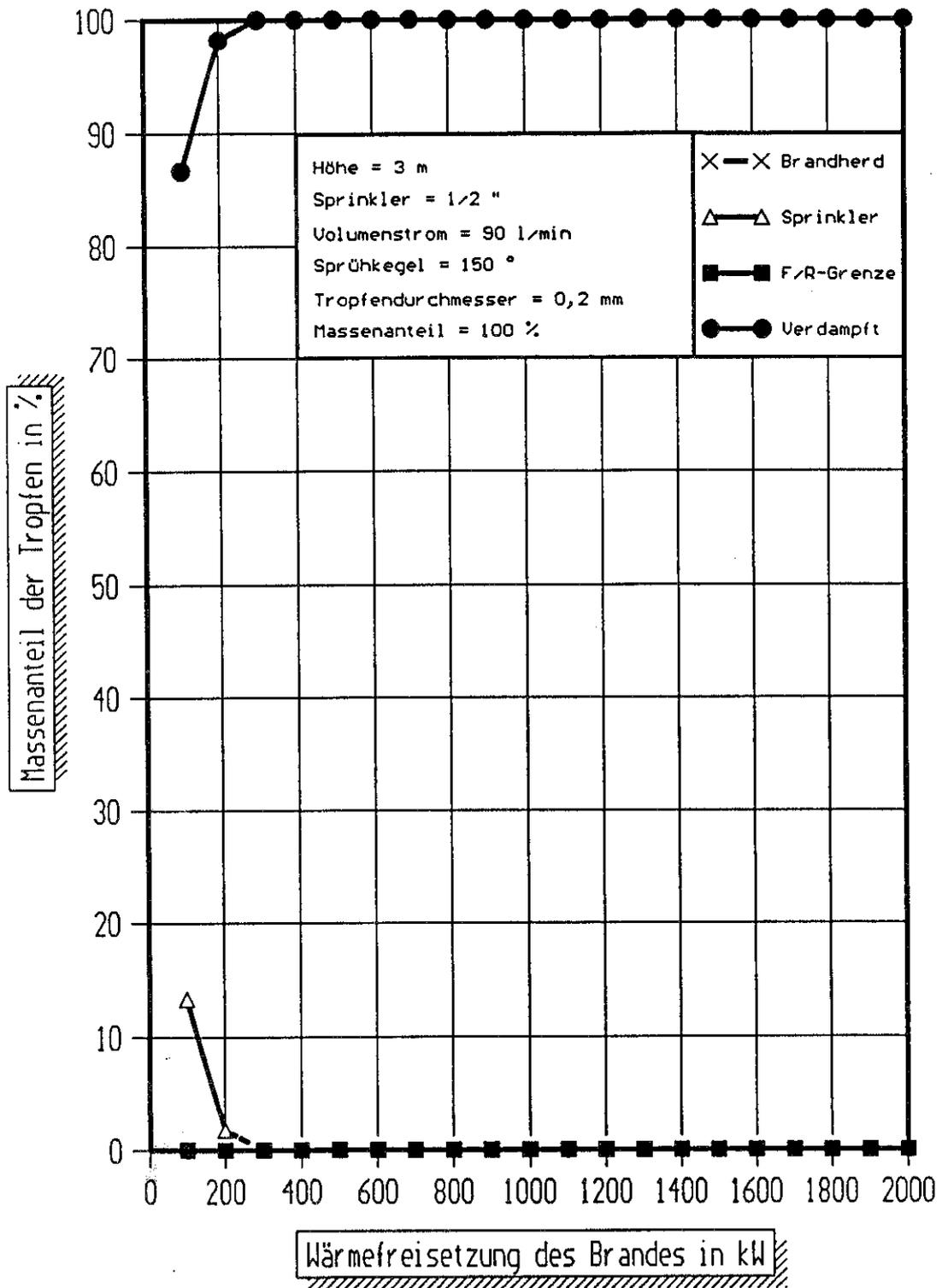


Bild 48 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

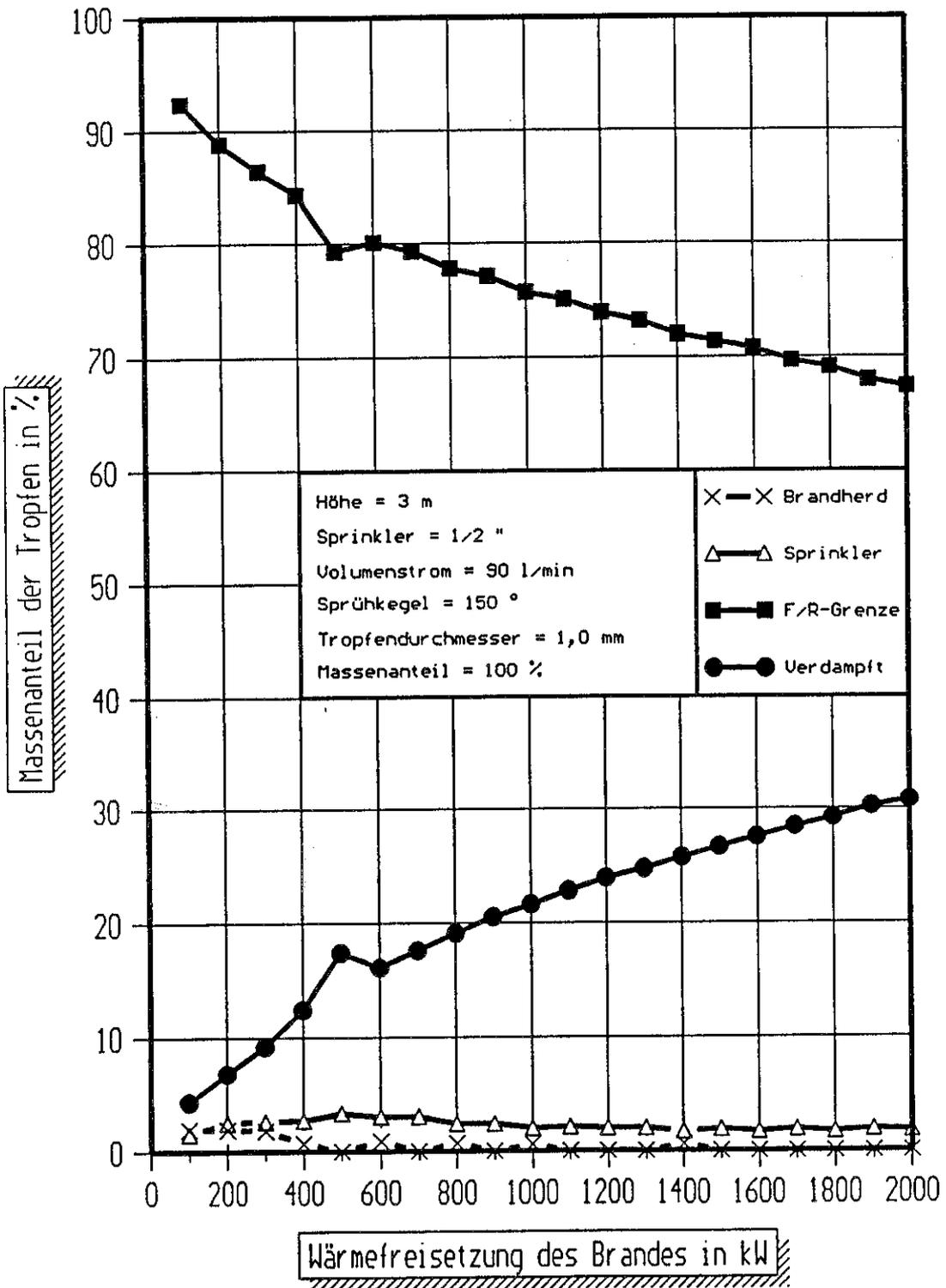


Bild 49 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

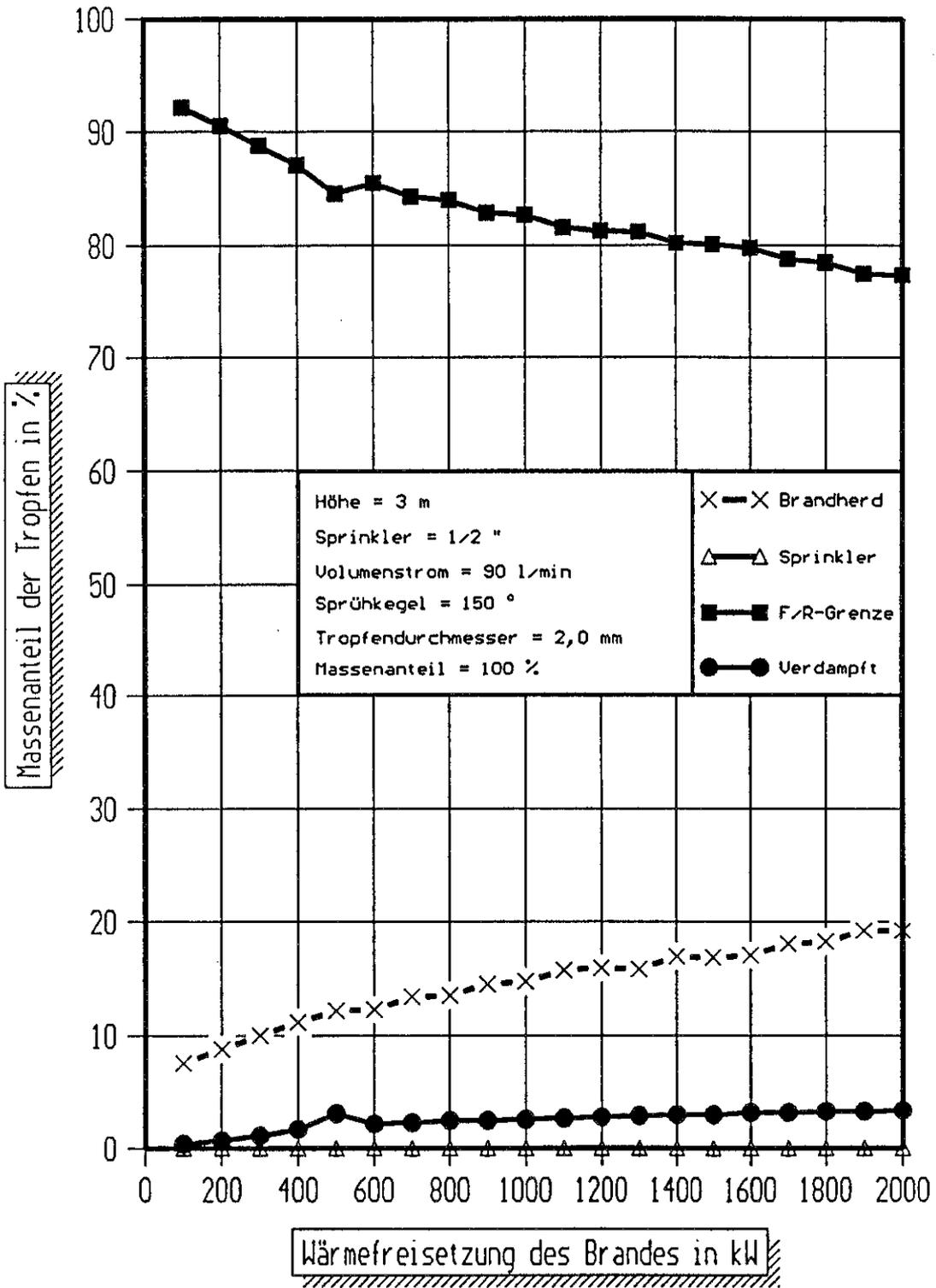


