# BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG

## DER BUNDESLÄNDER

## BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 6: Großbrandversuche 5

72

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

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

Forschungsbericht Nr. 72

# Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 6: Großbrandversuche 5

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1989

FA.Nr. 123 (3/88)

INHALTSVERZEICHNIS


| | | Seite |
|---|---|---|
| | FORMELZEICHEN | 1 |
| 1. | EINLEITUNG | 3 |
| 2. | VERSUCHSPROGRAMM | 4 |
| 3. | VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK | 6 |
| 4. | VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN | 8 |
| 5. | MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE | 11 |
| 6. | ZUSAMMENFASSUNG | 24 |
| 7. | LITERATURVERZEICHNIS | 26 |
| 8. | TABELLEN UND BILDER | 30 |

FORMELZEICHEN

| | |
|---|---|
| $a$ | Regressionskoeffizient |
| $b$ | Regressionskoeffizient |
| Bl | Blocklager |
| $dt$ | differentielles Zeitelement |
| $dz_b$ | differentielles Wegelement in vertikaler Richtung |
| HL | Stapelbezeichnung s. Bild 1 |
| HR | " |
| $H_u$ | Heizwert in MJ/kg |
| $\bar{H}_u$ | gewichteter Heizwert in MJ/kg |
| L | Abstand zwischen den Lagersäulen in m |
| $L_A$ | Abstand zwischen Lagersäule und Lagerattrappe |
| $M(t)$ | Masse in kg zum Zeitpunkt t |
| $-\dot{M}$ | zeitlicher Massenverlust in kg/min |
| $-\ddot{M}$ | Brandentwicklung in $kg/min^2$ |
| $M_a$ | Anfangsmasse in kg |
| $\Delta M$ | Abbrandmasse in kg |
| $\Delta M_0$ | 1 kg Abbrandmasse zum Zeitpunkt $t_0$ |
| $P_i$ | Teilmasse eines Stoffes im Brandgut in kg |
| $p_i$ | Massenanteil eines Stoffes im Brandgut |
| $\dot{Q}$ | Wärmestrom in kW |
| $\dot{Q}_f$ | Fühlbarer Wärmestrom in kW |
| $\dot{q}$ | Wärmestromdichte in $W/cm^2$ |
| $R^2$ | Determinationskoeffizient |
| S | Position des Sprinklers |
| t | Versuchszeit in min |
| $t_0$ | Zeitpunkt, bei dem $\Delta M_0 = 1$ kg |
| $T_m$ | Maximale Brandtemperatur in °C |
| v | Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min |
| VL | Stapelbezeichnung s. Bild 1 |
| VR | " |
| Z | Position der Zündquelle |
| $z_b$ | Höhe, die die Flammenwurzel an dem durch die Zündquelle gezündeten Lagerstapel (VL) erreicht hat in m |
| $z_g$ | Höhe, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel (VR, HL, |

oder HR) zündet in m

Indizes

| | |
|---|---|
| Bl | Blocklager |
| HW | Holzwolle |
| HL | Stapelbezeichnung s. Bild 1 |
| HR | " |
| PS | Polystyrol |
| 2 | 2 Gitterboxenstapel |
| 3 | 3 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel |
| 5 | 5 Kartons pro Gitterbox, 4 Gitterboxenstapel |
| I | Flammenausbreitung auf der Wellpappeoberfläche |
| II | Volumetrische Brandausbreitung |
| VL | Stapelbezeichnung s. Bild 1 |
| VR | " |

# 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 bei gestapelten brennbaren Stoffen. Dies erwies sich als notwendig, da Brände im Lagerbereich aufgrund der zunehmenden Wertekonzentration und der Verwendung von Materialien mit erhöhtem Brandrisiko zu hohen Schäden führen, wenn Brandmeldung und -bekämpfung nicht rechtzeitig erfolgen.

Dabei sollen die Brandausbreitungsvorgänge, insbesondere die Geschwindigkeit der Brandausbreitung in Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften, der räumlichen Zuordnung der Stoffe zueinander, der Lage und Größe der Zündquelle sowie der baulichen Umgebung untersucht werden, da hiervon auch die Planung von selbsttätigen ortsfesten Löschanlagen und von Brandmeldeanlagen für Lagergebäude beeinflußt wird.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßten sich bezüglich der Brandausbreitung mit einer Literaturauswertung des in- und ausländischen Schriftums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4,5/. Der zugehörige Löscheinsatz wurde in den Arbeiten von Schatz /6,7,8,9,10,11/ untersucht.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Als vorläufig letzte Versuchsserie eines mehrjährigen Forschungsprogrammes wurde der bisherige Lageraufbau derart modifiziert, daß der horizontale Abstand zwischen vier in der Ebene angeordneten Gitterboxenstapeln variiert wurde. Dieser Versuchsserie gingen drei bezüglich der Größe und der Anordnung der Brandlast aufbauende Versuchsserien voraus. Hierbei wurden zwei parallel aufgestellte Lagerattrappen mit einlagiger Wellpappe /4/, zwei parallele Blocklagersäulen /4/ sowie zwei parallele Gitterboxensäulen /5/ mit eingelagerter Brandlast untersucht.

In Ergänzung hierzu wurden Blocklagerversuche mit vergleichbarer Brandlast durchgeführt, um den Einfluß von Gitterboxen auf die Brandausbreitung zu untersuchen und um Erkenntnisse bezüglich des unterschiedlichen Gefährdungspotentials insbesondere beim Zusammmenfallen des Blocklagers im Brandfall zu gewinnen. In /5/ wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Regallagerkonstruktion meßtechnisch den Vorteil aufweist, 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. Hierdurch wird ein korrektes Meßergebnis gewährleistet.

Die Brandlast wurde gemäß den bisherigen Lagerbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gewählt, um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erzielen und um eine zu große Variationsbreite bei den Versuchsparametern zu vermeiden.
Es handelte sich um Kartons aus einlagiger Wellpappe mit den Abmessungen 58 cm * 37 cm * 34 cm, die als Lagergut einen leeren Stahlblechkanister mit einem Volumen von 30 l enthielten. Der zwischen dem Lagergut und der Wellpappe verbleibende Zwischenraum wurde mit zwei der am häufigsten verwendeten Stoßschutzmaterialien Holzwolle oder schwerentflammbarem Polystyrol-Partikelschaum ausgefüllt.

Die Größe und Position der Zündquelle nach Bild 1 wurde gemäß den Versuchen in /2/ und /3/ gewählt, um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erhalten.

## 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Für die Durchführung der Brandversuche im Realmaßstab wurde ein Versuchsstand in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet. Der prinzipielle Versuchsaufbau und die Abmessungen für den Regallageraufbau sind Bild 1.1 zu entnehmen.

Hierbei wurden je 4 Gitterboxen übereinandergestapelt und vier dieser Stapel auf einer Abbrandwaage mit den Grundflächenabmessungen 4m * 4m aufgestellt. Die Abbrandwaage bestand aus einer Trägerkonstruktion, einer Gitterauflage sowie 4 Wägezellen. Jede Gitterbox wurde mit 3 bzw. 5 Kartons der in Abschnitt 2 beschriebenen Brandlast befüllt, was eine Anzahl von 48 bzw. 80 Stück pro Lagerstapel ergab. In Tabelle 1 finden sich nähere Angaben zur Brandlast und Zündquelle, wobei zusätzlich der jeweilige Heizwert $H_u$ der Einzelkomponenten angegeben wird.

Parallel zum vorderen linken Stapel wurde im Gitterboxenabstand eine Lagerattrappe aufgestellt, welche bereits bei den Versuchen in /4/ 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 Wärmestromdichte (Strahlung und Konvektion), die an einem benachbarten Stapel auftritt, zu erfassen. 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 bei Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur der Aufnehmer entfernt werden konnte.

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

Bild 1.2 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau eines mit dem Regallager vergleichbaren Blocklagers mit 80 Kartons. Gleichzeitig wurden Versuche mit 48 Kartons durchgeführt. Auf diese wird jedoch hier nicht eingegangen.

Die Meßtechnik umfaßte die Messung zeitlicher Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen sowie der an der Lagerattrappe auftretenden Wärmestromes mittels Wärmeflußaufnehmern. Die Meßstellen sind den Bildern 1.1 und 1.2 zu entnehmen. Bei den Blocklagerversuchen wurde auf die Lagerattrappe verzichtet, um die Wärmeflußaufnehmer durch das Zusammenfallen des Lagers im fortgeschrittenen Brandstadium nicht zu gefährden. Gleichzeitig wurde der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse registriert, um in Verbindung mit Farb-Video-Aufzeichnungen eine Aussage über die Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Wärmefreisetzung machen zu können.

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

## 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN

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 den Bildern 1.1 bzw. 1.2 angegebenen Position Z gezündet. Die Zündquelle hatte eine Flammenlänge von ca. 15 cm. Da nur auf einer Länge von 150 mm gegenüber 600 mm in /5/ gezündet wurde, verläuft die Brandentwicklung in der Anfangsphase langsamer. 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. Der Grund hierfür liegt darin, daß bei größeren Abständen die Entzündung eines benachbarten Stapels hauptsächlich durch Wärmestrahlung erfolgt. Diese ist flächenabhängig, d.h. bei 5 Kartons pro Gitterbox wird ein größerer Wärmestrom übertragen.

Auf die Untersuchung größerer Abstände als 1 m wurde verzichtet, da diese bereits eingehend in /5/ untersucht worden sind und es sich gezeigt hat, daß bei der dort angewendeten Zündung zwischen 2 Stapeln auf einer Länge von 600 mm ein wesentlich kritischerer Fall für die Entzündung bei größeren Abständen vorliegt. Dies liegt unter anderem an den wesentlich geringeren Wärmeverlusten an die Umgebung als bei der Zündposition gemäß Bild 1.1.

Die zwischen den oben angegebenen Grenzwerten untersuchten Abstände sind den Tabellen 2 bis 5 zu entnehmen. Beim Abstand 0,2 m wurden die bereits früher durchgeführten Versuche zum Vergleich herangezogen.

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 der Bewertung der Versuchsergebnisse ist zu berücksichtigen,

daß sich schwankende Umgebungsbedingungen in der nicht klimatisierten Versuchshalle auf die Brandausbreitung auswirken. 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.

Parallel zu den Regallagerversuchen mit 80 Kartons in 0 m Abstand wurden vergleichbare Blocklagerversuche mit der gleichen Anzahl von Kartons durchgeführt. Es zeigte sich dabei, daß sich, bedingt durch die konstruktiven und herstellungsbedingten Merkmale von Gitterboxen, auch beim vollständigen Zusammenschieben Spalte ausbilden, die sich auf die Brandausbreitung auswirken können. Es hat sich herausgestellt, daß sich die Flammen auf einer durch Metallrahmen unterbrochenen Kartonfront beim Regallager gegenüber einer durchgehenden Kartonfront beim Blocklager langsamer ausbreiten, da die Wärme in die Gitterboxen abgeleitet wird und zunächst nicht für die Aufheizung der Kartonoberfläche zur Verfügung steht. Bei 5 Kartons pro Gitterbox, insbesondere jedoch beim Blocklager breitet sich der Brand im Gegensatz zu 3 Kartons pro Gitterbox infolge der thermischen Auftriebsströmung der Flammengase, die stärkere Erwärmung der Oberfläche durch direkten

Wärme- und Stoffaustausch mit der Flamme und dem erhöhten Luftzutritt zunächst vorwiegend in vertikaler Richtung über die Wellpappe aus, bevor das Stoßschutzmaterial bzw. das Lagergut angegriffen wird.

Der Attrappenabstand konnte bei kleinen Abständen nicht in gleicher Weise verringert werden wie der Abstand zwischen den Lagerstapeln, da darauf geachtet werden mußte, daß die maximal zulässige Betriebstemperatur der Wärmeflußaufnehmer nicht überschritten wurde. Als minimaler Abstand wurde daher bei Holzwolle 0,2 m und bei Polystyrol-Partikelschaum 0,4 m gewählt.

Bei den Blocklagerversuchen war zu erkennen, daß bei der Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum die Lagerstapel schneller zusammenfallen als bei Holzwolle. Dies 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 wirkt das Rückstandsgerüst, das die Holzwolle bildet, stabilisierend auf den Stapel. 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.

## 5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

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

In den Bildern 2.1 bis 2.4 ist der Verlauf der aus dem jeweiligen Versuch ermittelten Höhe, den die Flammenwurzel am gezündeten Lagerstapel als Funktion der Versuchszeit erreicht hat, bei verschiedenen Lagerkonfigurationen, verschiedenen Abständen zwischen den Stapeln und für die Stoßschutzmaterialien Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum dargestellt. Beim Vergleich der Versuche mit 3 Kartons pro Gitterbox (Bild 2.1, Bild 2.3) mit Versuchen mit 5 Kartons pro Gitterbox (Bild 2.2, Bild 2.4) zeigt sich, daß sich die Flammenwurzel bei letzteren relativ kontinuierlich nach oben ausbreitet, wobei der Übergang von einer Gitterbox über den Metallrahmen zur nächsten Gitterbox vernachlässigt wird. Genaugenommen ergibt sich auch hier eine Verlangsamung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, erkennbar an den höheren Werten beim Blocklager, da die Wärme in die Gitterbox abgeleitet wird und nicht für die Aufheizung der Kartonoberfläche zur Verfügung steht. Bei 3 Kartons wird jedoch die ungleichförmige Ausbreitung der Flammenwurzel sehr deutlich. Auf der Kartonoberfläche erfolgt eine Beschleunigung, im leeren Zwischenraum eine Verlangsamung der vertikalen Flammenausbreitung.

Die Meßwertepaare Höhe der Flammenwurzel $z_b$ und Versuchszeit t wurden rechnerisch mittels Regression angepaßt. Gegenüber den Ausführungen in /5/, wo bei Holzwolle eine Exponentialfunktion und bei Polystyrol-Partikelschaum eine Potenzfunktion Anwendung findet, ergeben sich im vorliegenden Fall Abweichungen. Es hat sich hierbei ergeben, daß die Werte bei HW3 am genauesten durch eine Exponentialfunktion angepaßt werden können. HW kann beim Regallageraufbau mit 80 Kartons am genauesten durch eine Potenzfunktion, bei einem Abstand von 0,6 m aber, sowie beim Blocklager

mit 80 Kartons, durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden. Sowohl generell bei PS3, als auch bei PS5 bei den Abständen 0 m und 1,0 m und beim Blocklager mit 80 Kartons findet die Exponentialfunktion Anwendung. Bei den übrigen Abständen wird PS5 am genauesten durch eine lineare Funktion dargestellt. Man sieht daraus schon erste Anzeichen dafür, daß sich die gegenüber den Versuchen in /5/ nach abweichende Zündposition und Zündlänge (Bild 1.3) auf die Flammenausbreitung auswirken. Die bei der Regression erhaltenen Funktionen werden in Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 angegeben.

Deutlicher wird dies bei Betrachtung der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit v, d.h. die Geschwindigkeit, mit der sich die Flammenwurzel auf der Kartonoberfläche ausbreitet. Diese ergibt sich durch Differentiation zu

$$v = dz_b/dt \ . \qquad (1)$$

Die entsprechenden Gleichungen ergeben sich aus Tabelle 2 bzw. 3.

Die Bilder 3.1 bis 3.4 zeigen die Ergebnisse dieser Berechnungen.

An dieser Stelle sei bemerkt, daß der stufige Verlauf der Kurven in Bild 2.1 und 2.3 bei der Kurvenanpassung nicht berücksichtigt wurde, d.h., die Meßwerte wurden rechnerisch geglättet, was einer mittleren Geschwindigkeit entspricht.

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 Flammen-

ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand u.a. infolge des abnehmendem konvektiven Wärmeaustausches und der größeren Wärmeverluste an die Umgebung abnimmt. Es zeigt sich, daß die Lagerattrappe an der in Bild 1.1 angegebenen Position, sowie wegen der geringeren Abmessungen und der fehlenden Brandlast mit einem Lagerstapel bezüglich des Einflusses auf die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit nicht vergleichbar ist. Bei den jetzigen Versuchen kann nur festgestellt werden, daß die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit beim Blocklager am größten ist. Die Ursache hierfür ist, daß sich die Flammen ungehindert auf der Kartonoberfläche ausbreiten können, im Gegensatz zum Regallager, wo ein Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Wärme in das Metall der Gitterbox abgeleitet wird.

Weiterhin ist 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.

Beim Vergleich der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Lagerkonfigurationen wird die Zeit des Versuches als Betrachtungszeitraum ausgewählt, bei dem die Oberkante des Lagerstapels am schnellsten erreicht wird. Der Wert gleich 1 bedeutet, daß beide Geschwindigkeiten identisch sind. Hierbei ergibt sich bei der Betrachtung $v_{PS3}/v_{PS5}$ nach Bild 4.1, daß der Quotient im wesentlichen einen Wert kleiner 1 annimmt. Die Ausbreitung der Flammenwurzel auf dem Regallager in vertikaler Richtung erfolgt also bei 3 Kartons wesentlich langsamer als bei 5 Kartons, bedingt durch die großen Lücken zwischen den Kartons. Dies bedeutet jedoch wiederum, daß bei 3 Kartons die volumetrische Brandausbreitung begünstigt wird, auch bedingt durch den verbesserten Austausch Abgas/Luft. Die gleichen Aussagen sind ebenfalls für den Vergleich $v_{HW3}/v_{HW5}$ nach Bild 4.2 gültig. Bild 4.3 zeigt den Quotienten $v_{PS5}/v_{HW5}$. Die Werte liegen zum Teil über, zum Teil unter 1. Die Flammen breiten sich relativ schnell auf der Kartonoberfläche aus, wodurch der Einfluß des Stoßschutzmateriales noch gering bleibt. Der Abfall der Kurven

mit steigender Versuchszeit bei den Abständen 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 und 0,8 m ist auf die konstante Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei PS5 sowie auf die zunehmende Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei HW5 zurückzuführen. Beim Vergleich $v_{PS3}/v_{HW3}$ hingegen ergeben sich eindeutig Werte größer 1. Dies ist dadurch zu erklären, daß, wie bereits erwähnt, bei diesem Lageraufbau die volumetrische Brandausbreitung durch den besseren Austausch Abgas/Luft sowie die längere Verweilzeit des Brandes in einer Ebene begünstigt wird. Dadurch wird das Stoßschutzmaterial relativ früh in den Brandverlauf mit einbezogen. Dies bedeutet weiterhin, daß durch die schnellere und größere Wärmefreisetzung bei Polystyrol-Partikelschaum das darüberliegende Lagergut stärker erwärmt wird, was im Endeffekt zu einer größeren vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit führt. Den Ergebnissen ist zu entnehmen, daß keine eindeutige Abhängigkeit vom Abstand vorliegt. Beim Vergleich der Bilder 4.1 und 4.4 mit 4.2 und 4.3 ist eine Tendenz festzustellen, daß bei den ersteren das Stoßschutzmaterial Polystyrol-Partikelschaum in Verbindung mit der Brandlast 3 Kartons pro Gitterbox einen Anstieg der Kurven mit steigender Versuchszeit bewirkt.