Bild 50 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

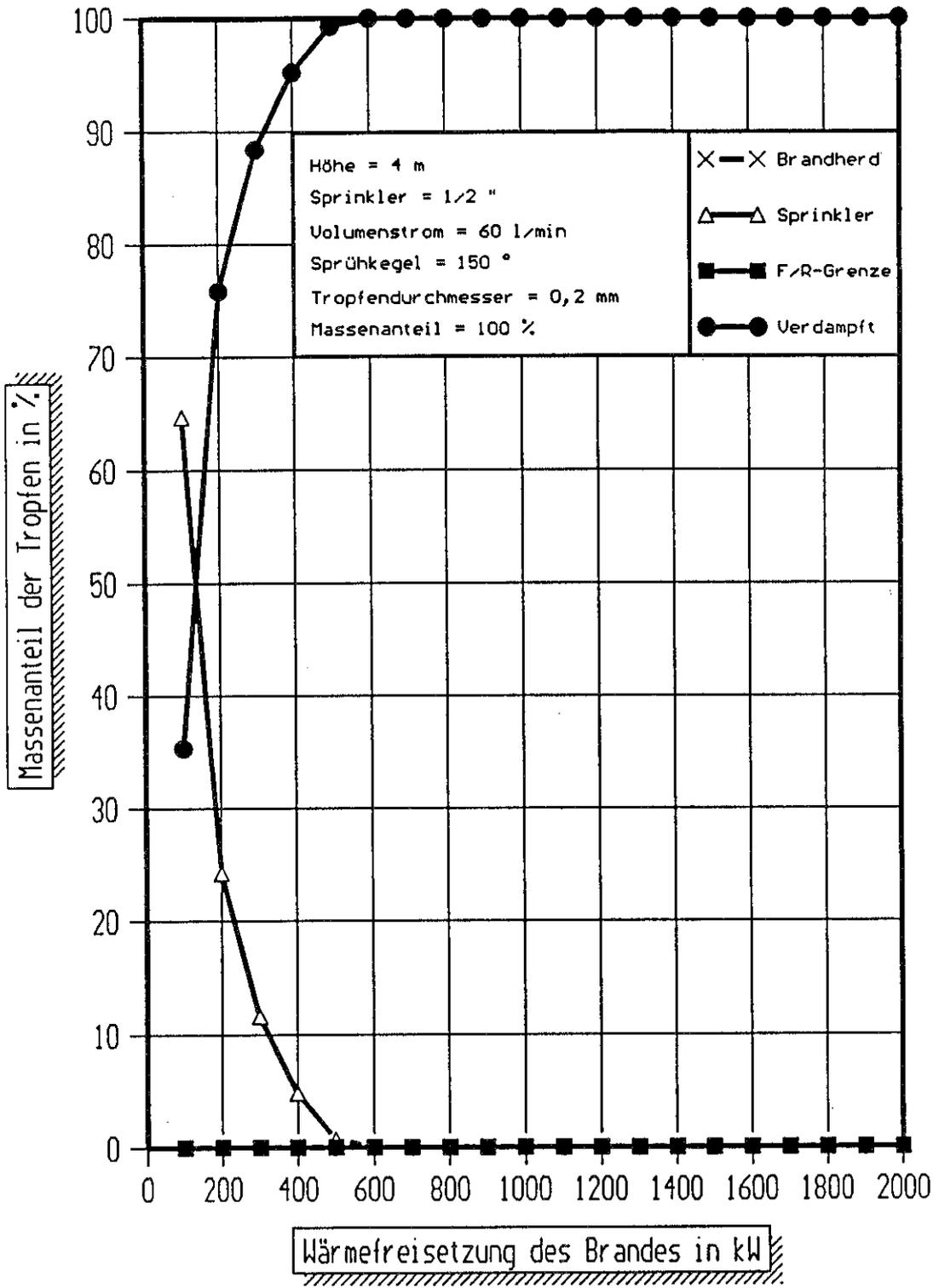


Bild 51 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

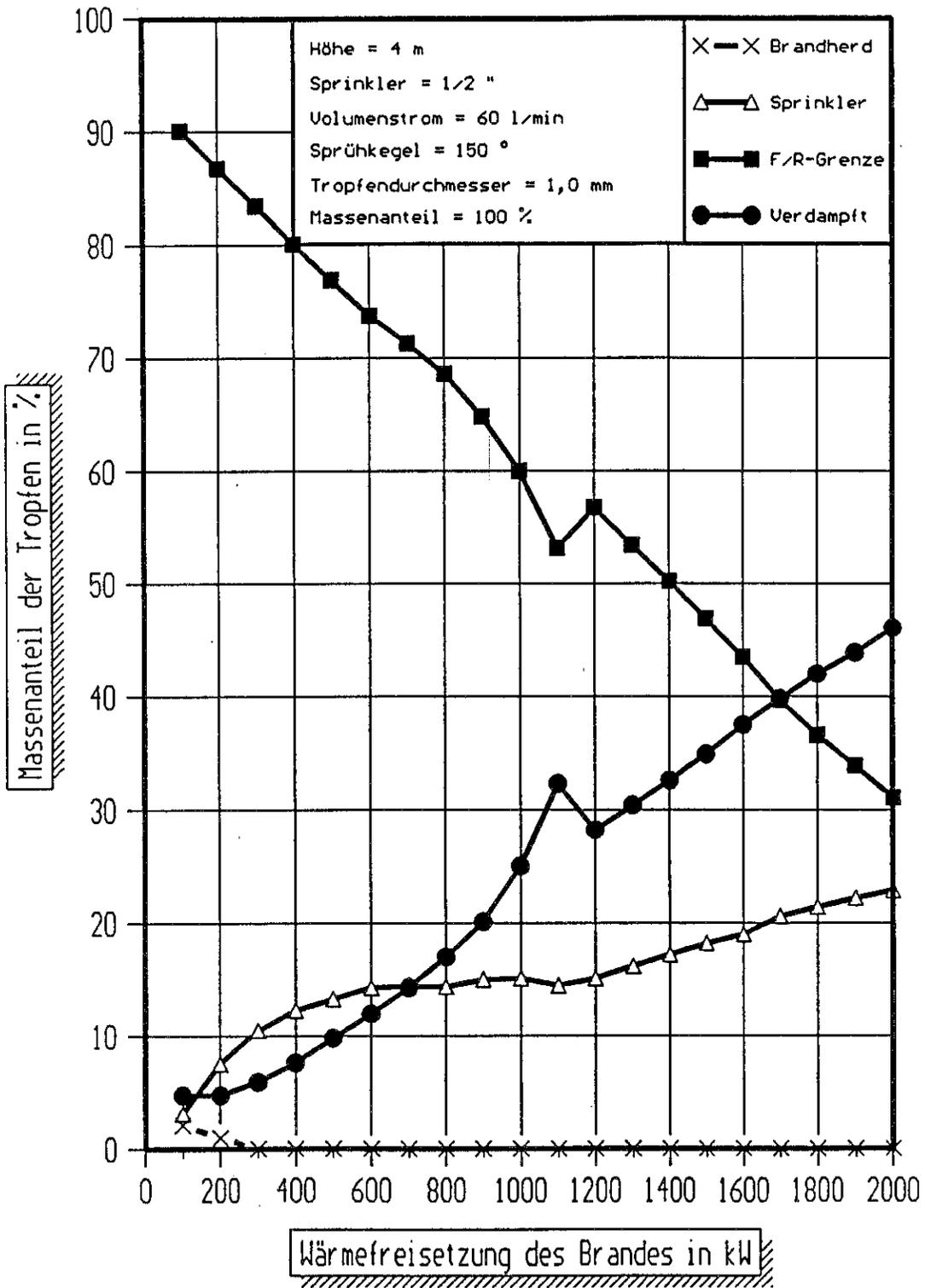


Bild 52 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