Die Bilder 5.1 bis 5.4 geben die Ergebnisse des Vergleiches der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten der Versuche in /5/ mit 2 Gitterboxenstapeln (Bild 1.3) mit den Ergebnissen bei 4 Gitterboxenstapeln wieder. Für die Wahl des Betrachtungszeitraumes gilt das gleiche wie für die Bilder 4.1 bis 4.4. Bild 5.1 zeigt den Vergleich $v_{PS2}/v_{PS3}$. Der Wert 1 wird dabei beträchtlich überschritten, was auf die sehr schnelle Flammenausbreitung bei 2 parallelen Lagersäulen bei Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum hinweist. Weniger deutlich tritt dieser Unterschied bei Verwendung von 5 statt 3 Kartons pro Gitterbox infolge der relativ geschlossenen Kartonfront und daraus resultierenden schnellen vertikalen Flammenausbreitung nach Bild 5.2 auf. In gleicher Weise verhält sich das Stoßschutzmaterial Holzwolle nach Bild 5.3 und 5.4. Generell kann also gesagt werden, daß bei der Zündung zwischen 2 Lagerstapeln größere Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten auftreten als bei einer Zündposition ohne Einfluß

eines Nachbarstapels, da hier, insbesondere bei kleinen Abständen, die Wechselwirkungen bezüglich der thermischen Auftriebsströmung und der Wärme- und Stoffübertragung fehlen.

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 6.1 bis 6.3 dargestellt. Bild 6.1 zeigt den Stapel HL (s. Bild 1.1). 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 (s. Bild 6.2). Am seltensten wird der Stapel HR bei größeren Abständen in das Brandgeschehen mit einbezogen (s. Bild 6.3). Dieses hängt mit dem Löscheinsatz des Sprinklers zusammen, auf den 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 7.1 bis 7.3 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 8 zeigt die maximale Brandtemperatur 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 Polystyrol-Partikelschaum 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.

Ein Maß für die volumetrische Ausbreitung eines Brandes, d.h. die Geschwindigkeit mit der sich dieser auch in horizontaler Richtung in das Innere des Lagers ausbreitet, ist die zeitliche Massenabnahme des Lagergutes während der Verbrennung. Die Abbrandmasse $\Delta M$ ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse $M_a$ und der noch nicht verbrannten Masse der gelagerten Stoffe zum Zeitpunkt t zu

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

Der zeitliche Massenverlust oder die Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = -\frac{dM}{dt} = -\dot{M} \,. \qquad (3)$$

Da die Masse während der Verbrennung abnimmt, ist $-\dot{M}$ eine positive Größe.

In den folgenden Untersuchungen wird vorwiegend die Brandentwicklungsphase betrachtet, d.h. der Zeitraum in der ein Brand von der Zündung zum vollentwickelten stationären Brand übergeht (siehe auch den vollständigen Verlauf der Abbrandmasse nach Bild 9).

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

$$\dot{Q} = -\dot{M} H_u \,. \qquad (4)$$

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

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

Da in der Praxis die Heizwerte $H_{u,i}$ wegen Rußbildung, dem Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, Sauerstoffmangel und nicht ausreichender Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe nicht erreicht werden, ergibt sich eine geringere freigesetzte Wärmemenge. Nach /2/ werden dabei je nach verwendetem Lagergut und geometrischer Anordnung ca. 35 % bis 50 % des Heizwertes $H_u$ in den fühlbaren Wärmestrom $\dot{Q}_f$ umgesetzt. Dies ist der Wärmestrom, der oberhalb des brennenden Lagerstapels auftritt und der sowohl für das Ansprechen von thermisch wirkenden Auslöseelementen einer Löschanlage verantwortlich ist als auch bei der thermischen Auslegung von Decken oder Dächern von Lagergebäuden berücksichtigt werden muß.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 1 angegebenen Massen $P_i$ und Heizwerte $H_{u,i}$ erhält man für den Lageraufbau Karton mit Holzwolle einen Wert von $\bar{H}_u = 15{,}4$ MJ/kg bzw. für den Lageraufbau Karton mit Polystyrol-Partikelschaum einen Wert von $\bar{H}_u = 22{,}0$ MJ/kg. Für die Abminderung des theoretischen Wärmestromes wird nach /2/ ein Wert von 50 % angenommen. Damit ergibt sich der fühlbare Wärmestrom bei Verwendung von Holzwolle als Stoßschutzmaterial

$$\dot{Q}_{fHW} = -1000/60 \cdot 0{,}5 \cdot 15{,}4 \cdot \dot{M} \qquad (6)$$

bzw. für Polystyrol-Partikelschaum

$$\dot{Q}_{fPS} = -1000/60 \cdot 0{,}5 \cdot 22{,}0 \cdot \dot{M} \qquad (7)$$

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

Der Vergleich der Determinationskoeffizienten $R^2$ hat ergeben, daß die Potenzfunktion sowohl bei Holzwolle als auch bei Polystyrol-Partikelschaum den Bereich der Brandentwicklungsphase ab dem Zeitpunkt $t_0$ am genauesten wiedergibt. $t_0$ 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.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung der Zeit $t_0$ zu erhalten, wird diese in Bild 10 als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien aufgetragen. Ebenfalls werden die Werte aus den Untersuchungen in /5/ in die Betrachtung miteinbezogen. Die Zeiten liegen im Bereich zwischen 1min 11s und 6min 48s, wobei die niedrigsten Werte bei den Untersuchungen in /5/ aufgrund der größeren Zündquelle und größeren Wärmefreisetzung ermittelt wurden. Man erkennt, daß keine eindeutige Abhängigkeit vom Abstand vorliegt. Es liegt eine Tendenz vor, daß $t_0$ bei 3 Kartons pro Gitterbox größer als bei 5 Kartons pro Gitterbox ist. Bei 4 Gitterboxenstapeln ist kein Unterschied bezüglich des Stoßschutzmateriales feststellbar. Bei den Versuchen in /5/ ist eine geringfügig größere Zeit bei Holzwolle als bei Polystyrol-Partikelschaum erkennbar. Die beiden Blocklagerversuche liegen zeitlich zwischen den Versuchen mit 2 bzw. 4 Stapeln.

Nach Fuchs /12/ ist die 2. Ableitung der Abbrandgeschwindigkeit nach der Zeit ein Maß dafür, wie schnell der Übergang von der Zündung zum vollentwickelten stationären Brand vonstatten geht. Diese wird im weiteren als Brandentwicklung bezeichnet und ergibt sich aus

$$\frac{d^2(\Delta M)}{dt^2} = -\frac{d\dot{M}}{dt} = -\ddot{M} \,. \qquad (8)$$

Die Form der Funktion sowie die Regressionskoeffizienten sind der Tabelle 5 und 6 zu entnehmen.

In den Bildern 11.1 bis 11.4 werden die Meßwerte der Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien und Lagerkonfigurationen für den Bereich der Brandentwicklungsphase dargestellt.

Die nach Gleichung (3) errechnete Abbrandgeschwindigkeit wird in den Bildern 12.1 bis 12.4 dargestellt. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, steigt die Abbrandgeschwindigkeit mit der Versuchszeit infolge der wachsenden volumetrischen Brandausbreitung und in Abhängigkeit von dem Stoßschutzmaterial.

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. Auf den Einfluß des Stoßschutzmateriales und der Lagerkonfiguration wird nachfolgend bei der Betrachtung der Wärmefreisetzung noch näher eingegangen.

Für die hier durchgeführten Versuche ergibt sich der fühlbare

Wärmestrom durch Einsetzen der empirischen Gleichung der Abbrandgeschwindigkeit (3) in Gleichung (6) und (7). Die Bilder 13.1 bis 13.4 zeigen die Ergebnisse dieser Berechnungen als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$. Es gelten hierzu sinngemäß die Erläuterungen zum zeitlichen Massenverlust.

Um den Einfluß der Lagerkonfiguration und des Stoßschutzmateriales auf die Wärmefreisetzung zu untersuchen, wurde in den Bildern 14.1 bis 14.5 der Quotient der fühlbaren Wärmeströme als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ aufgetragen.

Für den Vergleichszeitraum bei den jeweiligen Versuchspaaren wird die Zeit des Versuches ausgewählt, bei dem die Brandentwicklungsphase am schnellsten beendet ist. Beim Vergleich PS3 mit PS5 nach Bild 14.1 ergibt sich überwiegend ein Faktor größer 1 mit Ausnahme bei den Abständen 0,2 m und 0,6 m. Dieses bestätigt weitgehend die bisherigen Erkenntnisse, daß bei 3 Kartons eine stärkere volumetrische Brandausbreitung als bei 5 Kartons pro Gitterbox vorliegt. Die Anomalie bei 0,2 m und 0,6 m dürfte auf die bereits erwähnten schwankenden Umgebungsbedingungen in der Versuchshalle zurückzuführen sein. Bild 14.2 zeigt die Versuchsergebnisse für das Stoßschutzmaterial Holzwolle, ebenfalls mit dem Vergleich 3 Kartons/5 Kartons. Die Faktoren liegen hier generell über 1, was die bisherigen Aussagen bestätigt. Auf den Einfluß der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien wird in den Bildern 14.3 bis 14.5 eingegangen. Hierbei wurde zusätzlich der Quotient $\dot{Q}_{fPS} / \dot{Q}_{fHW3}$ untersucht, um die nachfolgend angegebene Reihenfolge logisch zu begründen. Bedingt durch die größere und schnellere Wärmefreisetzung bei Polystyrol-Partikelschaum gegenüber Holzwolle ergibt sich weitgehend ein Quotient größer 1. Es ergibt sich hierbei eine Tendenz der Abnahme des Wärmestromes in der Reihenfolge

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

Diese Ergebnis stimmt mit den bisherigen Erkenntnissen überein.

Ein Vergleich der fühlbaren Wärmeströme dieser Versuche mit denjenigen in /5/ ergibt folgendes Ergebnis (s. Bild 15.1 bis 15.4). Es ist erkennbar, daß bei der Zündung zwischen 2 parallelen Gitterboxensäulen (Bild 1.3) ein wesentlich größerer Wärmestrom in der Brandentwicklungsphase freigesetzt wird als bei dem Versuchsaufbau nach Bild 1. Ein Vergleich der Versuchszeiten, bei denen der benachbarte Stapel gezündet wird, hat gezeigt, daß bei den Versuchen in /5/ der benachbarte Stapel schon relativ frühzeitig in der Brandentwicklungsphase in das Brandgeschehen eingreift und daher zu einer schnelleren Wärmefreisetzung beiträgt. Der Abfall der Kurven mit steigender Versuchszeit in Bild 15.1 und Bild 15.2 bei 0,2 m sowie in Bild 15.3 und Bild 15.4 bei 0,1; 0,2 und 0,4 m ist auf die konstante Abbrandgeschwindigkeit bzw. Wärmefreisetzung bei den Versuchen in /5/ sowie die zunehmende Wärmefreisetzung bei den hier untersuchten Versuchen zurückzuführen.

Die nach Gleichung (8) errechnete Brandentwicklung, als ein Maß für die ungleichmäßig beschleunigte Zunahme der Abbrandmasse in der Brandentwicklungsphase, wird in den Bildern 16.1 bis 16.4 dargestellt. Auf die Darstellung des vollentwickelten stationären Brandes wird verzichtet, da in diesem Bereich die Abbrandmasse linear über der Versuchszeit verläuft. Dies bedeutet, daß hier die 2. Ableitung und damit die Brandentwicklung auf den Wert Null abfällt. Zum Verlauf und zur zeitlichen Reihenfolge der Kurven gilt das bisher Gesagte über die Abbrandgeschwindigkeit bzw. die Wärmefreisetzung.

Bild 17 zeigt die mit Wärmeflußaufnehmern maximal während des Versuches ermittelten Wärmestromdichten (Strahlung und Konvektion) 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 ver-

zeichnen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß es sich bei den gemessenen Wärmestromdichten nur um Anhaltswerte handelt. Die verwendeten Wärmeflußaufnehmer messen nicht punktförmig, sondern mit einem Betrachtungswinkel von 150°. D.h., mit zunehmendem Abstand zwischen Aufnehmer und Lagerstapel wird die erfaßte Fläche immer größer. Dies wiederum bedeutet, daß sich mehrere Einflußfaktoren, insbesondere bei der Erfassung der Wärmestrahlung auf das Meßergebnis auswirken. Hierzu zählen ein ungleichmäßiger Abbrand über der Lagerstapelfläche, die Einflüsse des umgebenden Luftraumes sowie der übrigen Lagerstapel.

Bild 18 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 ein Zunahme der Zeit mit dem Attrappenabstand. Dies bestätigt die Ergebnisse in Bild 6.1. Bei größeren Abständen ist jedoch eine Abnahme zu verzeichnen. Eine Ursache hierfür könnte sein, daß bei größeren Abständen infolge des großen Betrachtungswinkels und der damit verbundenen Erfassung der nicht brennenden, kälteren Umgebung der niedrigere Wert der Wärmestromdichte früher erfaßt wird.

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

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.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Als Fortsetzung der bisherigen Lagerbrandversuche der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurden die Untersuchungen mit der Variation des Abstandes zwischen gelagerten Gütern weitergeführt.

Bei den Versuchen wurde der Versuchsaufbau, unter Beibehaltung der Art der Brandlast, den neuen Erfordernissen entsprechend modifiziert. In Abänderung wurde der horizontale Abstand zwischen den vier in der Fläche angeordneten Gitterboxenstapeln variiert.

Parallel zum vorderen linken Stapel wurde im Gitterboxenabstand eine Lagerattrappe mit Wärmeflußaufnehmern aufgestellt.

In Ergänzung zum Regallageraufbau wurden einige Blocklagerversuche ohne Gitterboxen durchgeführt, um deren Einfluß auf die Brandausbreitung zu untersuchen.

Rückschlüsse auf die Brandausbreitung ergaben sich aus den Temperatur- und Abbrandmessungen, den Messungen mit Wärmeflußaufnehmern sowie der Auswertung von Videoaufzeichnungen.

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß sich die Position der Zündquelle sehr stark auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Abbrandgeschwindigkeit auswirkt. Die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit nimmt bei der Zündung ohne benachbartem Lageraufbau beträchtlich infolge des fehlenden wechselseitigen Wärme- und Stoffaustausches und der veränderten thermischen Auftriebsströmung ab. Im Gegensatz zu 3 Kartons macht

sich bei 5 Kartons pro Gitterbox der Einfluß des Stoßschutzmateriales kaum bemerkbar, da sich hier die Flammen zunächst überwiegend auf der Kartonoberfläche ausbreiten. Bei 3 Kartons ist eine stärkere volumetrische Brandausbreitung durch den verbesserten Austausch Abgas/Luft für die unterschiedlichen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten bei den beiden Stoßschutzmaterialien Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum verantwortlich. Bei den Regallagerversuchen wurden die bisherigen Ergebnisse bestätigt, daß bei 3 Kartons pro Gitterbox und bei Verwendung des Stoßschutzmateriales Polystyrol-Partikelschaum die größte Wärmemenge freigesetzt wird. Diese wird jedoch beim Blocklager noch übertroffen.

In der Brandentwicklungsphase ist bei den hier durchgeführten Versuchen bei Zündung auf der Frontseite kein Einfluß des Abstandes auf die Brandausbreitung erkennbar.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

/1/ Brein,D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 1: Literaturauswertung. Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten. 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 Feuerwehrangelegenheiten. 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 Feuerwehrangelegenheiten. 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 Feuerwehrangelegenheiten.
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/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 1: Literaturauswertung und Errichtung der Versuchsanlage.
Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1985.

/7/ Schatz, H.: 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.

/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: Löschversuche 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: Löschversuche mit Sprinklern 2. Forschungsbericht Nr. 67 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1988.

/11/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen. Teil 6: Löschversuche mit Sprinklern 3. Forschungsbericht Nr. 70 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1989.

/12/ Fuchs, P.: Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten. Forschungsbericht Nr. 33 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1978.

# 8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1 : Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes

Heizwerte:

| | |
|---|---|
| $H_u$ Weichfaser | 16 MJ/kg |
| $H_u$ Äthylalkohol | 25 MJ/kg |
| $H_u$ Karton | 15 MJ/kg |
| $H_u$ Polystyrol | 40 MJ/kg |
| Hu Holzwolle | 16 MJ/kg |

Massen pro Karton:

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

Masse Weichfaserstab: 0,02 kg zuzüglich 50 ml Äthylalkohol

Tabelle 2 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Höhe die die Flammenwurzel erreicht hat und vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, Holzwolle)

| Abstand m | $z_{bHW}$ 1)2) m | | $v_{HW}$ 1)2) m/min | |
|---|---|---|---|---|
| | $a_{IHW};b_{IHW}$ | $R^2$ | $a'_{IHW};b_{IHW}$ bzw. $b'_{IHW}$ | |
| | | HW3 | | |
| 0,0 | 0,29;0,23 | 0,93 | 0,07;0,23 | |
| 0,1 | 0,29;0,27 | 0,93 | 0,08;0,27 | |
| 0,2 | 0,33;0,29 | 0,96 | 0,10;0,29 | |
| 0,4 | 0,28;0,27 | 0,93 | 0,08;0,27 | |
| 0,6 | 0,29;0,23 | 0,95 | 0,07;0,23 | |
| 0,8 | 0,29;0,26 | 0,91 | 0,08;0,26 | |
| | | HW5 | | |
| Bl *) | 0,19;1,47 | 1,00 | 0,28;1,47 | |
| 0,0 | 0,65;1,00 | 0,99 | 0,65 (konst) | |
| 0,1 | 0,73;1,11 | 0,98 | 0,81;0,11 | |
| 0,2 | 0,94;1,42 | 0,98 | 1,33;0,42 | |
| 0,4 | 0,66;1,08 | 1,00 | 0,71;0,08 | |
| 0,6 *) | 0,38;0,31 | 0,93 | 0,12;0,31 | |
| 0,8 | 0,69;1,05 | 0,98 | 0,72;0,05 | |
| 1,0 | 0,89;1,13 | 0,99 | 1,01;0,13 | |

1) HW3 bzw. *)
$z_{bHW} = a_{IHW} \cdot e^{bIHW \cdot t}$
$v_{HW} = a_{IHW} \cdot b_{IHW} \cdot e^{b\,IHW \cdot t} = a'_{IHW} \cdot e^{bIHW \cdot t}$

2) HW5
$z_{bHW} = a_{IHW} \cdot t^{bIHW}$
$v_{HW} = a_{IHW} \cdot b_{IHW} \cdot t^{bIHW-1} = a'_{IHW} \cdot t^{b'IHW}$

Tabelle 3 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Höhe die die Flammenwurzel erreicht hat und vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, Polystyrol)

| Abstand m | $z_{bPS}$ [3)4)] m | | $v_{PS}$ m/min | |
|---|---|---|---|---|
| | $a_{IPS};b_{IPS}$ | $R^2$ | $a'_{IPS};b_{IPS}$ | |
| | | PS3 | | |
| 0,0 | 0,28;0,37 | 0,98 | 0,10;0,37 | |
| 0,1 | 0,28;0,36 | 0,97 | 0,10;0,36 | |
| 0,2 | 0,34;0,34 | 0,96 | 0,12;0,34 | |
| 0,4 | 0,27;0,41 | 0,98 | 0,11;0,41 | |
| 0,6 | 0,33;0,23 | 0,99 | 0,08;0,23 | |
| 0,8 | 0,30;0,31 | 0,98 | 0,09;0,31 | |
| | | PS5 | | |
| Bl | 1,11;1,26 | 0,99 | 1,40;0,26 | |
| 0,0 | 0,64;1,10 | 0,99 | 0,70;0,10 | |
| 0,1*) | 0,15;0,58 | 0,98 | 0,58 | (konst) |
| 0,2*) | 0,36;0,64 | 0,93 | 0,64 | " |
| 0,4*) | 0,18;0,58 | 0,97 | 0,58 | " |
| 0,6*) | 0,11;0,56 | 0,96 | 0,56 | " |
| 0,8*) | 0,13;0,69 | 0,98 | 0,69 | " |
| 1,0 | 0,63;1,01 | 0,99 | 0,64;0,01 | |

3) PS3
$z_{bPS} = a_{IPS} \cdot e^{b_{IPS} \cdot t}$
$v_{PS} = a_{IPS} \cdot b_{IPS} \cdot e^{b_{IPS} \cdot t} = a'_{IPS} \cdot e^{b_{IPS} \cdot t}$

4) PS5
$z_{bPS} = a_{IPS} \cdot b_{IPS} \cdot e^{b_{IPS} \cdot t}$
$v_{PS} = a_{IPS}$
*) $z_{bPS} = a_{IPS} + b_{IPS} \cdot t$
$v_{PS} = b_{IPS}$

Tabelle 4 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Abbrandmasse, Holzwolle)

| Abstand m | $\Delta M_{HW}$ [5] kg | $t_0$ s | $-\dot{M}_{HW}$ kg/min | $\dot{Q}_{fHW}$ kW |
|---|---|---|---|---|
| | $a_{IIHW}; b_{IIHW}$ | $R^2$ | $a'_{IIHW}; b'_{IIHW}$ | $a''_{IIHW}; b'_{IIHW}$ |
| | | HW3 | | |
| 0,0 | 5,2E-4;4,32 | 0,98 348 | 0,002;3,32 | -0,26;3,32 |
| 0,1 | 1E-4;4,96 | 1,00 368 | 5E-4;3,96 | -0,06;3,96 |
| 0,2 | 0,01;3,63 | 0,99 252 | 0,04 ;2,63 | -5,13;2,63 |
| 0,4 | 4E-4;4,59 | 1,00 333 | 0,002;3,59 | -0,23;3,59 |
| 0,6 | 1E-4;4,99 | 1,00 408 | 5E-4;3,99 | -0,06;3,99 |
| 0,8 | 4E-4;4,58 | 1,00 328 | 0,002;3,58 | -0,23;3,58 |
| | | HW5 | | |
| Bl | 0,14;2,48 | 0,99 137 | 0,35 ;1,48 | -44,55;1,48 |
| 0,0 | 0,01;3,10 | 1,00 267 | 0,03 ;2,10 | -3,85;2,10 |
| 0,1 | 0,10;2,12 | 1,00 182 | 0,21 ;1,12 | -26,90;1,12 |
| 0,2 | 0,17;2,23 | 1,00 141 | 0,38 ;1,23 | -48,77;1,23 |
| 0,4 | 0,03;2,53 | 1,00 257 | 0,08 ;1,53 | -10,26;1,53 |
| 0,6 | 0,01;2,93 | 1,00 323 | 0,03 ;1,93 | -3,85;1,93 |
| 0,8 | 0,05;2,30 | 1,00 237 | 0,12 ;1,30 | -15,40;1,30 |
| 1,0 | 0,13;2,04 | 1,00 172 | 0,27 ;1,04 | -34,64;1,04 |

5) $\Delta M_{HW} = a_{IIHW} \cdot t^{b_{IIHW}}$ mit t in min

$-\dot{M}_{HW} = a_{IIHW} \cdot b_{IIHW} \cdot t^{b_{IIHW}-1} = a'_{IIHW} \cdot t^{b'_{IIHW}}$

$\dot{Q}_{fHW} = - 1000/60 \cdot 0,5 \cdot 15,4 \cdot \dot{M}_{HW} = a''_{IIHW} \cdot t^{b'_{IIHW}}$

$-\ddot{M}_{HW} = a'_{IIHW} \cdot b'_{IIHW} \cdot t^{b'_{IIHW}-1}$

Tabelle 5 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Abbrandmasse, Polystyrol)

| Abstand m | $\Delta M_{PS}$ [6] kg | | $t_0$ s | $-\dot{M}_{PS}$ kg/min | $\dot{Q}_{fPS}$ kW |
|---|---|---|---|---|---|
| | $a_{IIPS};b_{IIPS}$ | $R^2$ | | $a'_{IIPS};b'_{IIPS}$ | $a''_{IIPS};b'_{IIPS}$ |
| | | | PS3 | | |
| 0,0 | 0,001;4,97 | 0,98 | 252 | 0,005;3,97 | -0,92;3,97 |
| 0,1 | 4E-5 ;6,63 | 1,00 | 272 | 3E-4 ;5,63 | -0,05;5,63 |
| 0,2 | 0,05 ;2,80 | 0,99 | 176 | 0,14 ;1,80 | -25,67;1,80 |
| 0,4 | 0,01 ;4,13 | 1,00 | 212 | 0,04 ;3,13 | -7,57;3,13 |
| 0,6 | 0,004;3,50 | 0,98 | 293 | 0,01 ;2,50 | -2,64;2,50 |
| 0,8 | 0,001;4,66 | 0,98 | 272 | 0,005;3,66 | -0,86;3,66 |
| | | | PS5 | | |
| Bl | 0,01 ;4,53 | 0,94 | 172 | 0,05 ;3,53 | -8,30;3,53 |
| 0,0 | 0,03 ;2,98 | 1,00 | 187 | 0,09 ;1,98 | -16,50;1,98 |
| 0,1 | 0,01 ;3,69 | 1,00 | 232 | 0,04 ;2,69 | -7,33;2,69 |
| 0,2 | 0,03 ;3,11 | 1,00 | 187 | 0,09 ;2,11 | -16,50;2,11 |
| 0,4 | 0,003;3,72 | 0,99 | 287 | 0,01 ;2,72 | -1,83;2,72 |
| 0,6 | 0,004;3,99 | 0,99 | 252 | 0,01 ;2,99 | -2,57;2,99 |
| 0,8 | 0,01 ;3,57 | 0,98 | 242 | 0,04 ;2,57 | -6,60;2,57 |
| 1,0 | 0,01 ;3,45 | 1,00 | 252 | 0,04 ;2,45 | -6,42;2,45 |

6) $\Delta M_{PS} = a_{IIPS} \cdot t^{b\,IIPS}$ mit t in min

$-\dot{M}_{PS} = a_{IIPS} \cdot b_{IIPS} \cdot t^{b_{IIPS}-1} = a'_{IIPS} \cdot t^{b'_{IIPS}}$

$\dot{Q}_{fPS} = -\,1000/60 \cdot 0,5 \cdot 22,0 \cdot \dot{M}_{PS} = a''_{IIPS} \cdot t^{b'_{IIPS}}$

$-\ddot{M}_{PS} = a'_{IIPS} \cdot b'_{IIPS} \cdot t^{b'_{IIPS}-1}$

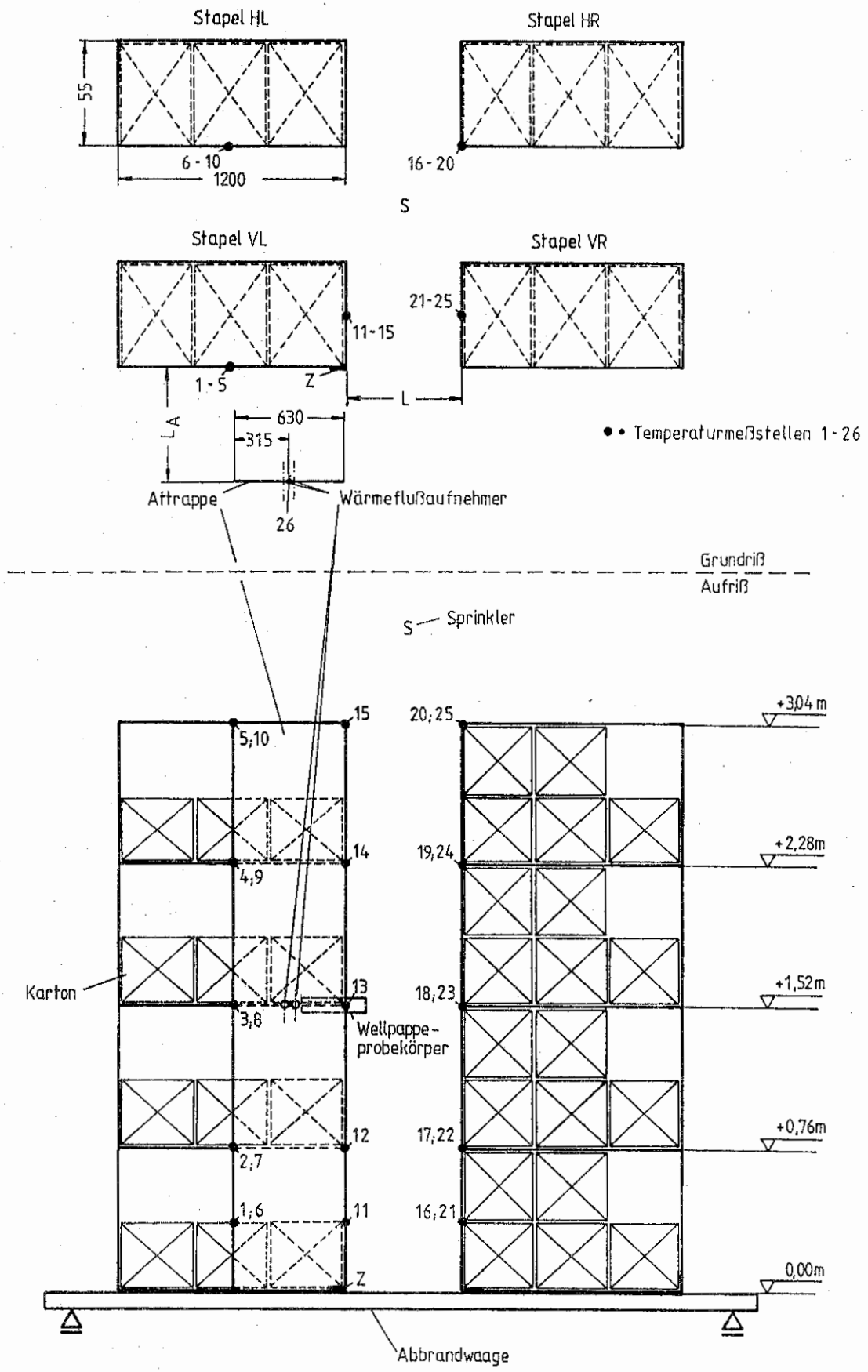
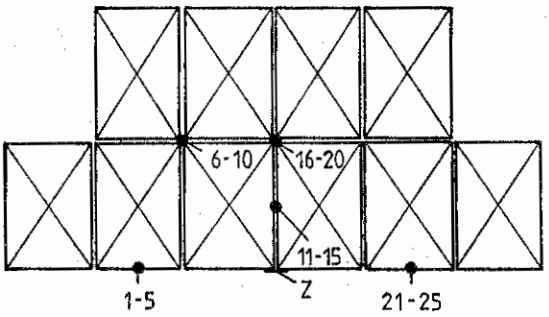



Bild 1.1 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen (Regallageraufbau mit Gitterboxen).




● Temperaturmeßstellen 1 - 25

Grundriß

Aufriß

S — Sprinkler

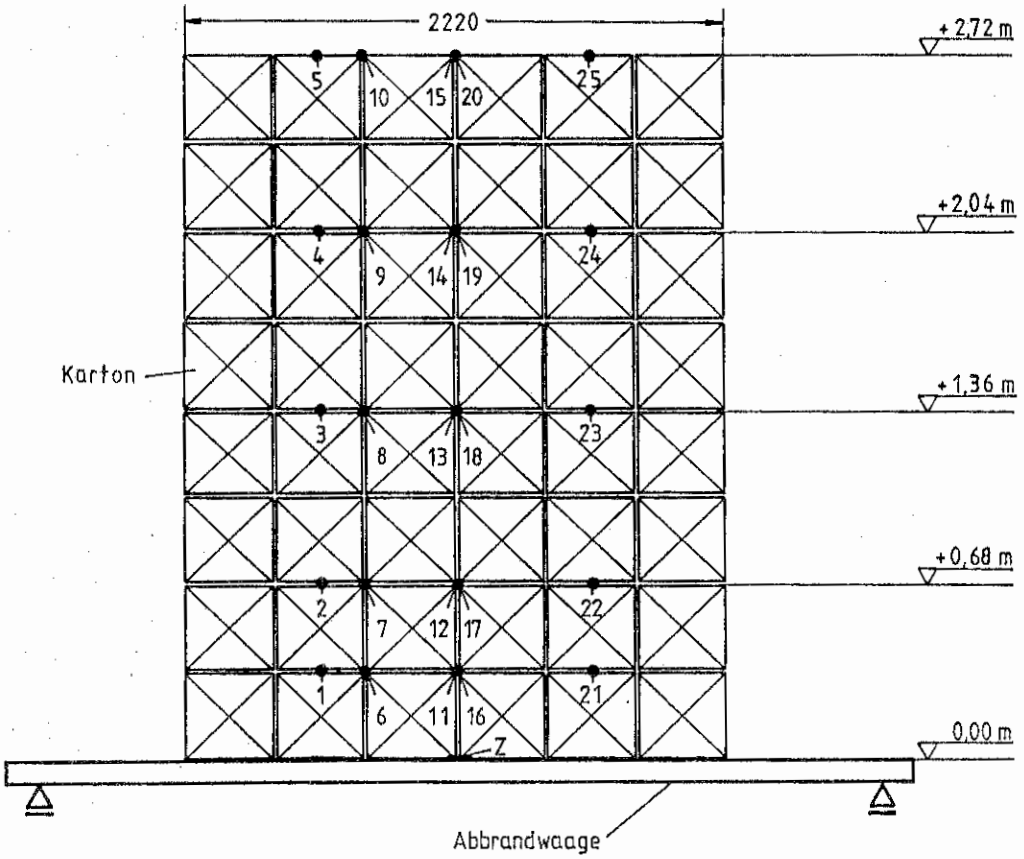



Bild 1.2 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen (Blocklager)