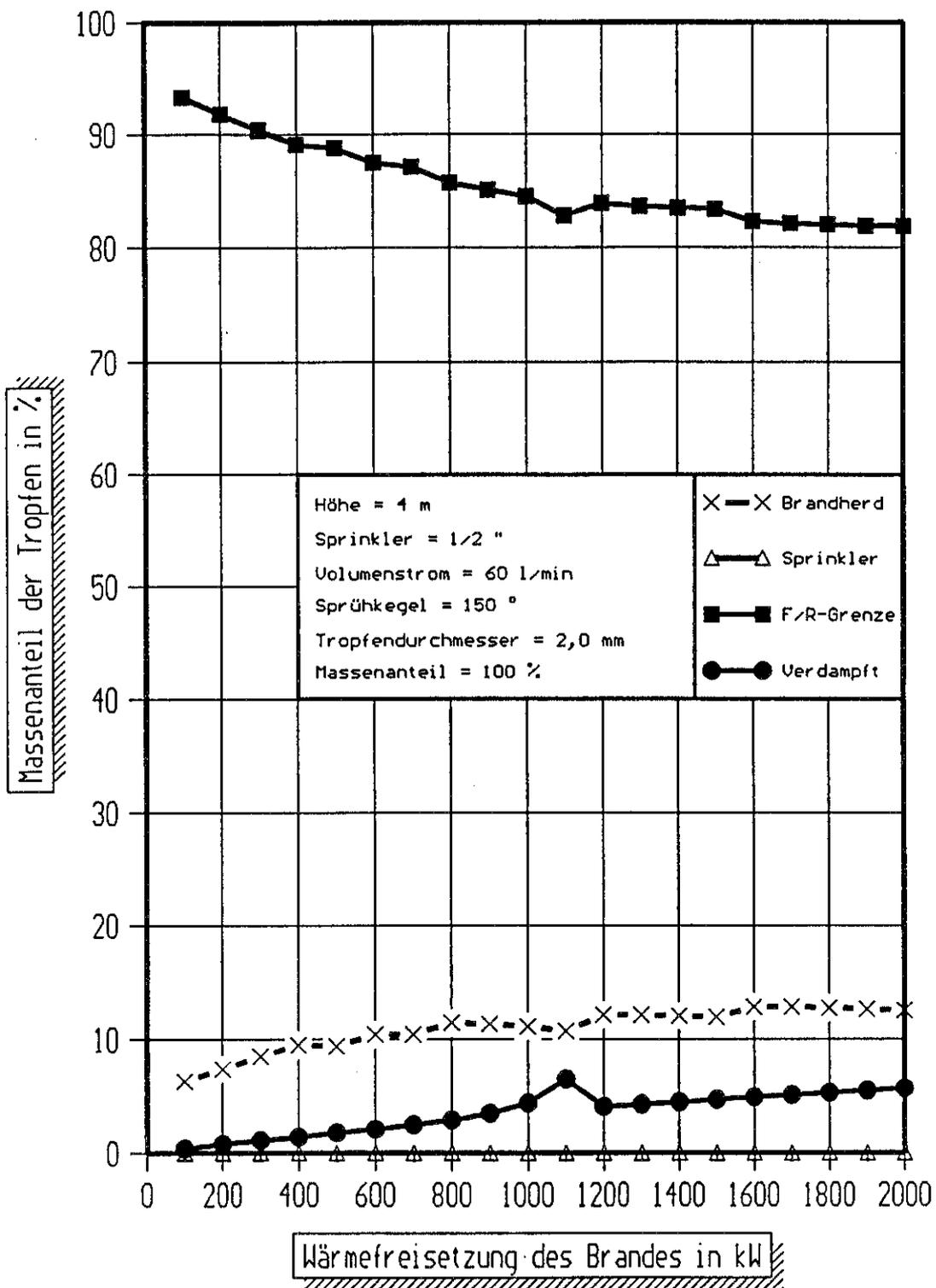


Bild 53 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 60 l/min nach /19/.

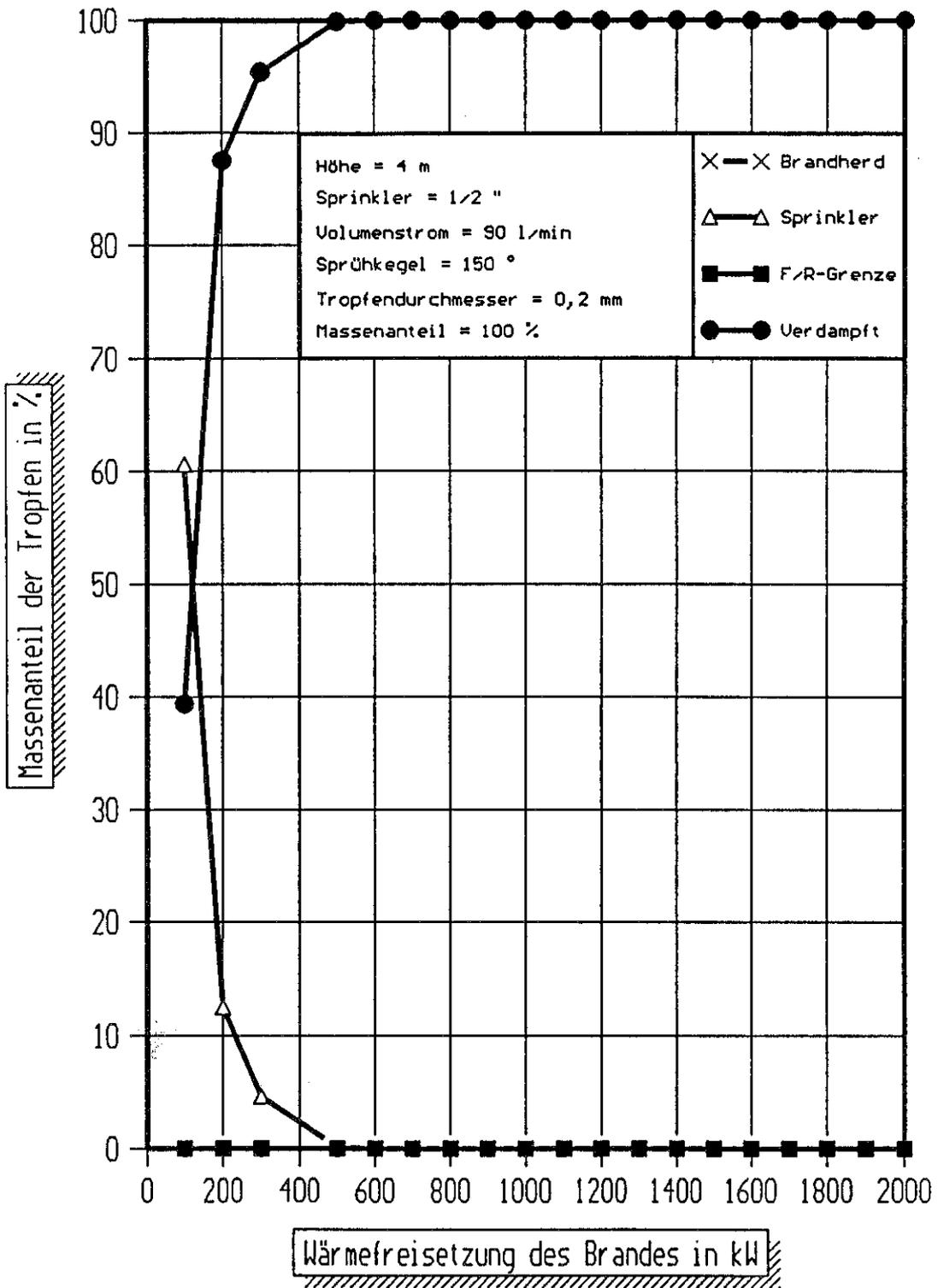


Bild 54 Tropfenbilanz von 0,2 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