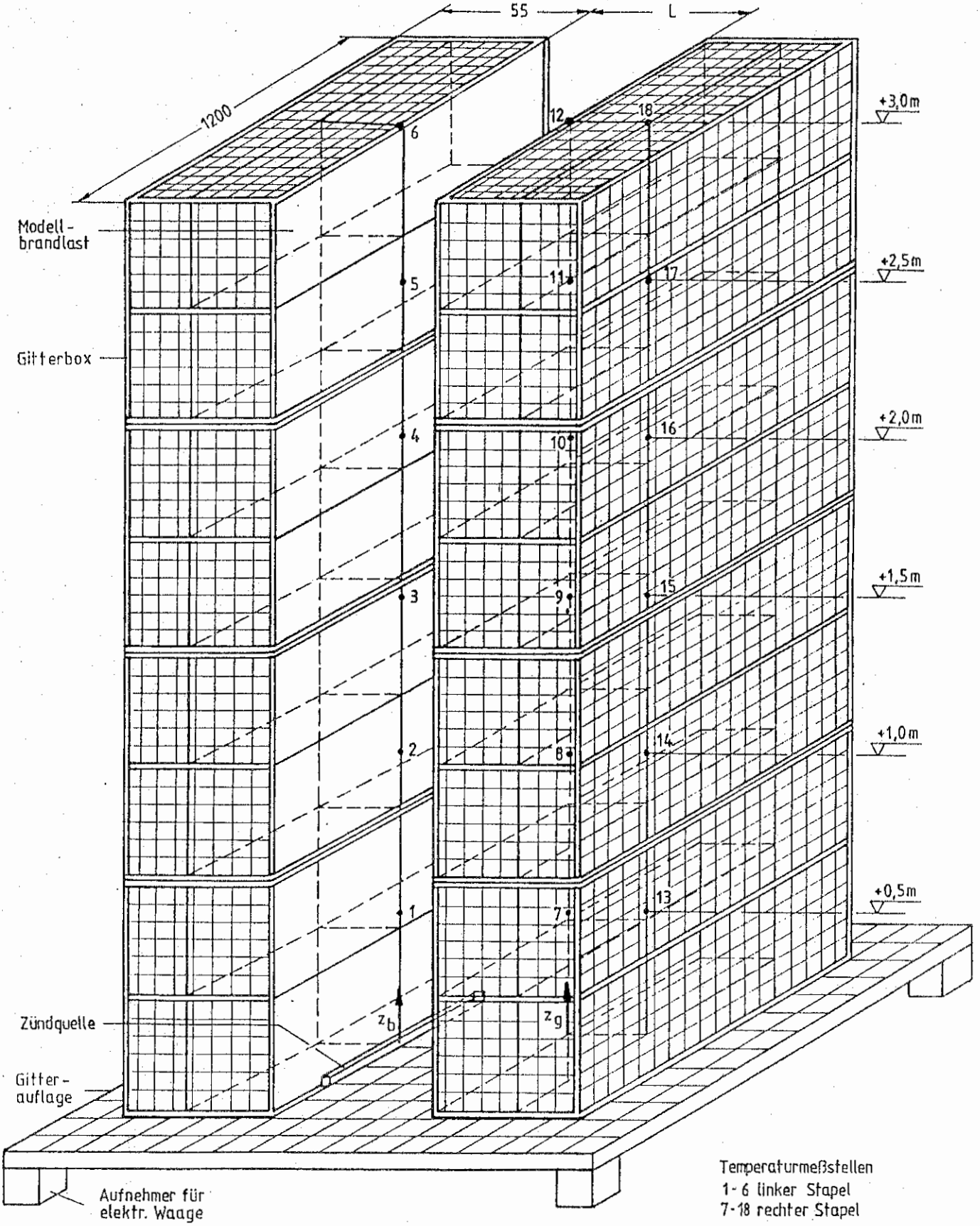



Bild 1.3 Prinzipskizze des Versuchsaufbaues mit Angabe der Temperaturmeßstellen nach /5/.

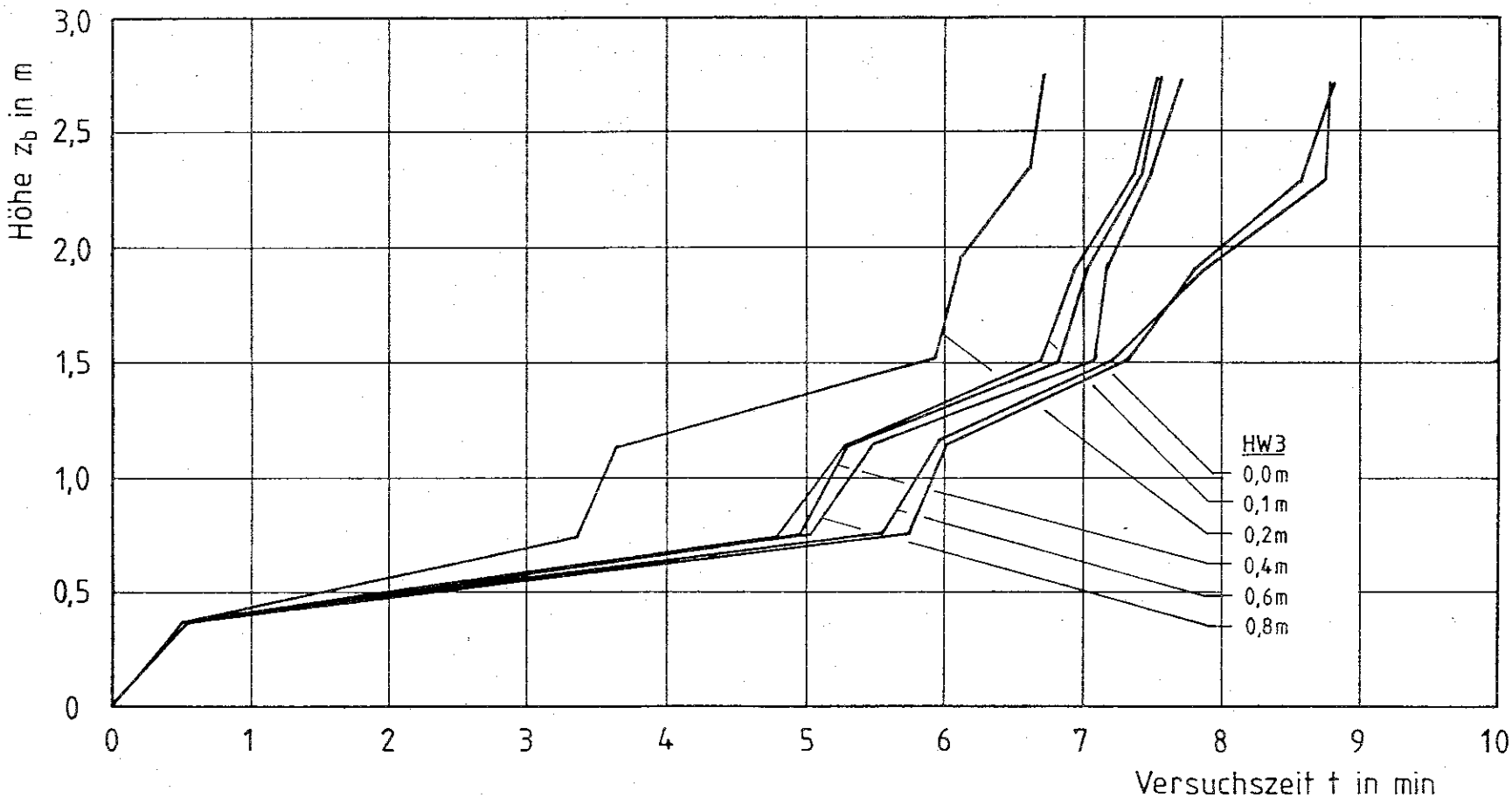



Bild 2 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit t bei verschiedenen Abständen.

Bild 2.1 Stoßschutzmaterial Holzwolle.
3 Kartons pro Gitterbox.

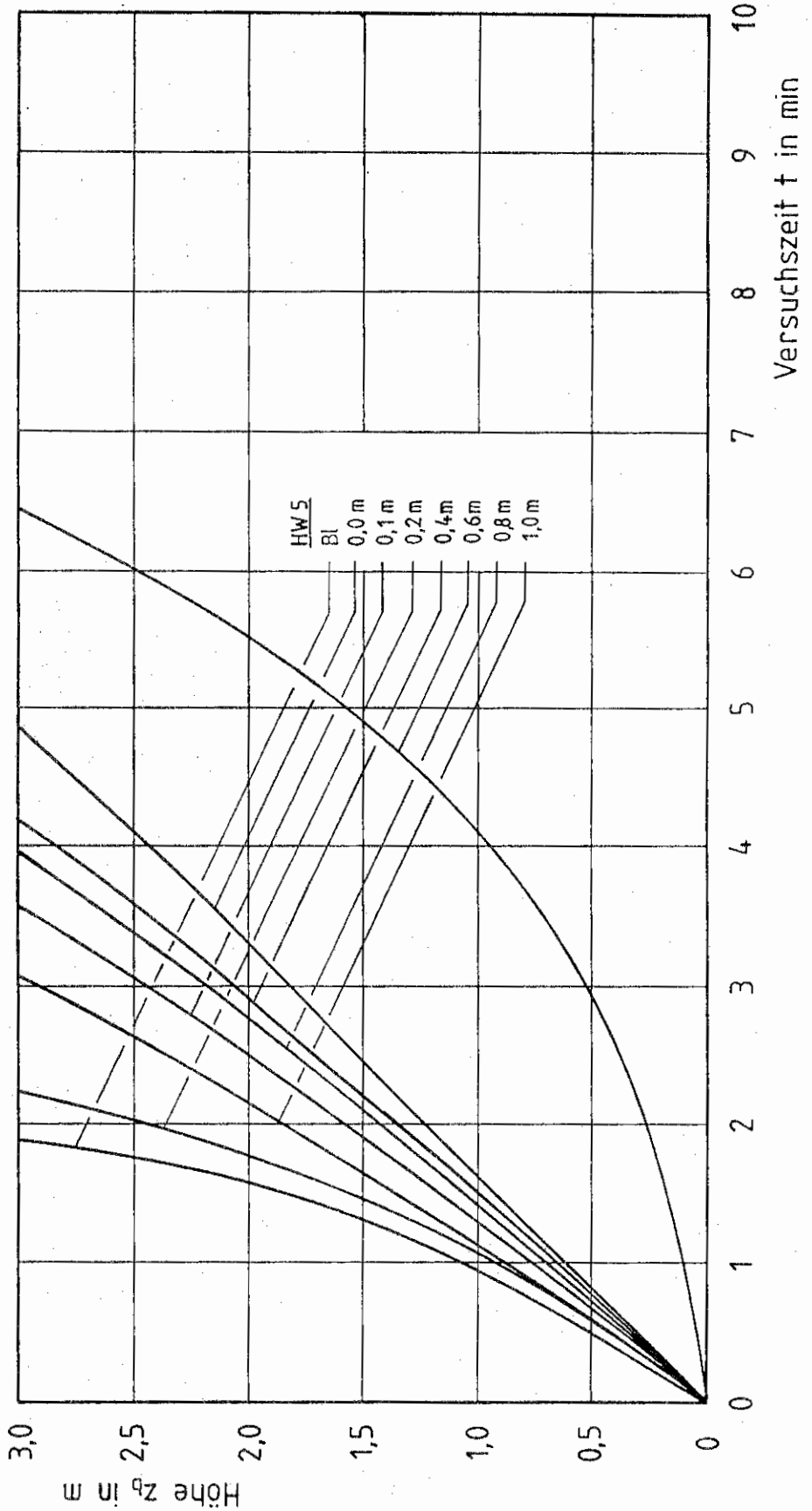



Bild 2.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox.

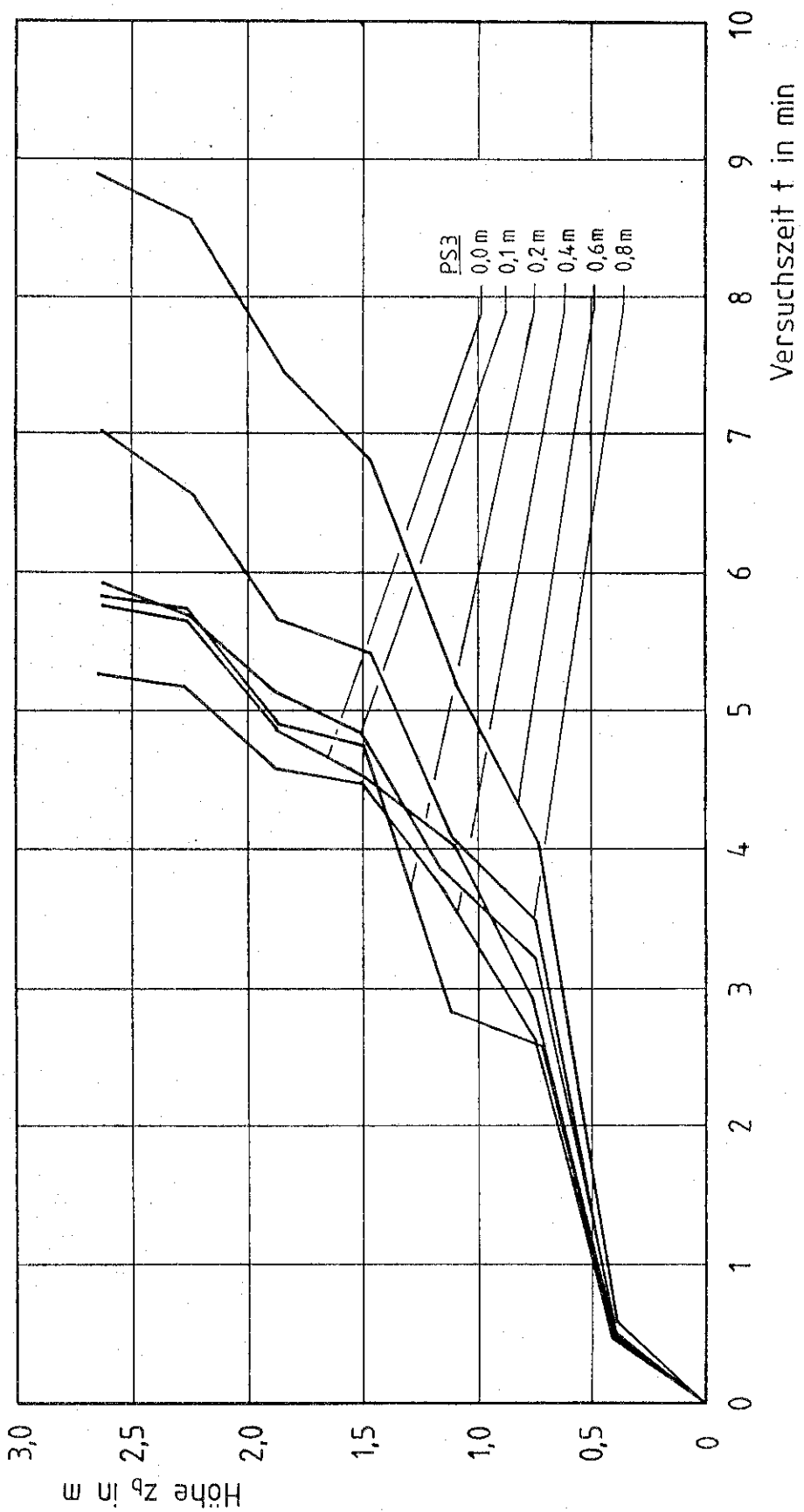



Bild 2.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox.

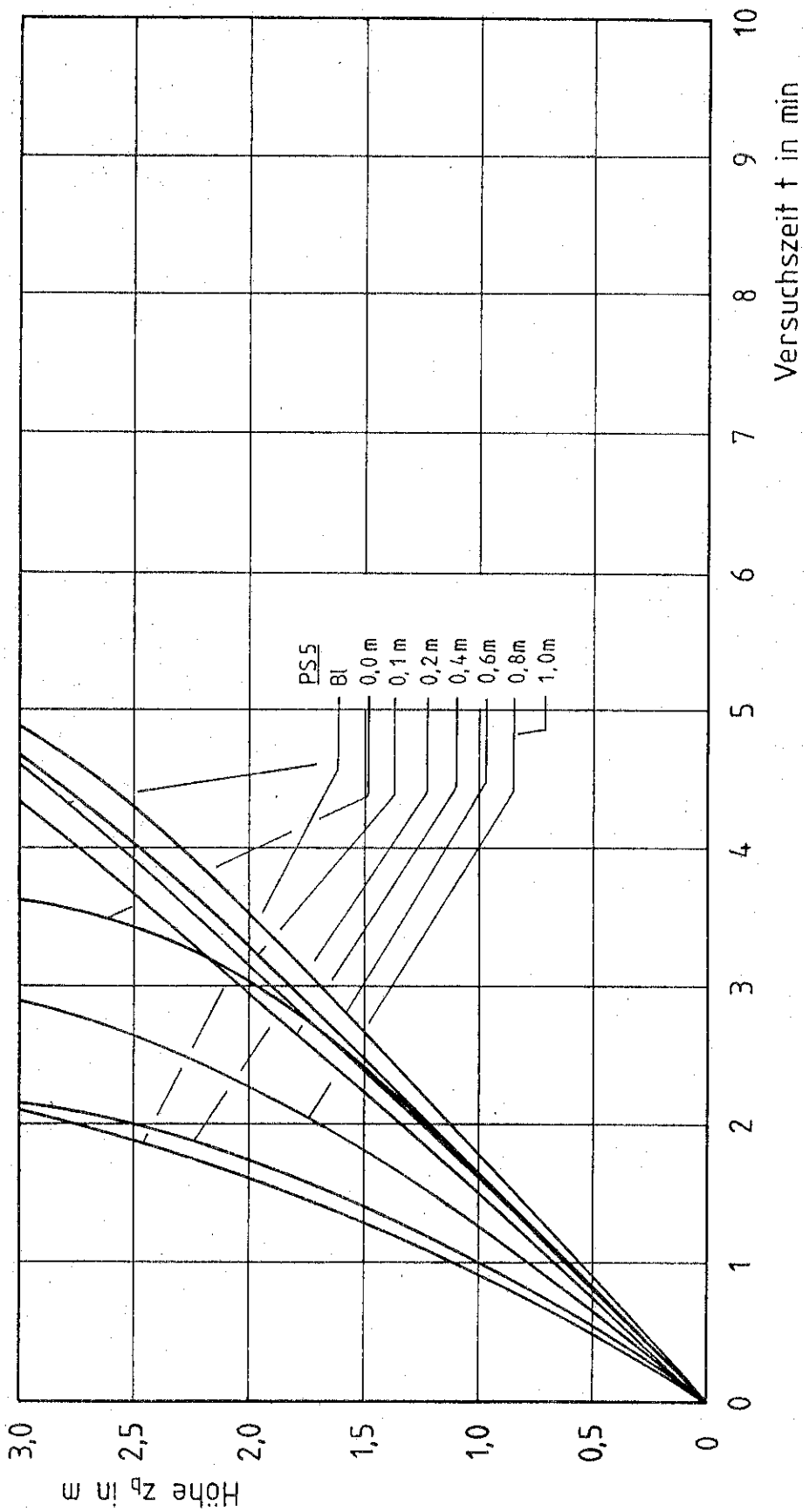



Bild 2.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox.

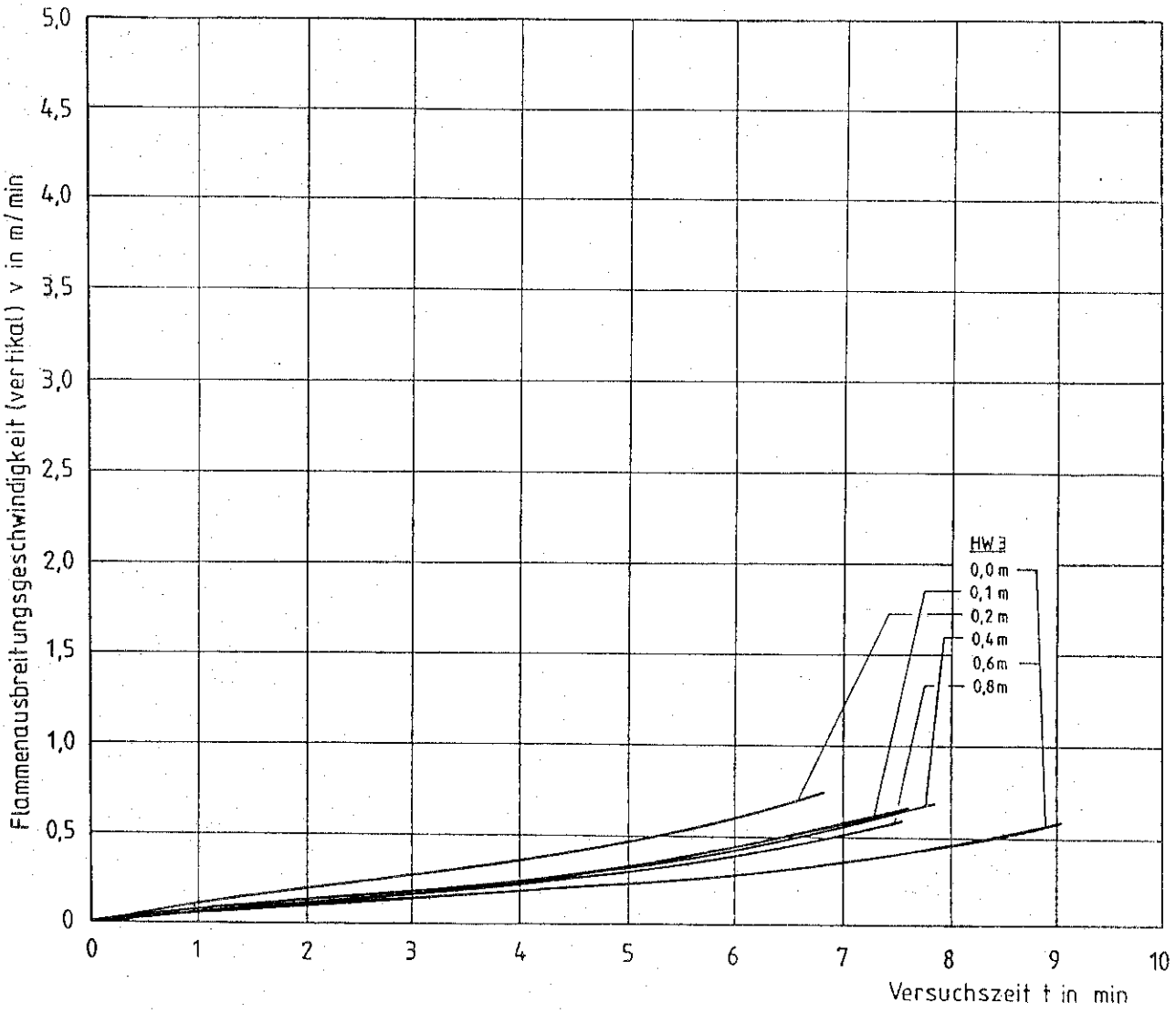



Bild 3 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit t bei verschiedenen Abständen.