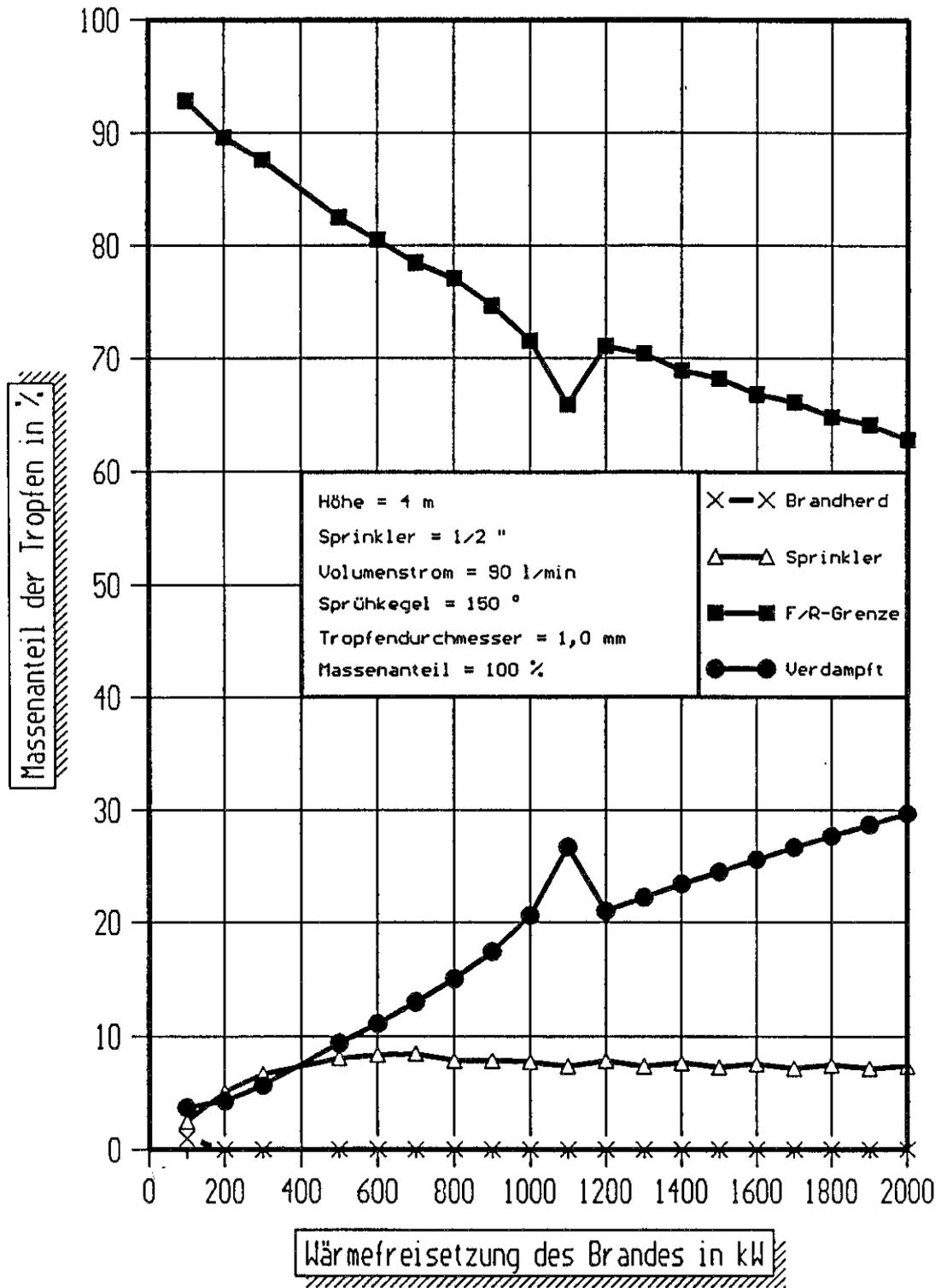


Bild 55 Tropfenbilanz von 1,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

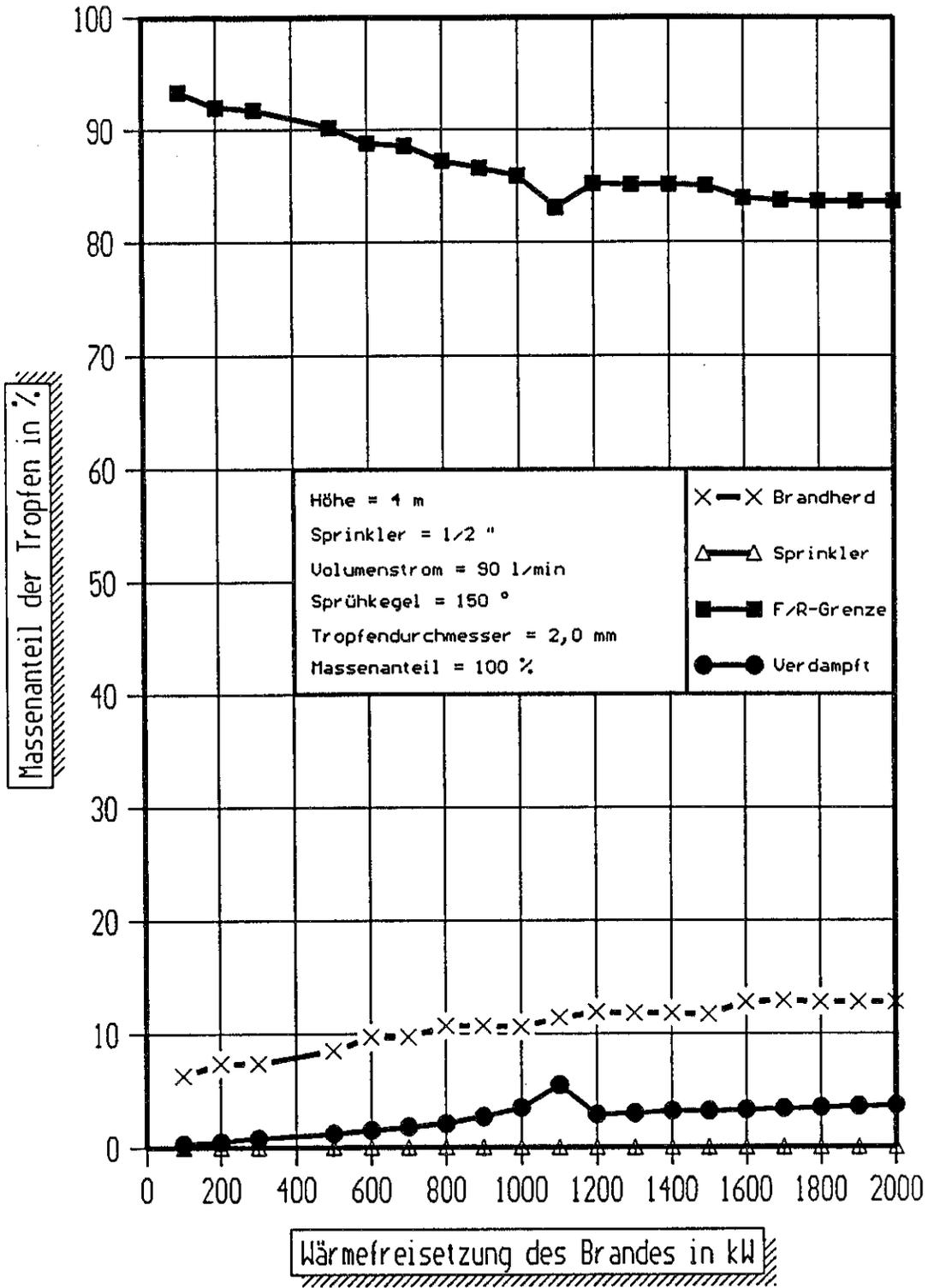


Bild 56 Tropfenbilanz von 2,0 mm-Tropfen bei einer Höhe von 4 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.

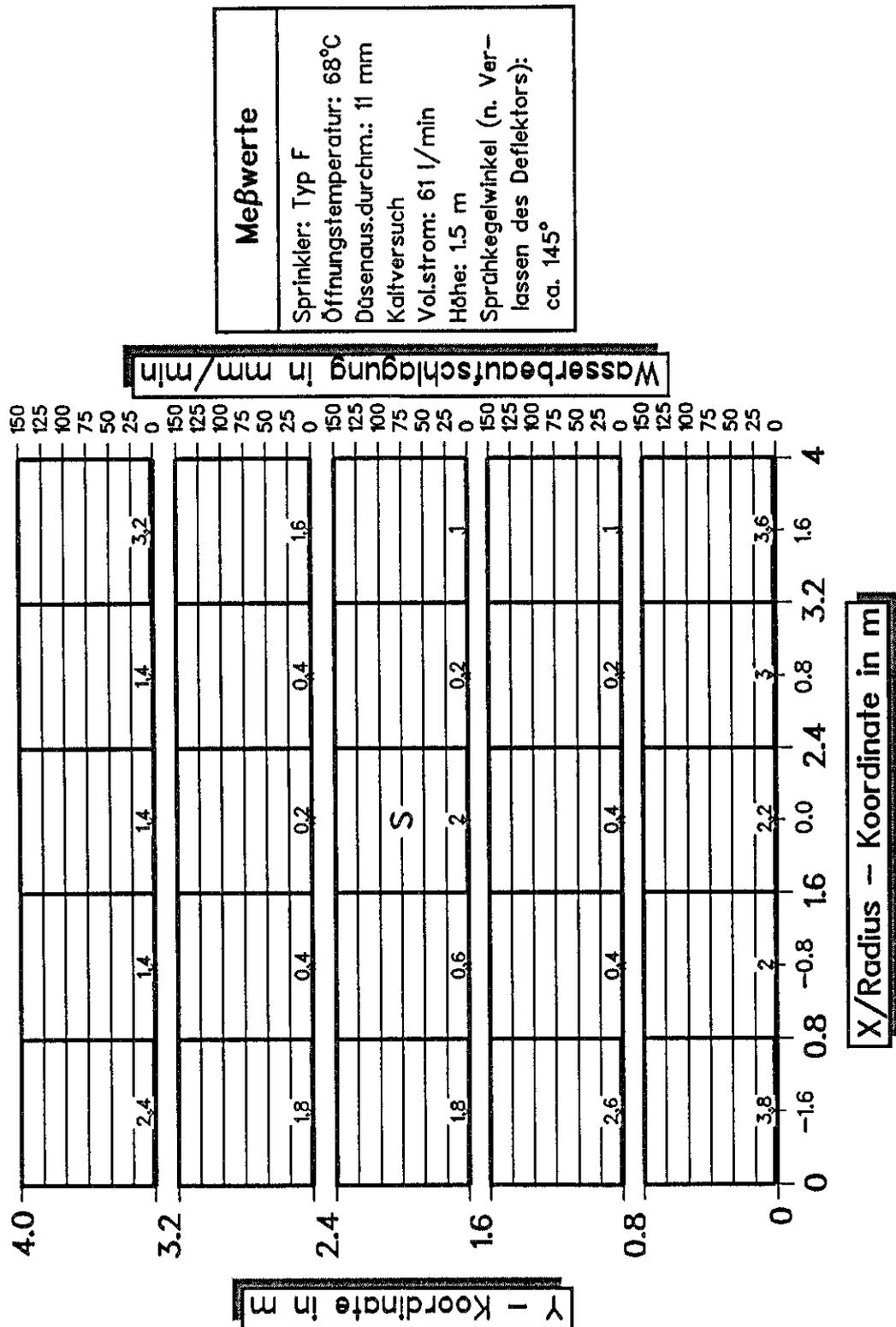


Bild 57 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min nach /20/.