Bild 3.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

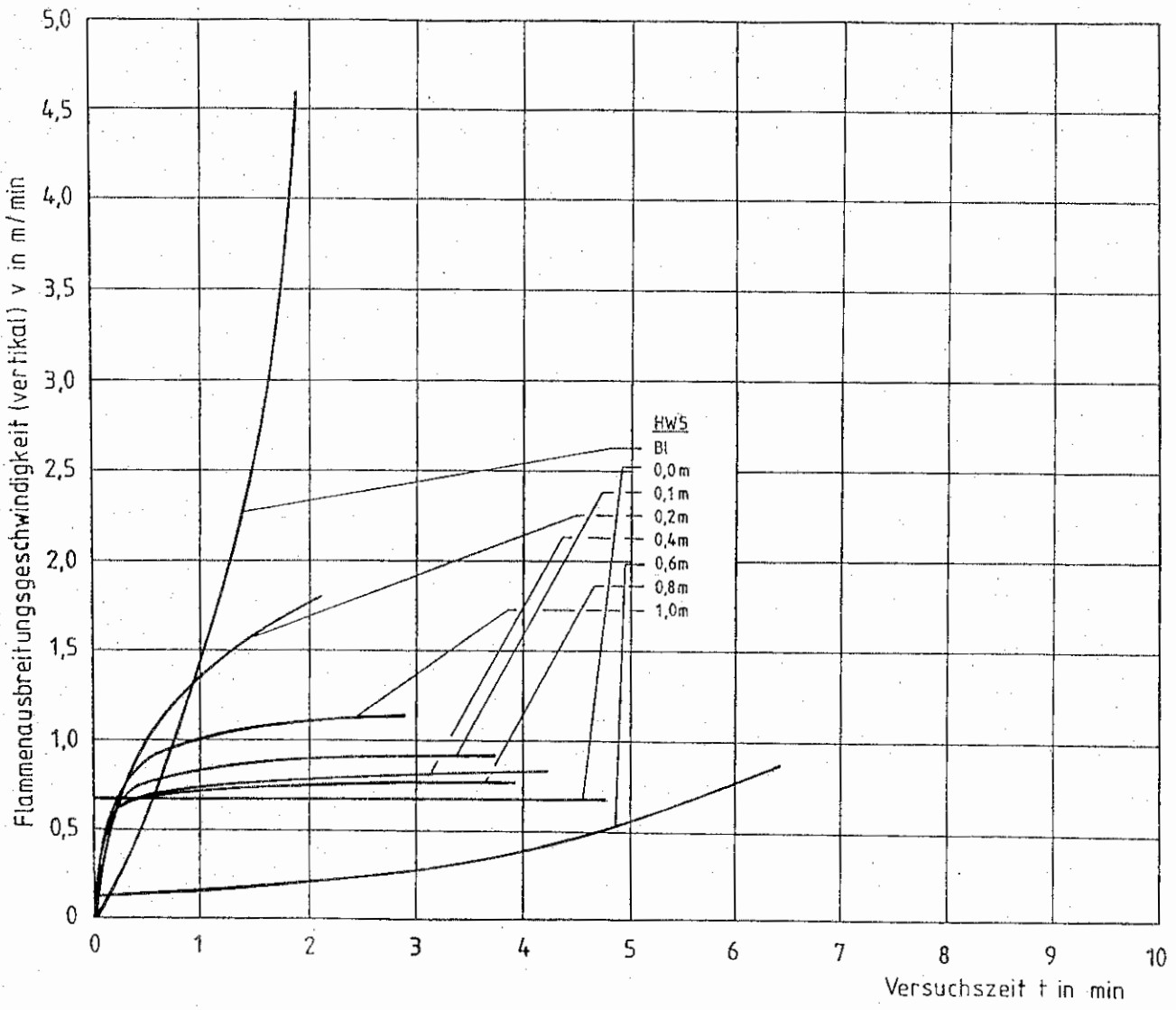



Bild 3.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

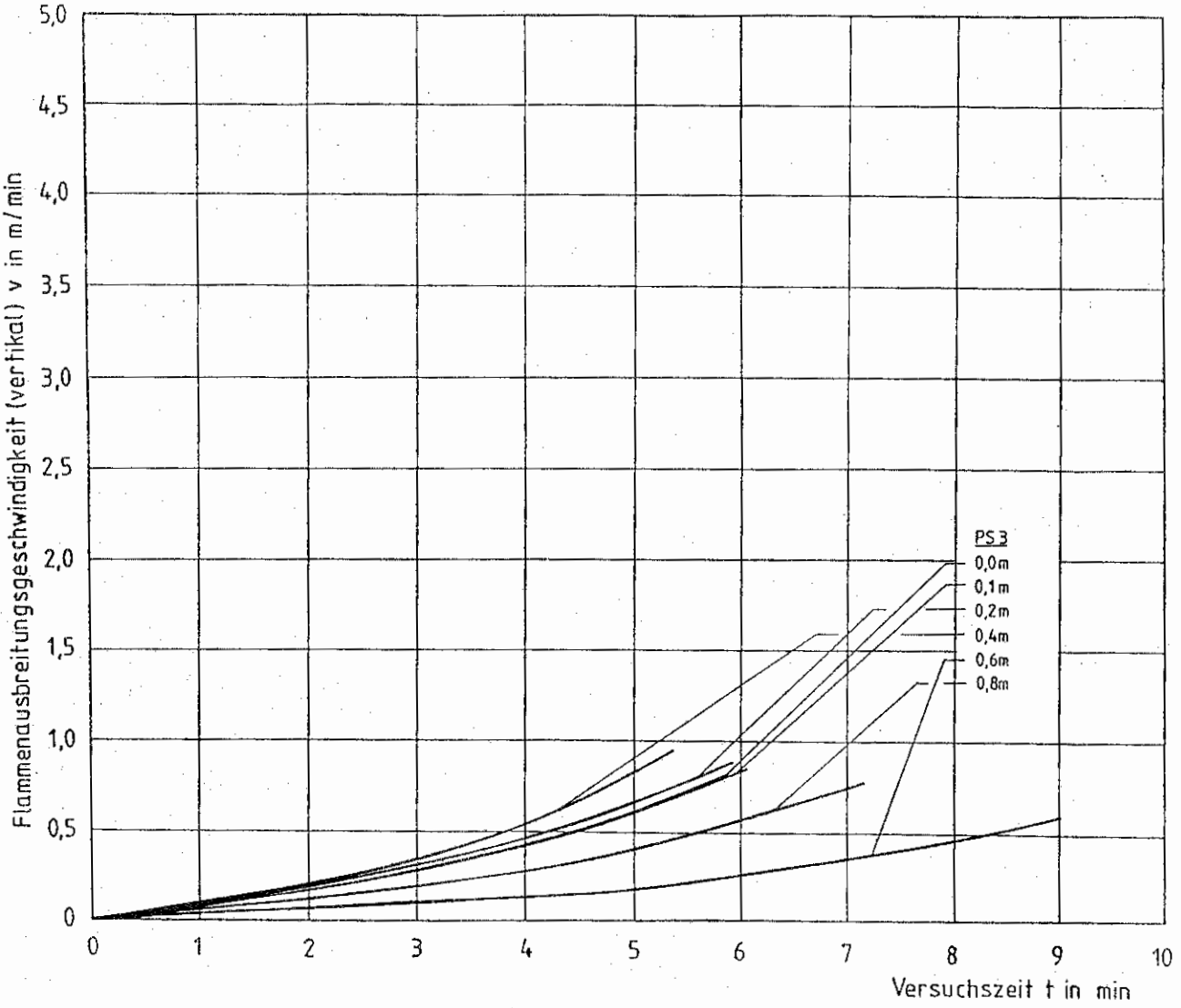



Bild 3.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

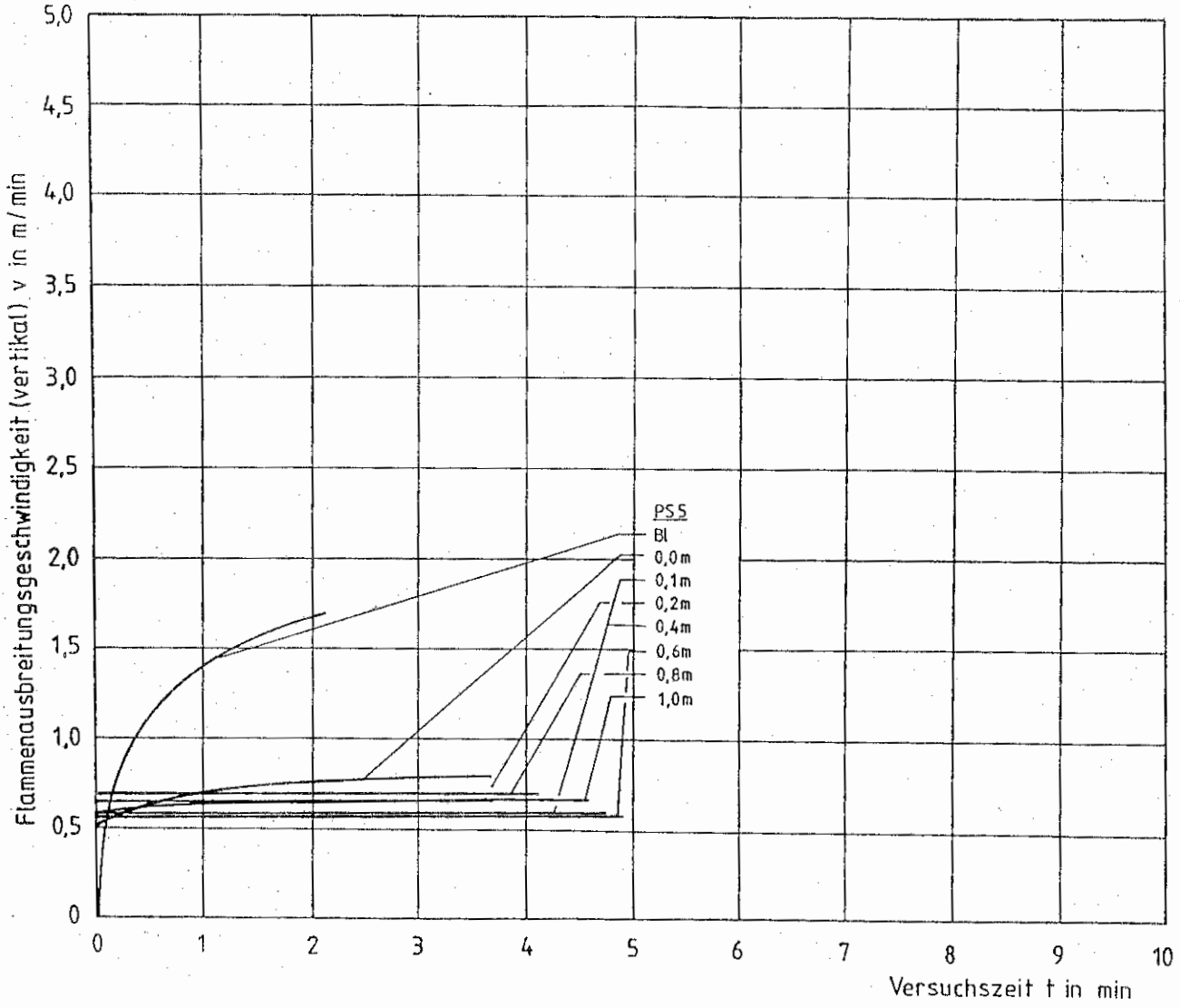



Bild 3.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

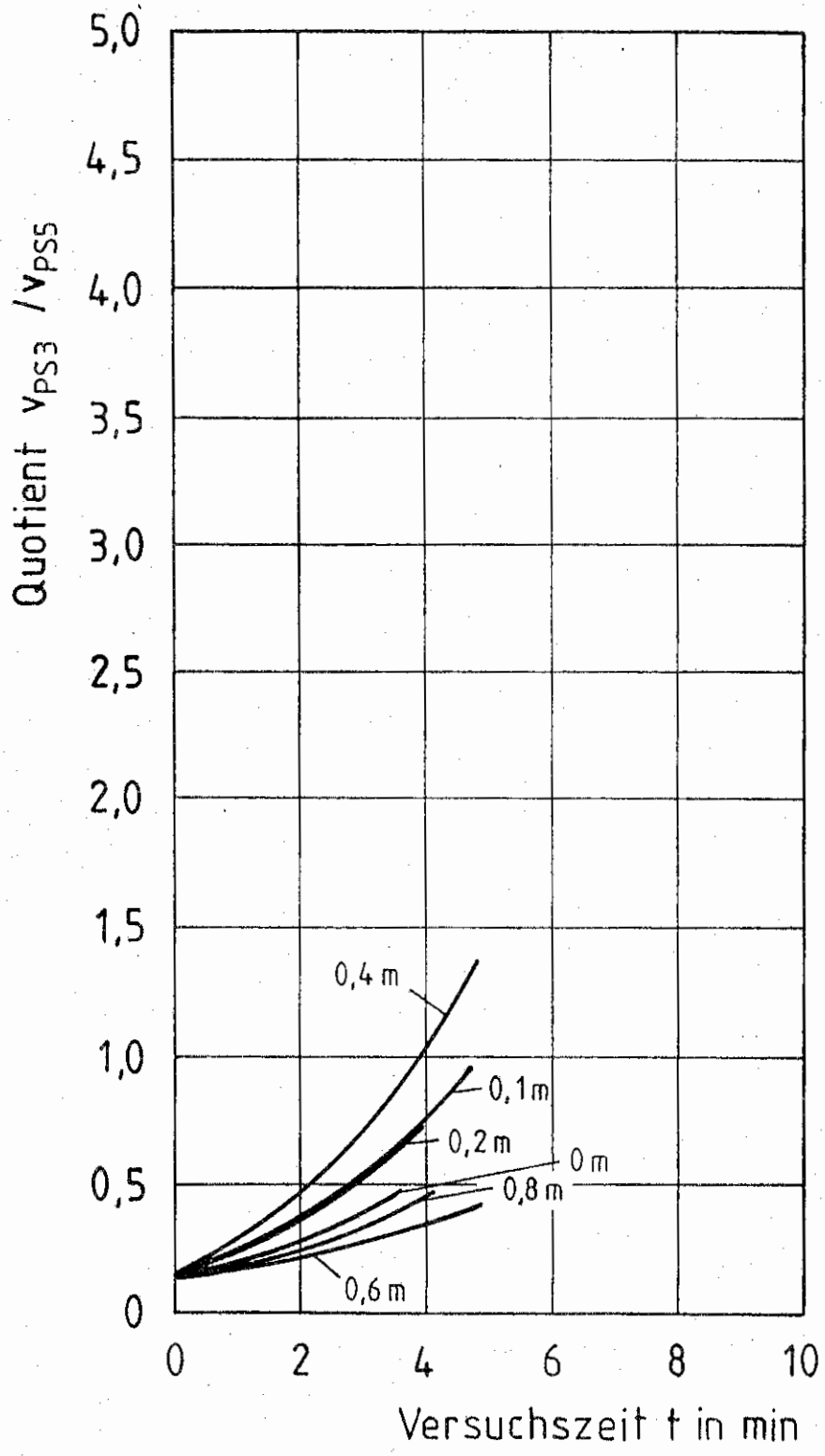



Bild 4 Vergleich der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten (4 Gitterboxenstapel)

Bild 4.1 Quotient $v_{PS3}$ / $v_{PS5}$

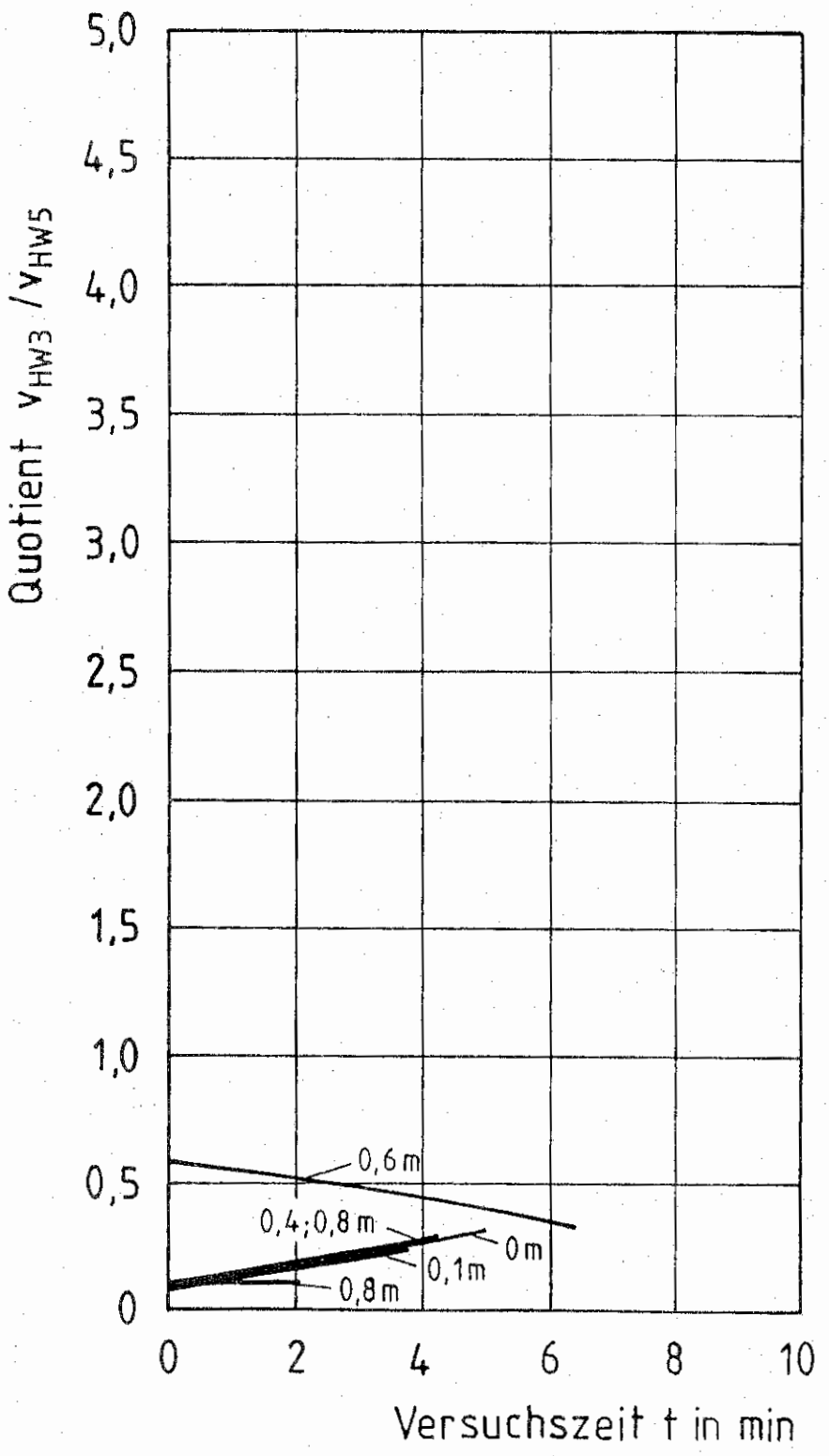



Bild 4.2 Quotient $v_{HW3}$ / $v_{HW5}$

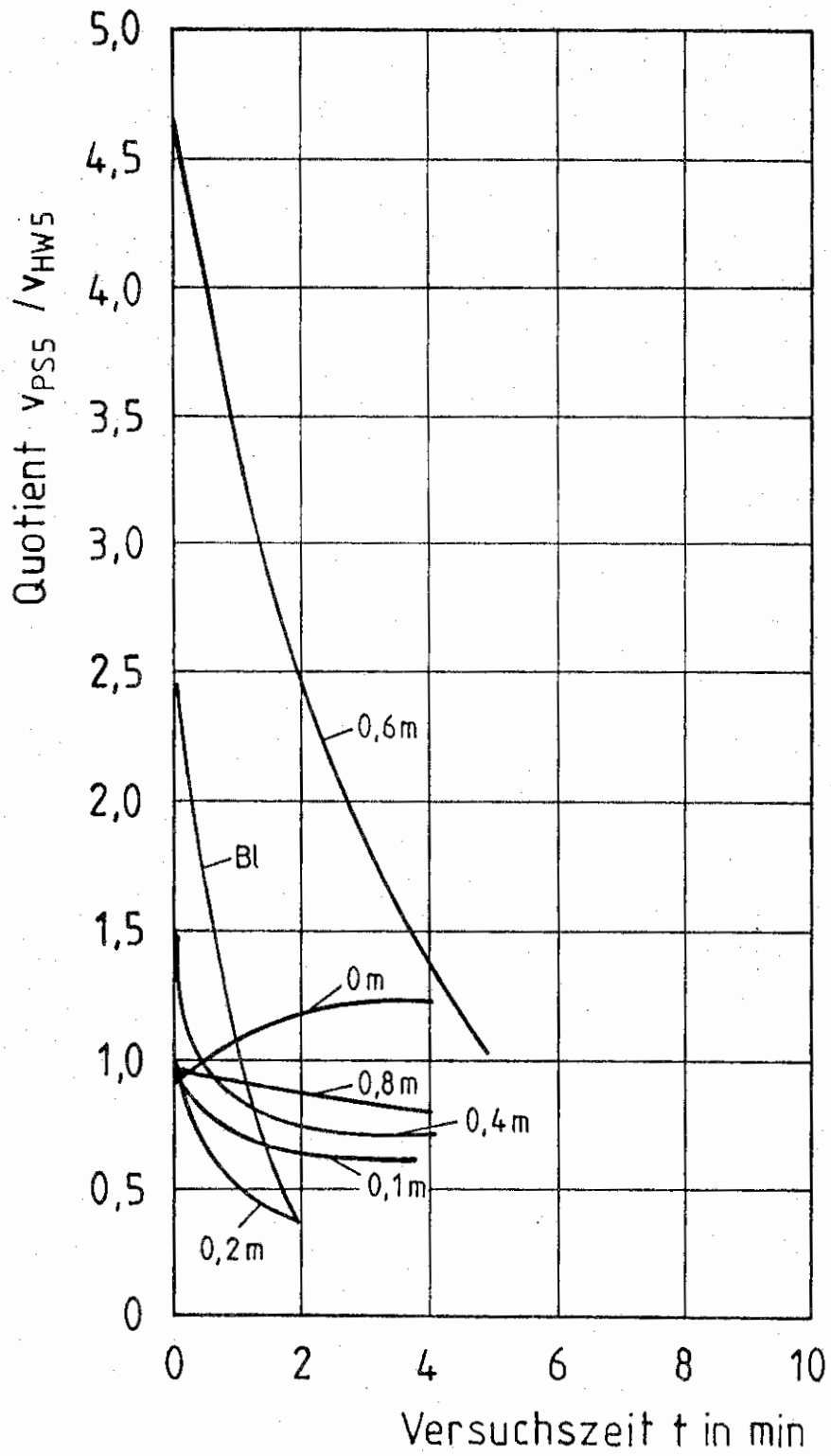



Bild 4.3 Quotient $v_{PS5}$ / $v_{HW5}$

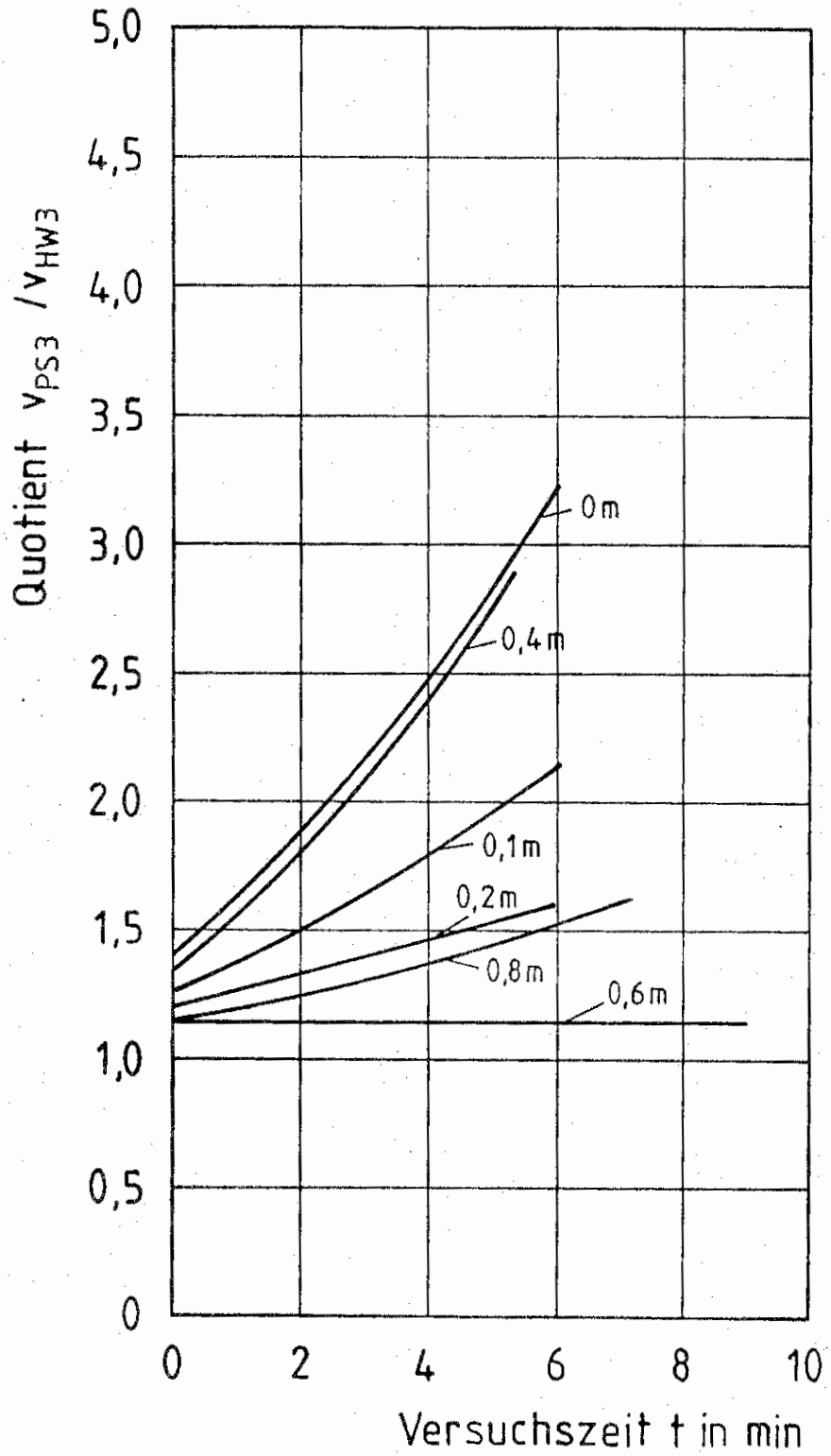



Bild 4.4 Quotient $v_{PS3}$ / $v_{HW3}$

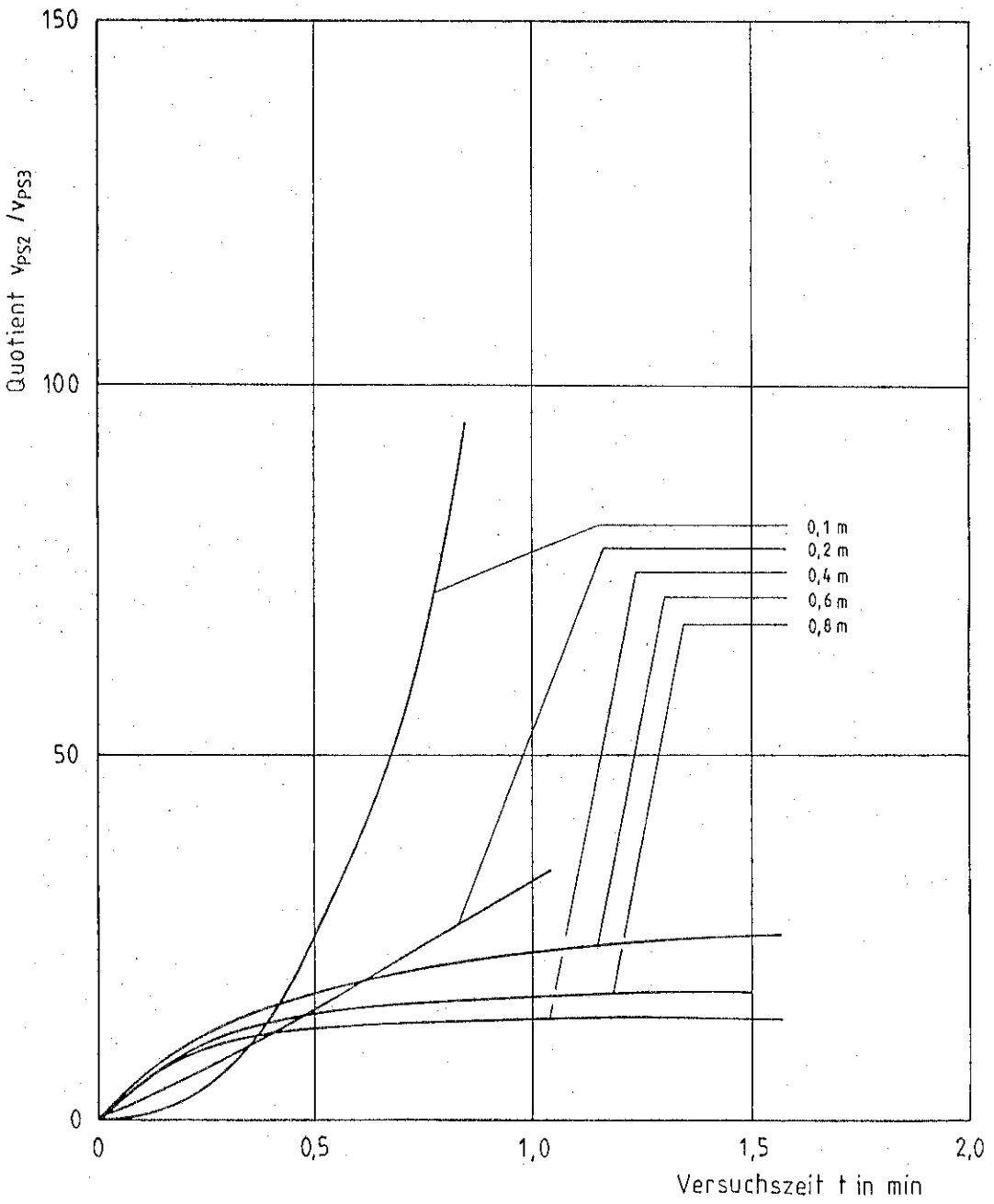



Bild 5 Vergleich der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten (2/4 Gitterboxenstapel)

Bild 5.1 Quotient $v_{PS2}$ / $v_{PS3}$

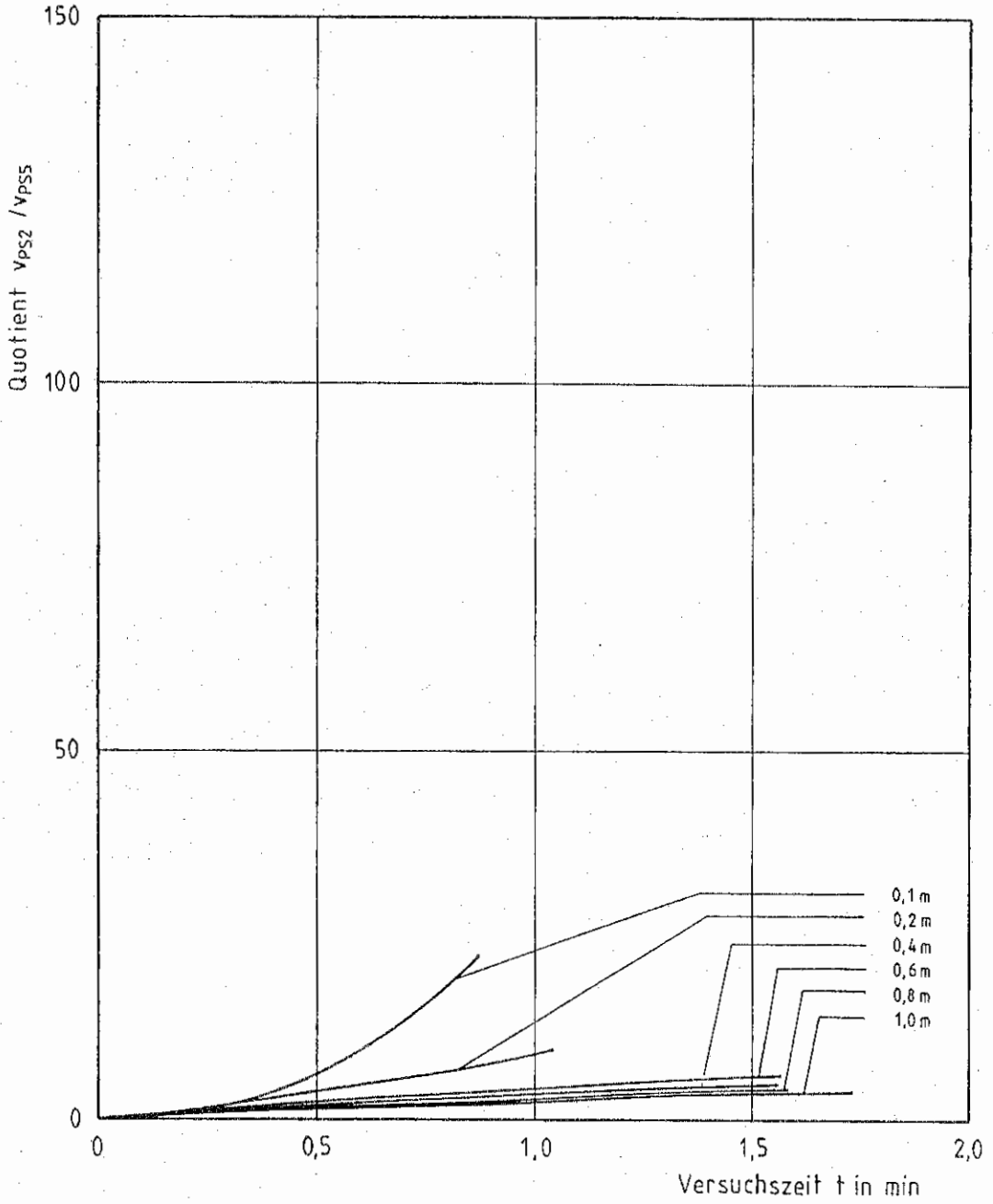



Bild 5.2 Quotient $v_{PS2}$ / $v_{PS5}$

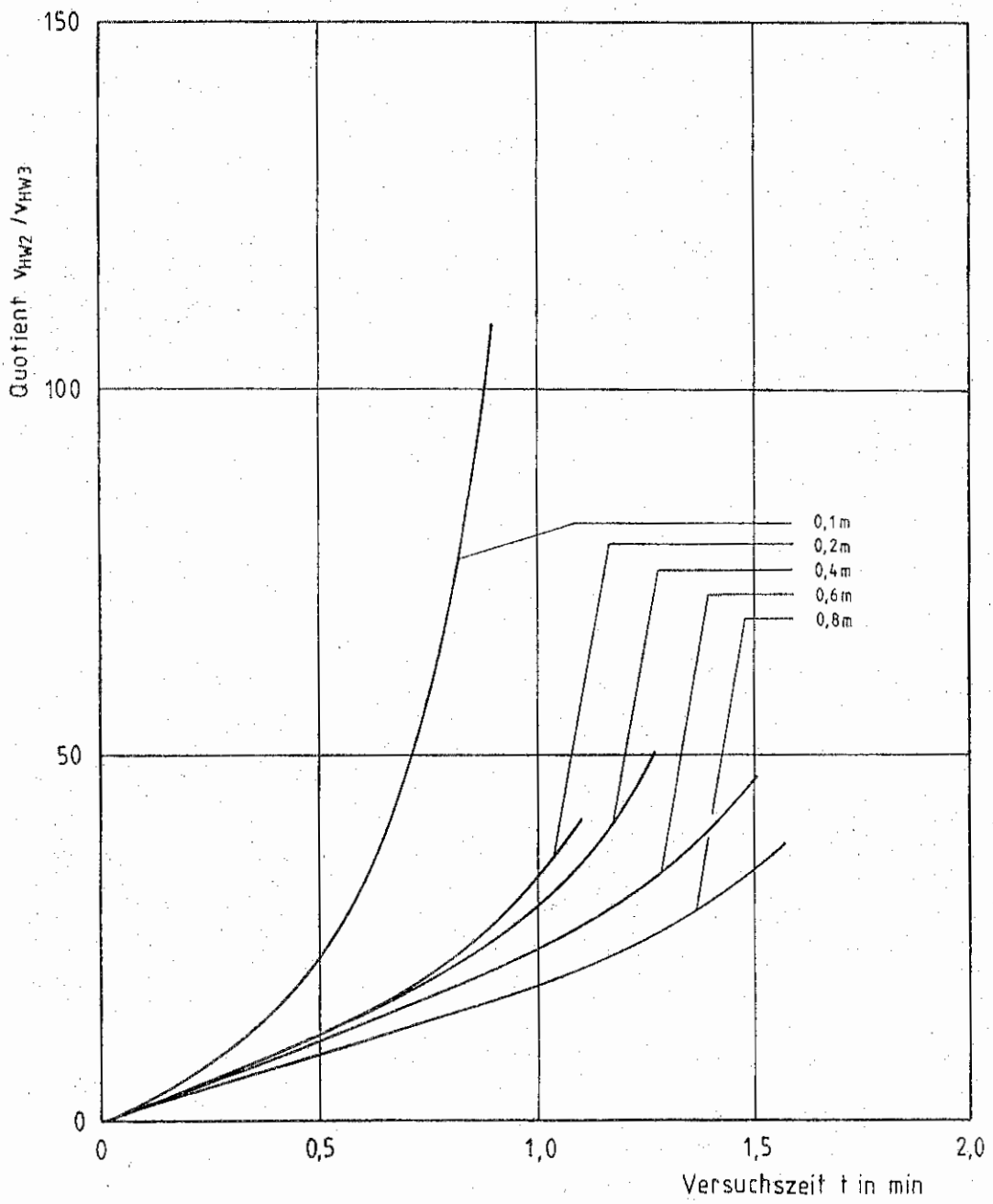



Bild 5.3 Quotient $v_{HW2}$ / $v_{HW3}$

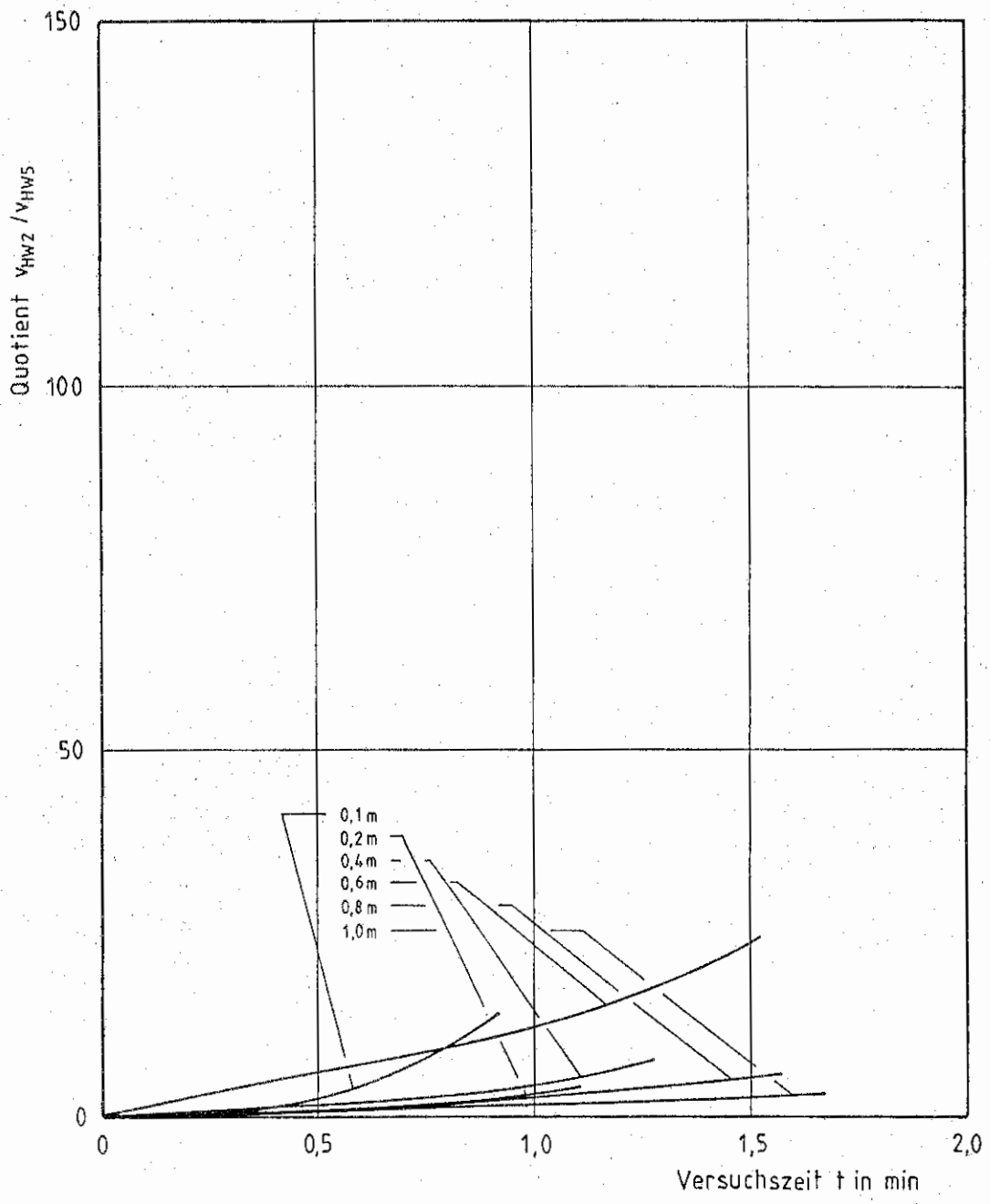



Bild 5.4 Quotient $v_{HW2}$ / $v_{HW5}$

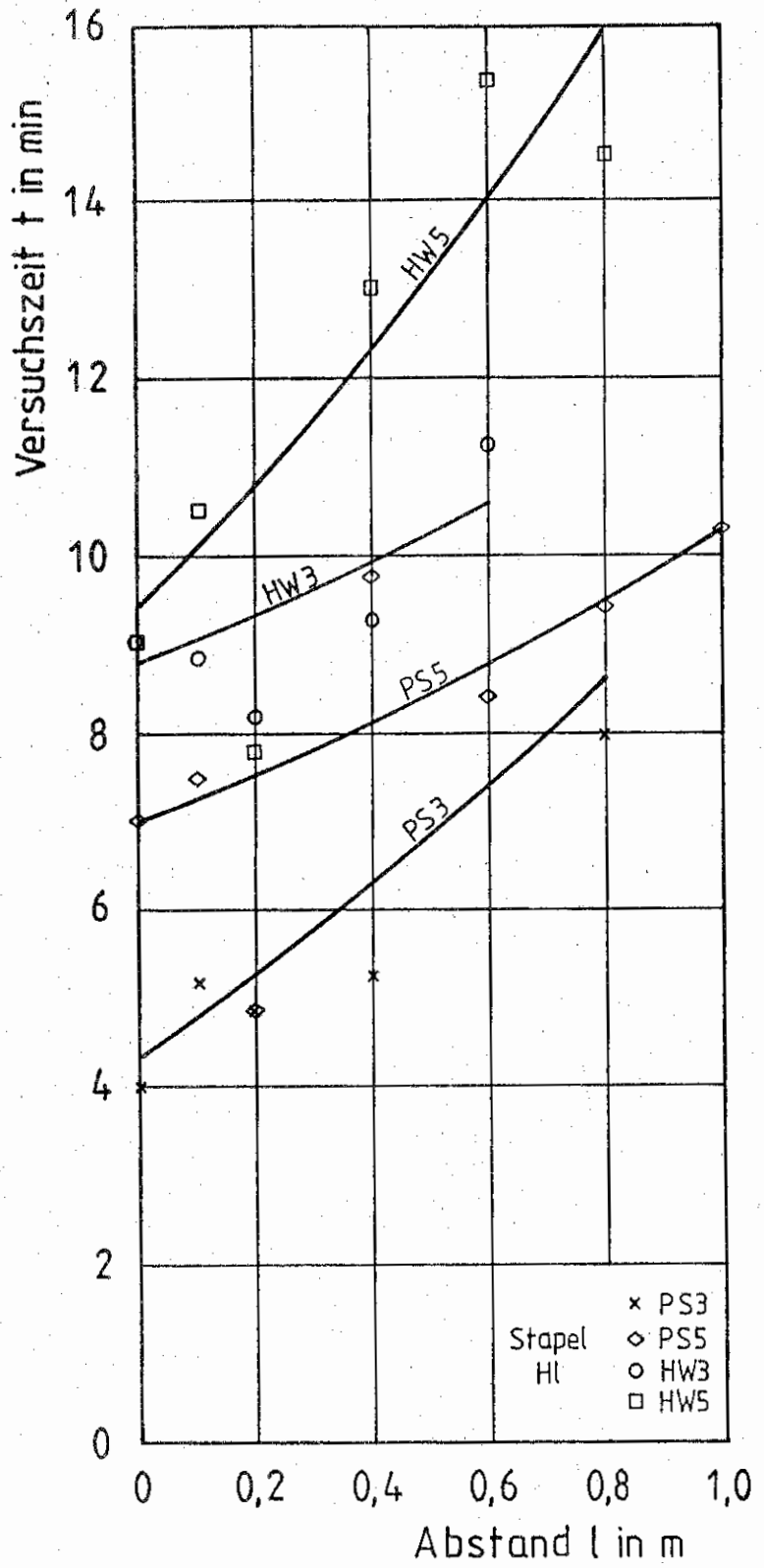



Bild 6 Versuchszeit, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzünden.