Numerische Simulation
Sprinkler: Typ F Öffnungstemperatur: 68°C Düsenaus.durchm.: 11 mm Kaltversuch Vol.str.: 61 l/min gesamt Höhe: 1.5 m
Austrittsprühwinkel: 180° Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145° Tropfenspektrum f. Simul.: Monoschwarm mit Sauter-D.: 1.254 mm Sprühvollkegel Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %: Winkelber. (1/2 Kegel): 1: 0° - 9°: 10% 2: 10° - 90°: 99.7% 3: ---

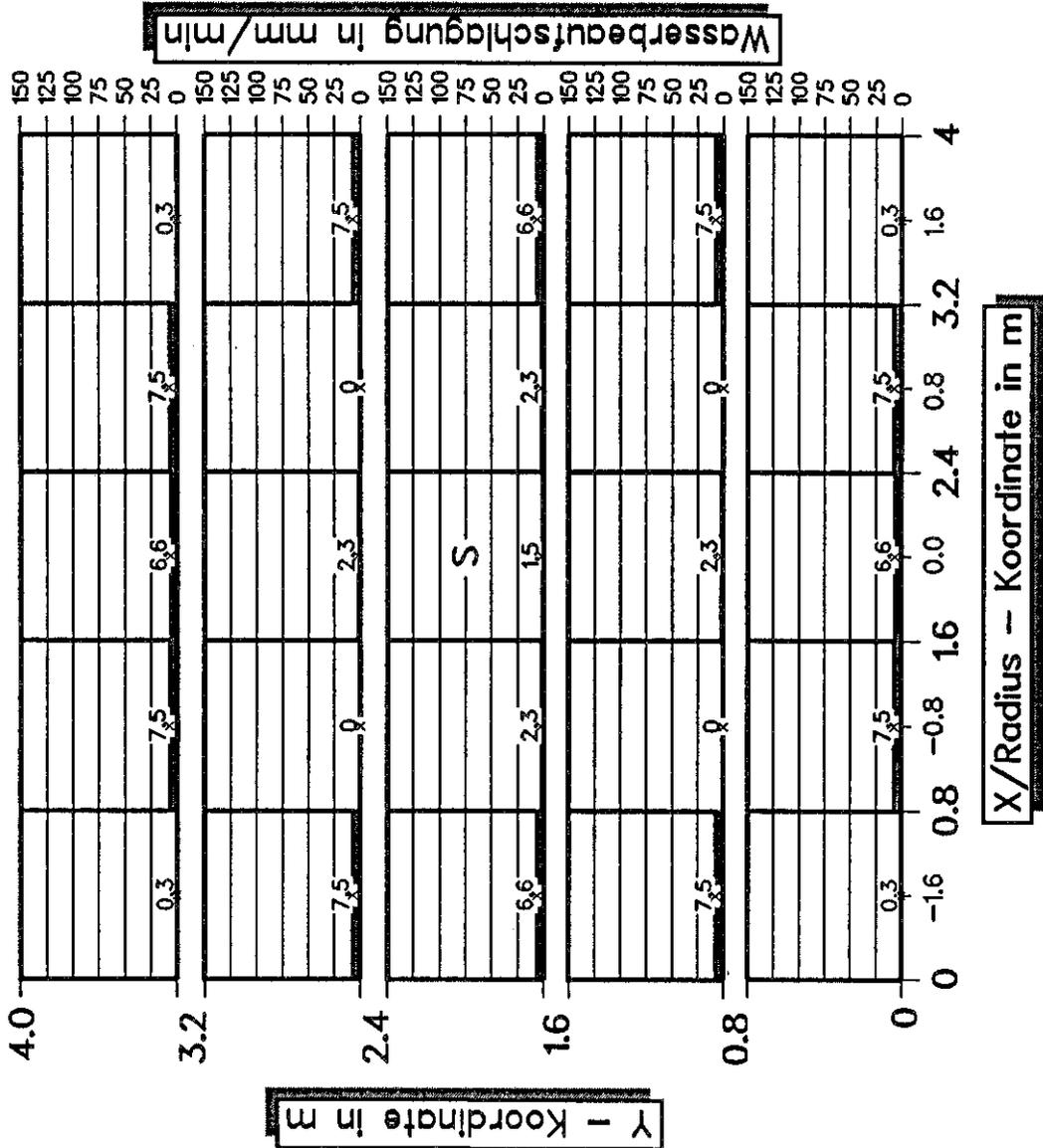


Bild 58 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm) nach /20/.

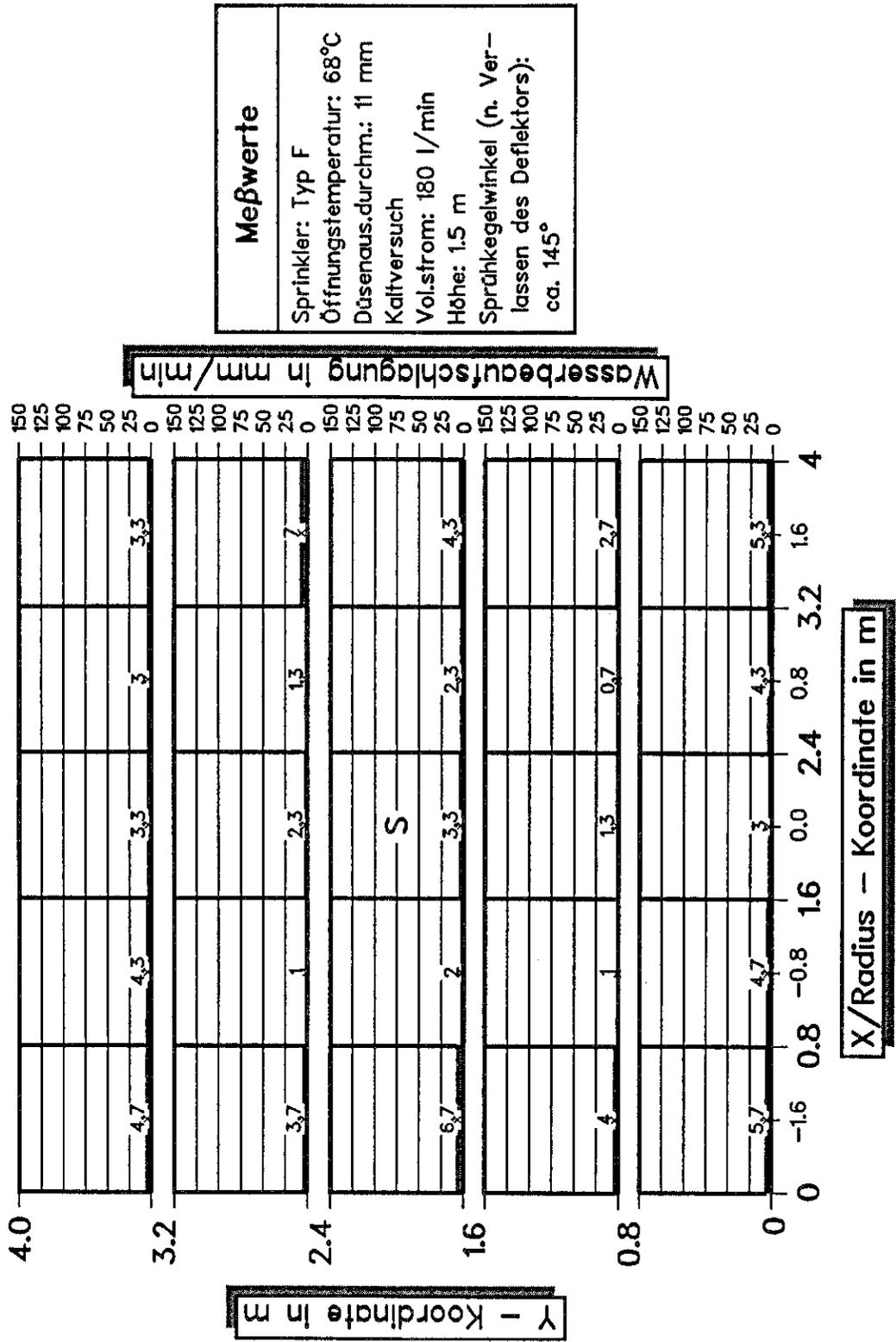


Bild 59 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min nach /20/.

Numerische Simulation
Sprinkler: Typ F Öffnungstemperatur: 68°C Düsenaus.durchm.: 11 mm Kaltversuch Vol.str.: 180 l/min gesamt Höhe: 1.5 m Austrittsprühwinkel: 180° Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145° Tropfenspektrum f. Simuli.: Monoschwarm mit Sauter-D.: 0.346 mm Sprühvollkegel Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %: Winkelber. (1/2 Kegel): 1: 0° - 9°: 10% 2: 10° - 90°: 99.7% 3: ---

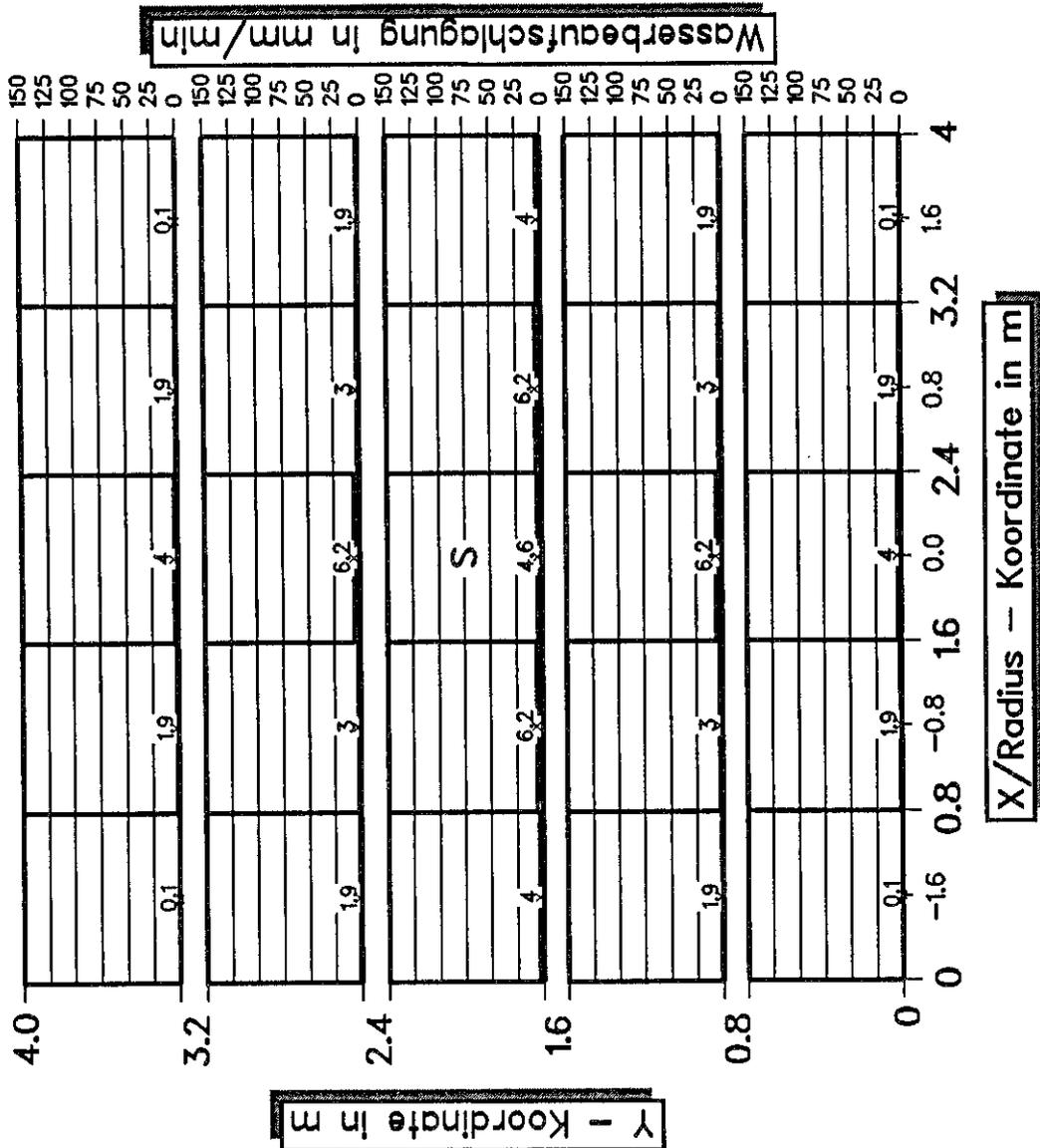


Bild 60 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm) nach /20/.

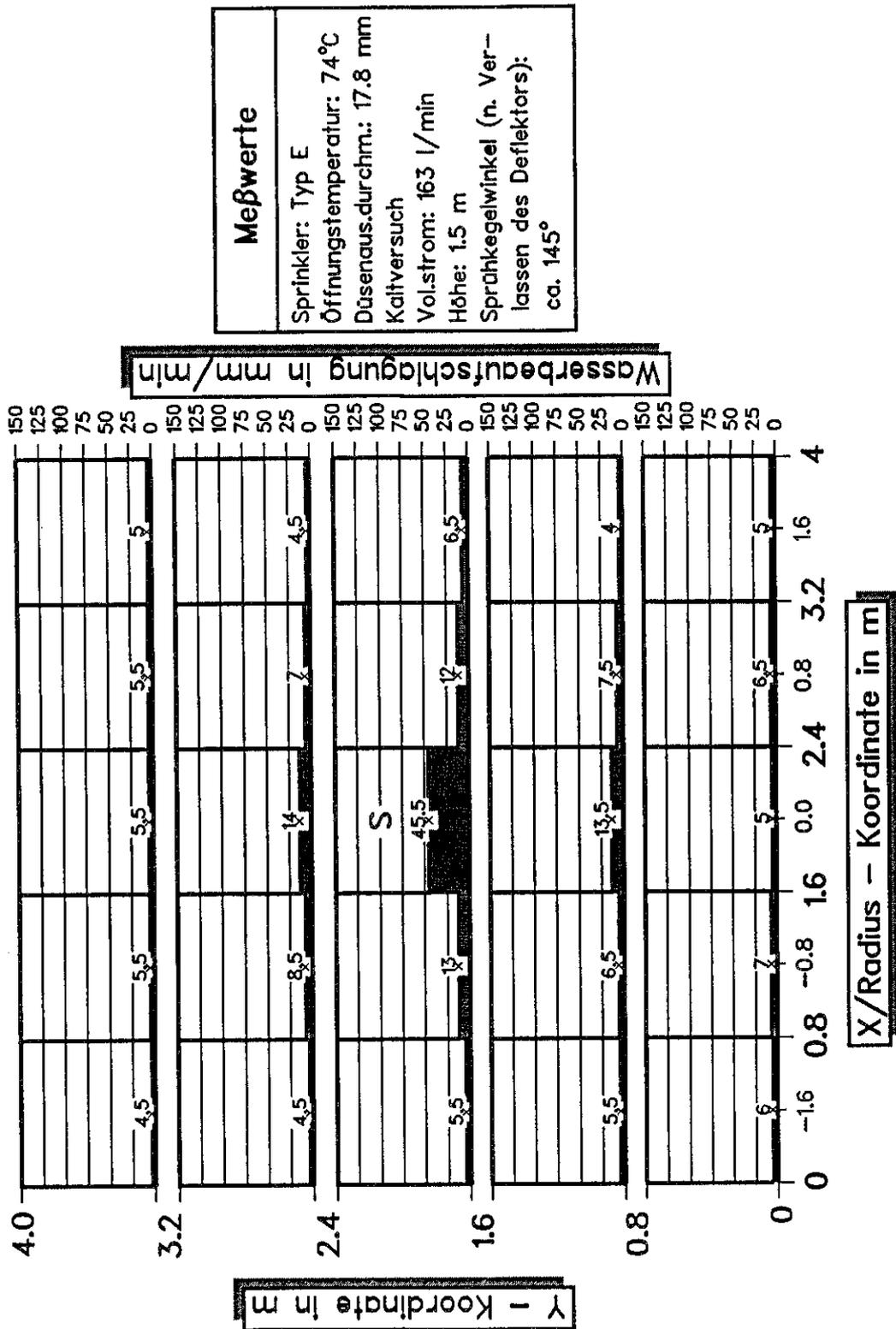


Bild 61 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min nach /20/.

Numerische Simulation
Sprinkler: Typ E Öffnungstemperatur: 74°C Düsenaus.durchm.: 17.8 mm Kaltversuch Vol.str.: 163 l/min gesamt Höhe: 1.5 m
Austrittsprühwinkel: 180° Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145° Tropfenspektrum f. Simul.: Monoschwarm mit Sauter-D.: 1.015 mm Sprühvollkegel Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %: Winkelber. (1/2 Kegel): 1: 0° - 15°: 0% 2: 16° - 30°: 50% 3: 31° - 90°: 10%

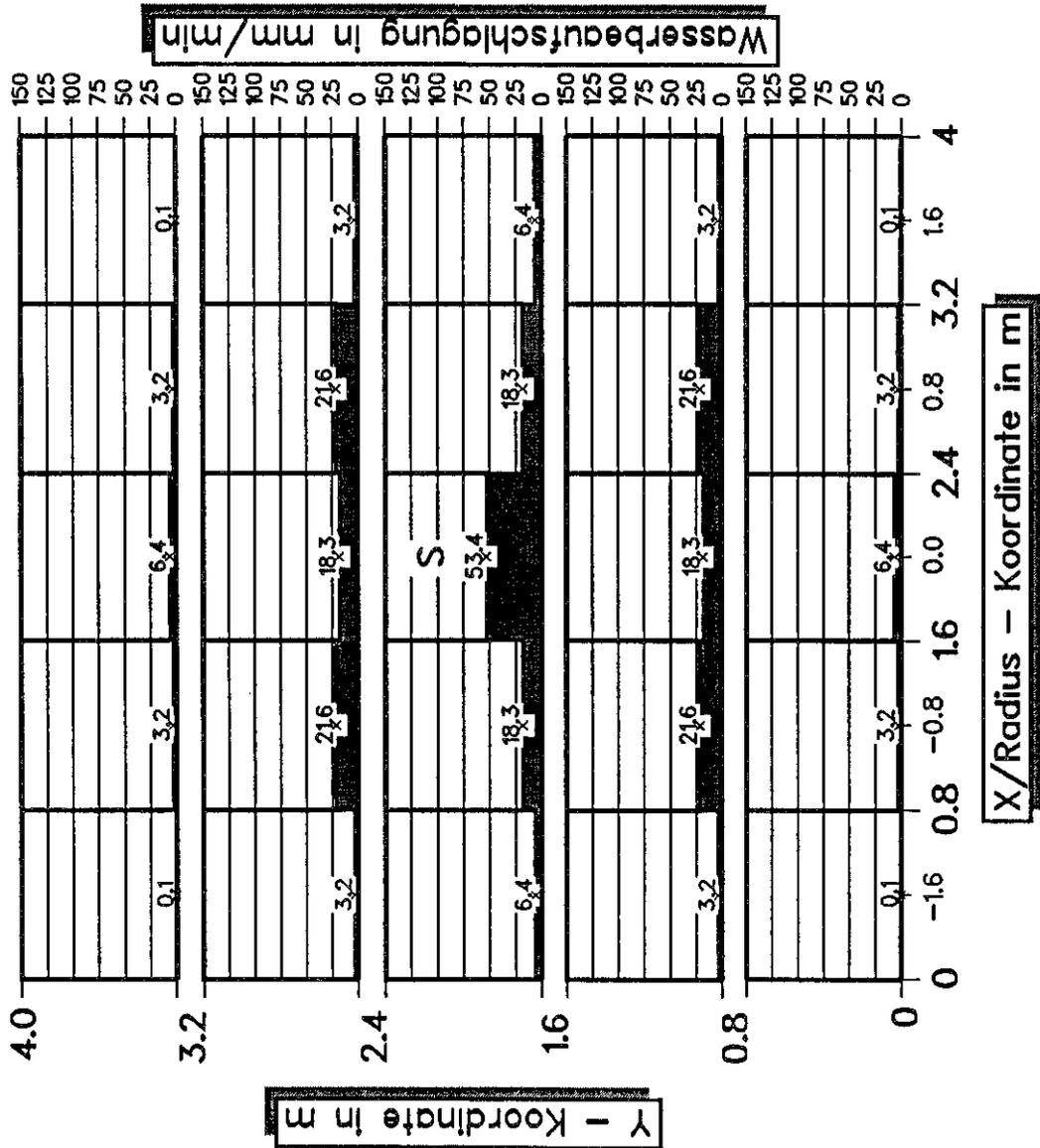


Bild 62 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm) nach /20/.

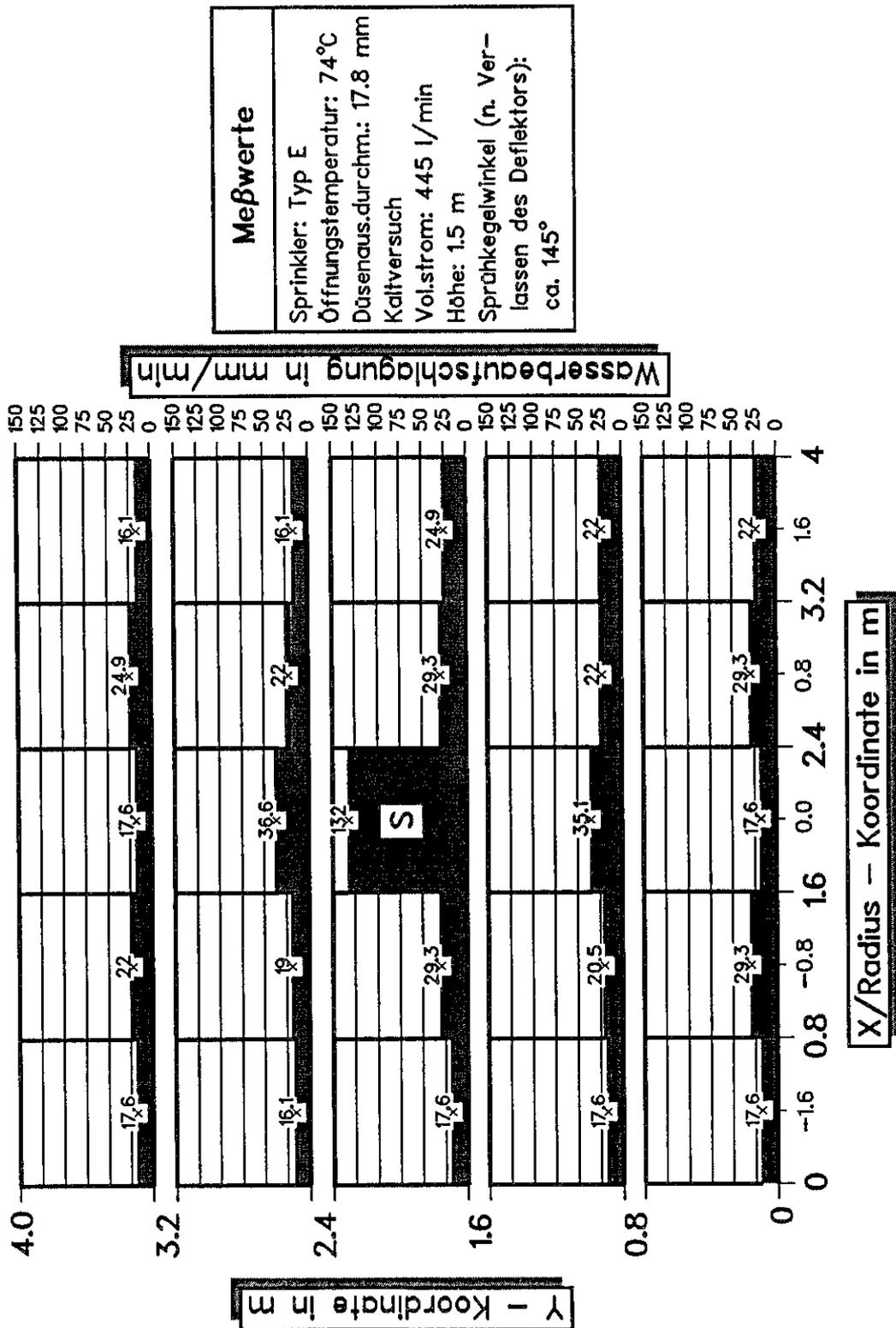


Bild 63 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min nach /20/.

Numerische Simulation	
Sprinkler: Typ E	
Öffnungstemperatur: 74°C	
Düsenaus.durchm.: 17.8 mm	
Kaltversuch	
Vol.str.: 445 l/min gesamt	
Höhe: 1.5 m	
Austrittsprühwinkel: 180°	
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145°	
Tropfenspektrum f. Simul.: Monoschwarm mit Sauter-D.: 0.452 mm	
Sprühvollkegel	
Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %:	
Winkelber. (1/2 Kegel):	
1: 0° - 15°: 0%	
2: 16° - 30°: 50%	
3: 31° - 90°: 10%	

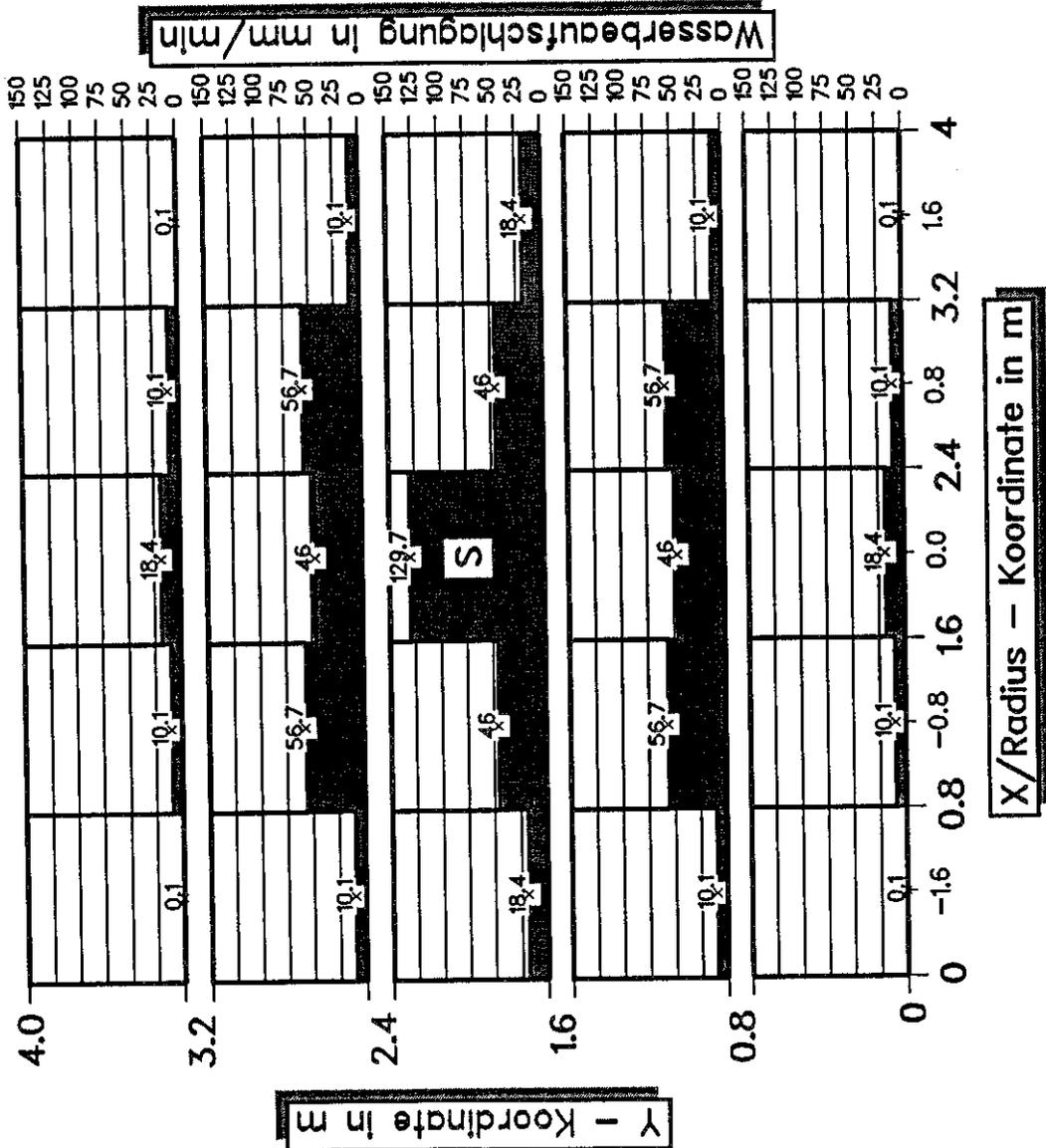


Bild 64 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm) nach /20/.

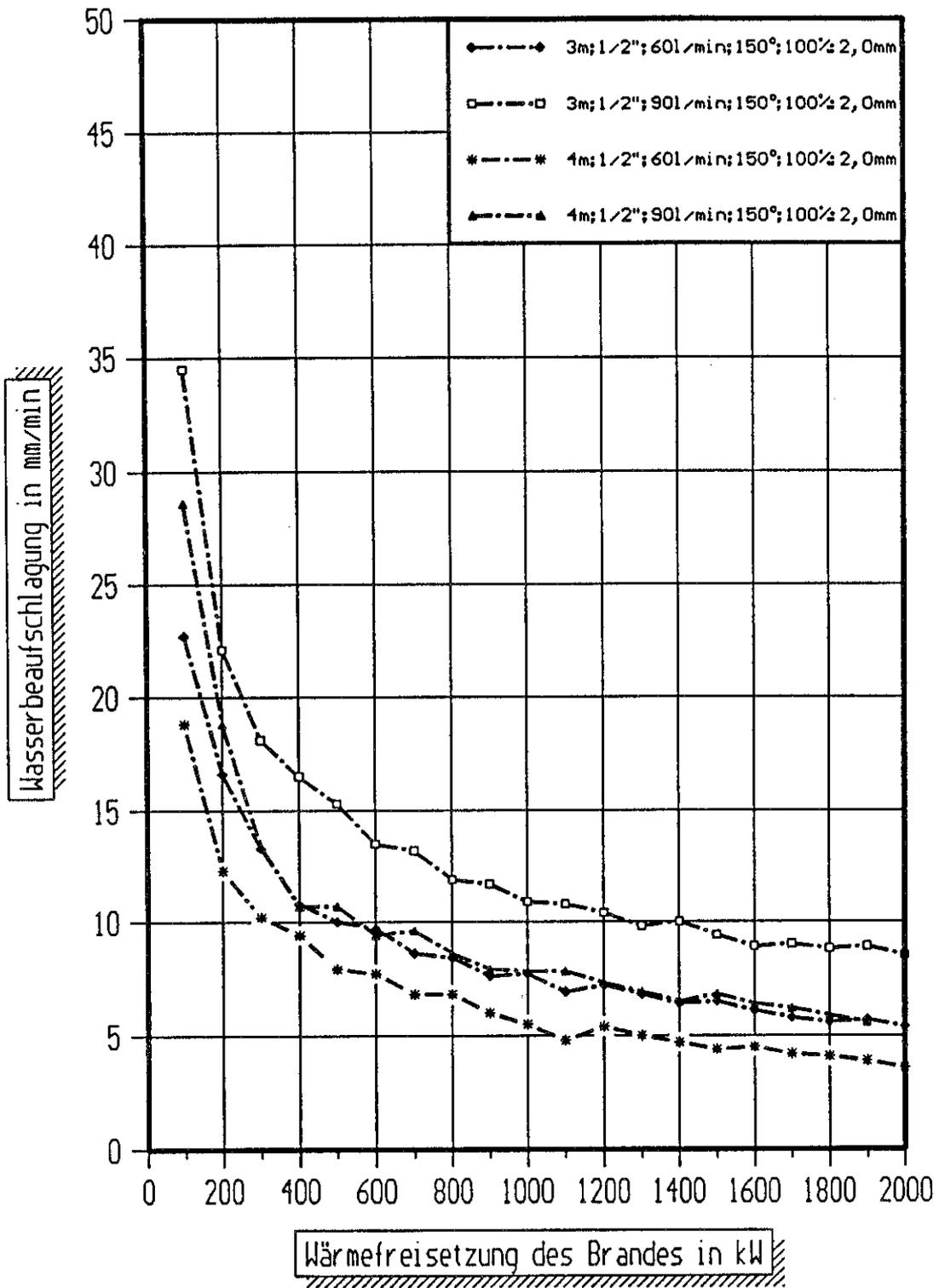


Bild 65 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd bei 2 verschiedenen Volumenströmen und 2 verschiedenen Höhen zwischen Sprinkler und Brandherd für den Tropfendurchmesser 2,0 mm nach /19/.

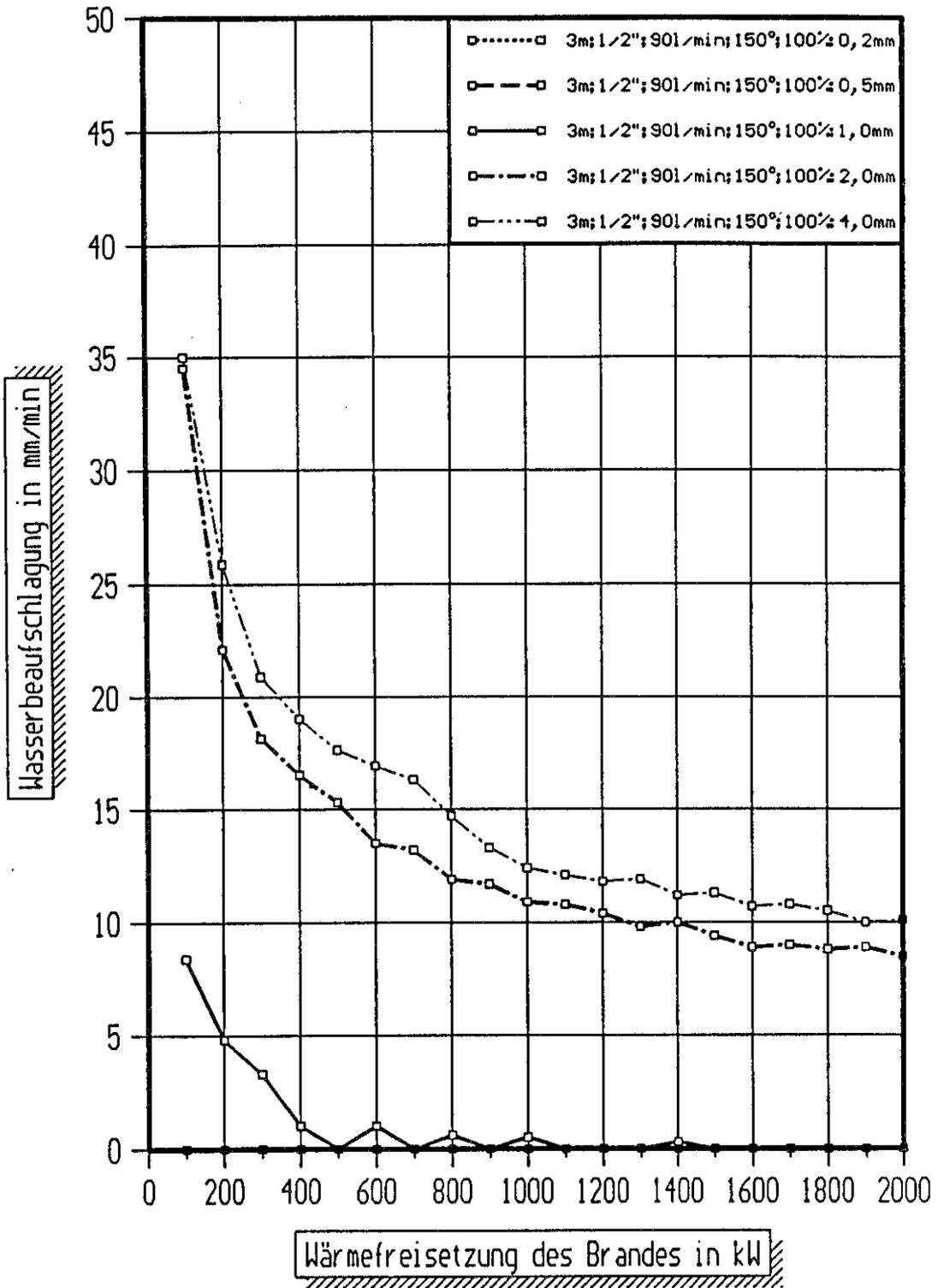


Bild 66 Vergleich der Wasserbeaufschlagungen am Brandherd für verschiedene Tropfendurchmesser bei einer Höhe von 3 m und einem Volumenstrom von 90 l/min nach /19/.