Bild 6.1 Zündung Stapel HL (s.Bild 1)

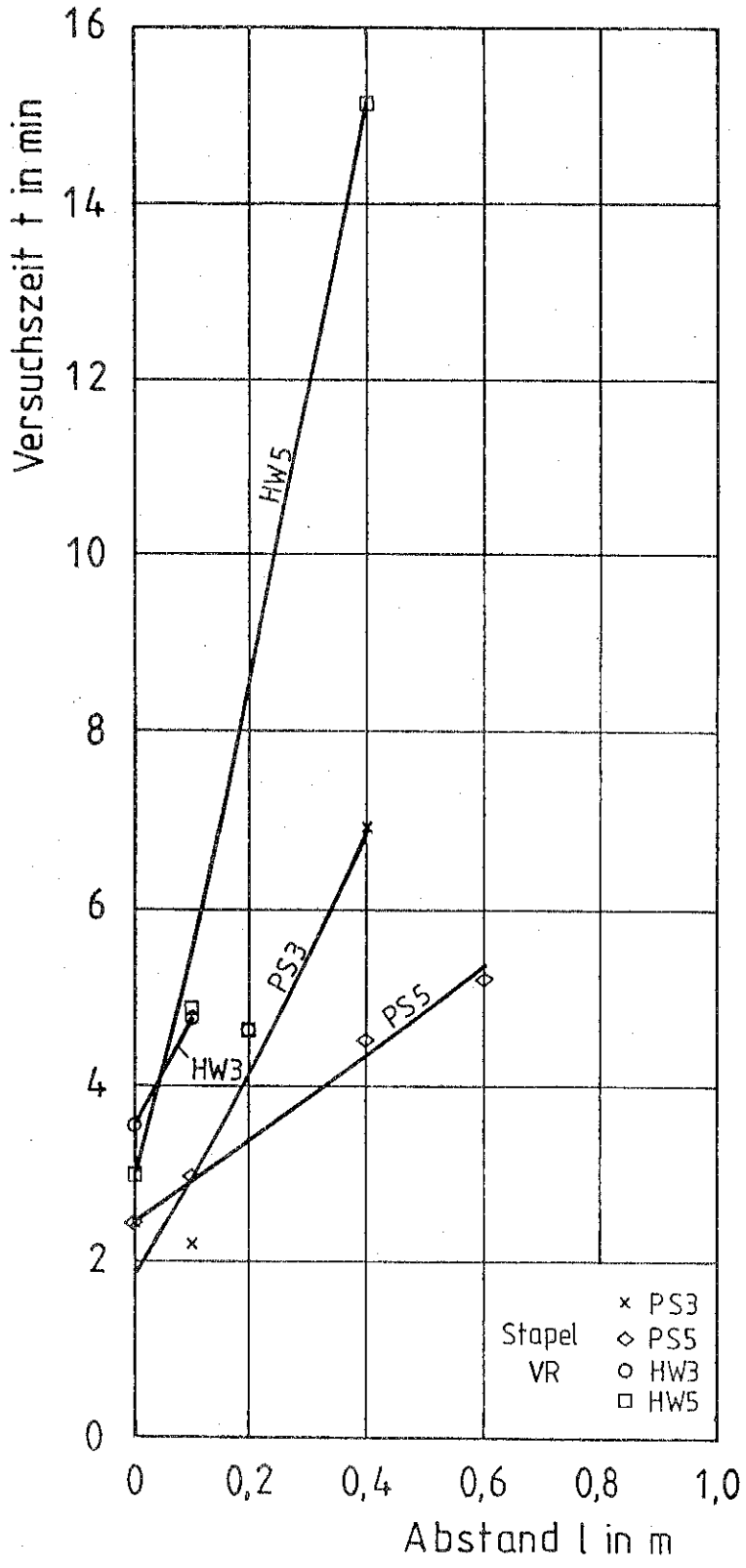



Bild 6.2 Zündung Stapel VR (s.Bild 1)

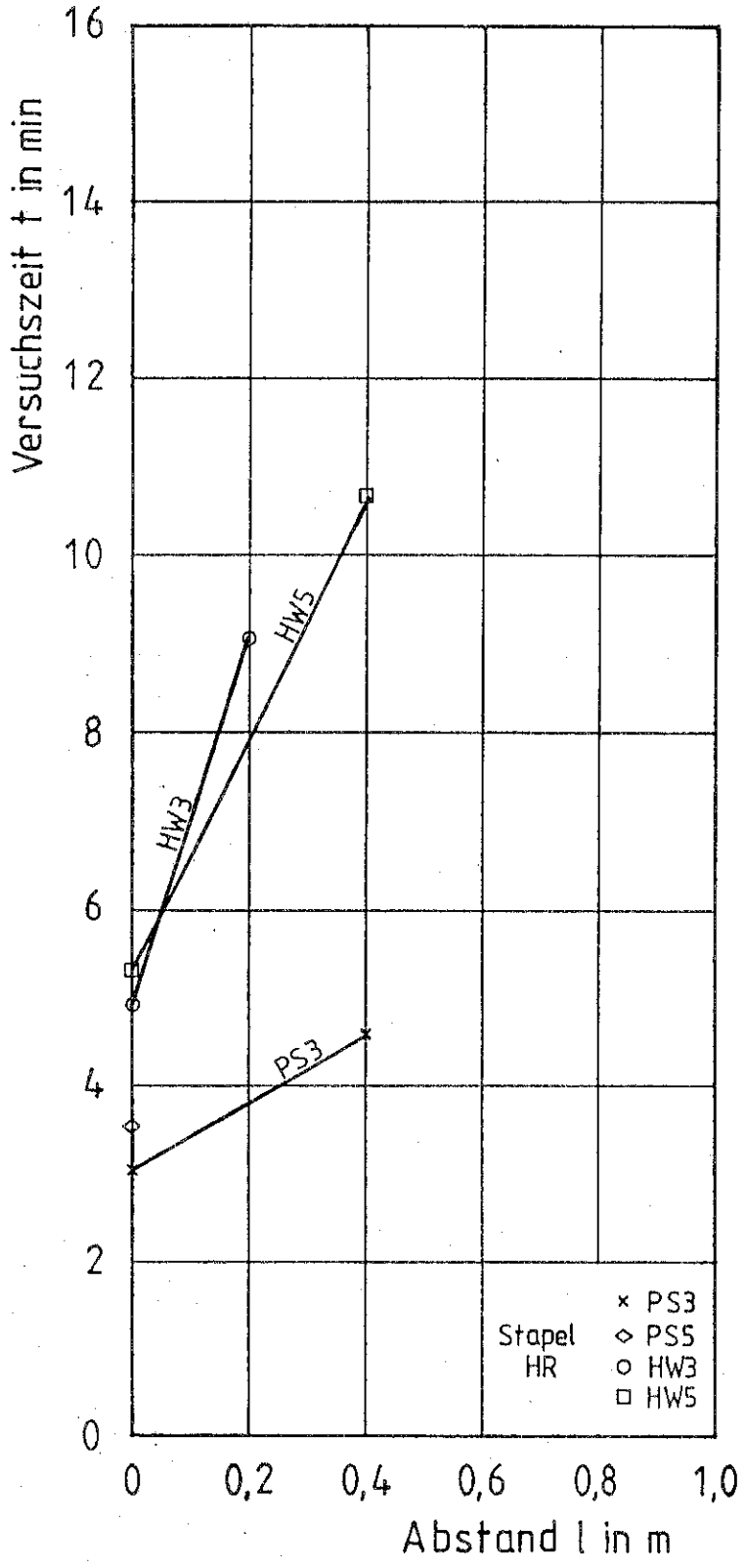



Bild 6.3 Zündung Stapel HR (s.Bild 1)

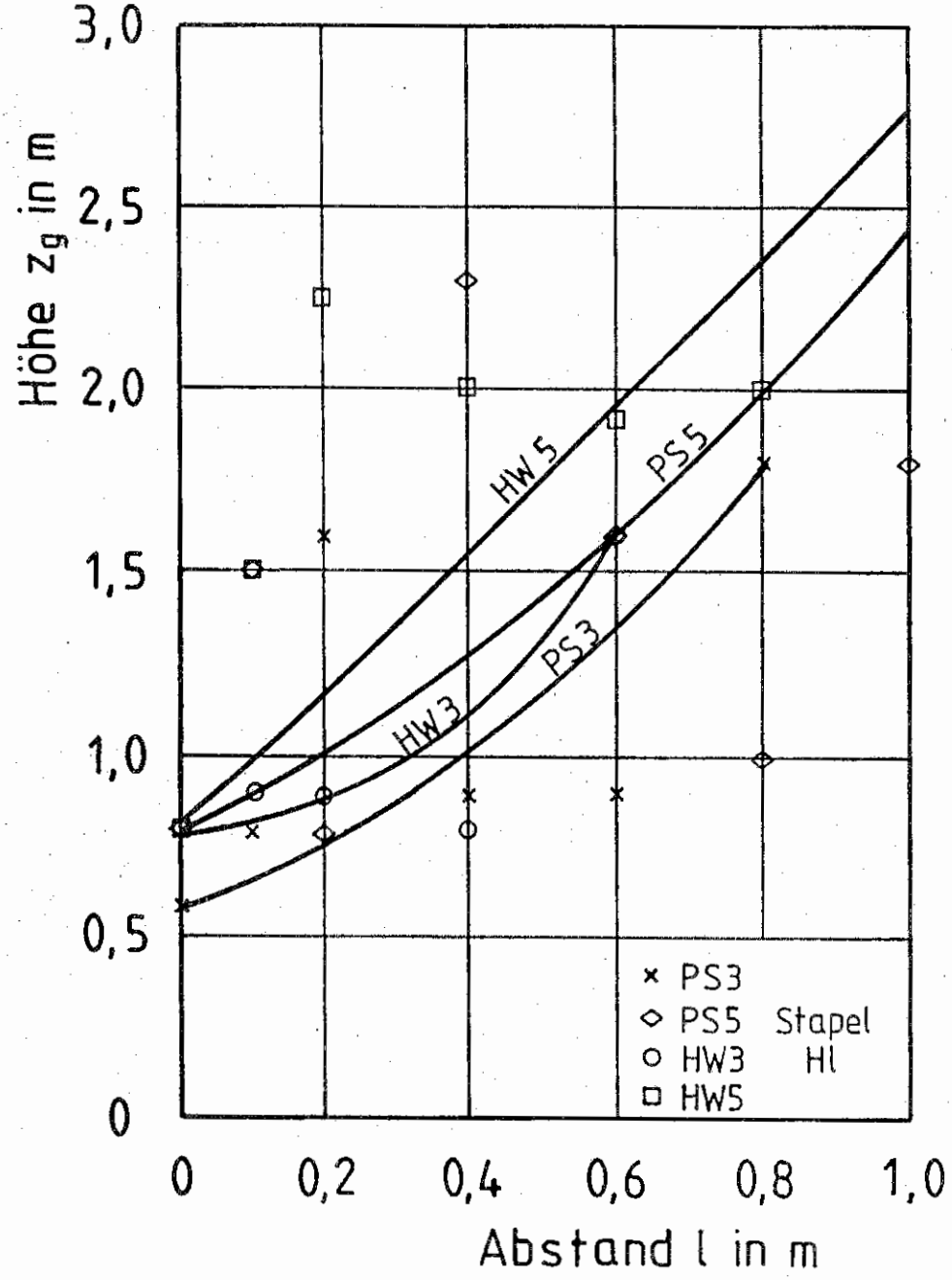



Bild 7 Höhe, bei der sich die Lagerstapel durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzündet.

Bild 7.1 Zündung Stapel HL (s.Bild 1)

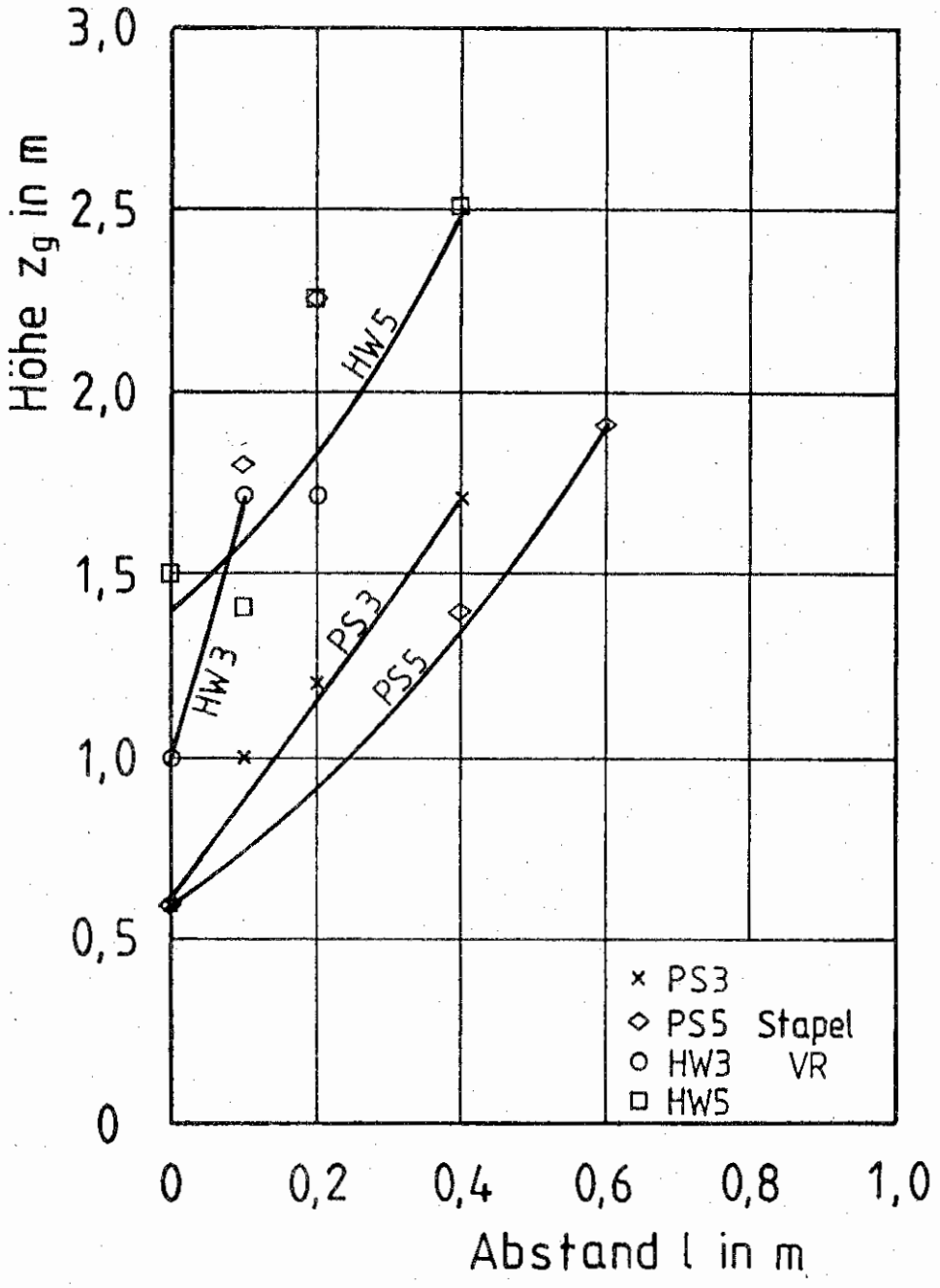



Bild 7.2 Zündung Stapel VR (s.Bild 1)

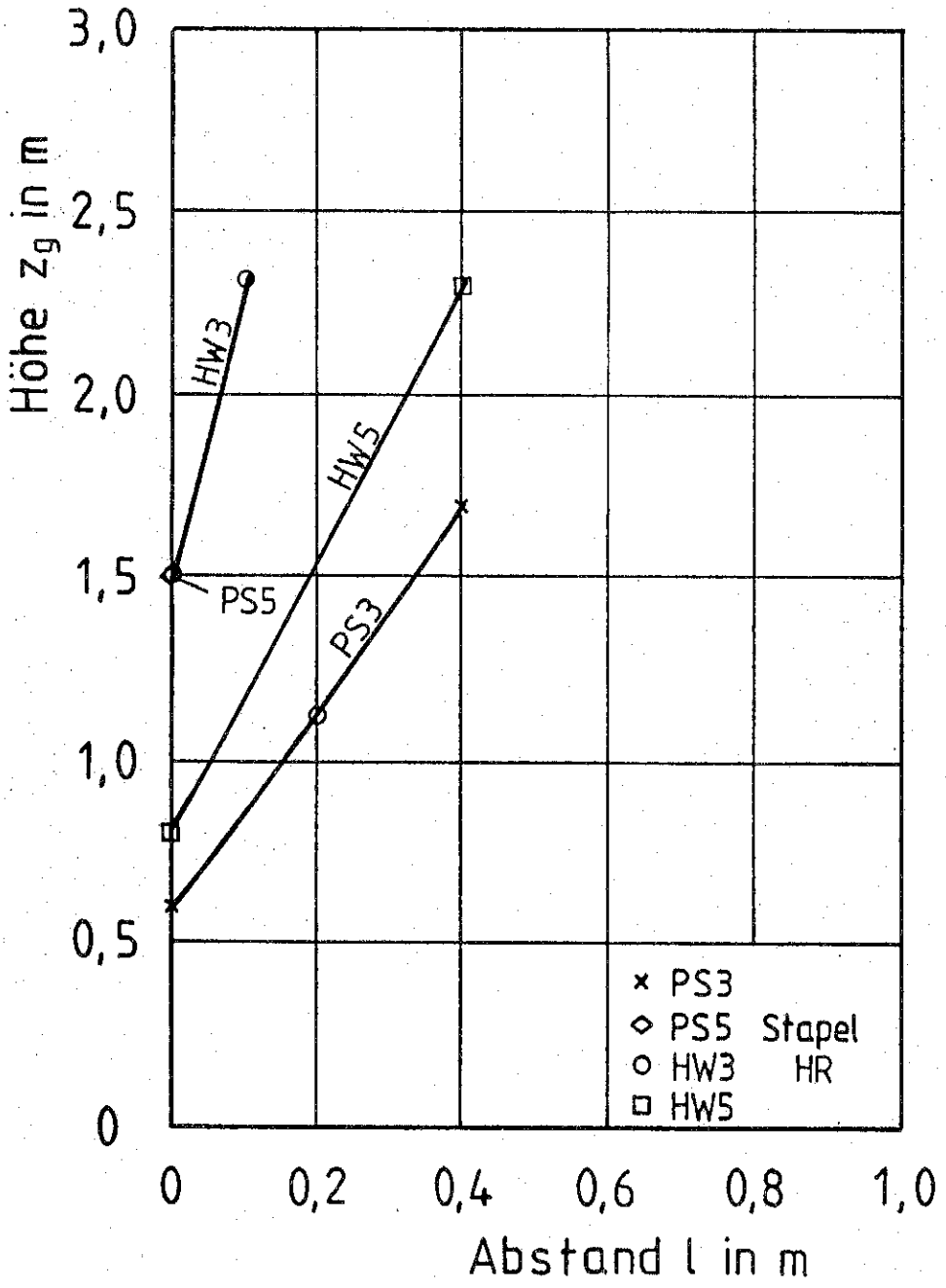



Bild 7.3 Zündung Stapel HR (s.Bild 1)

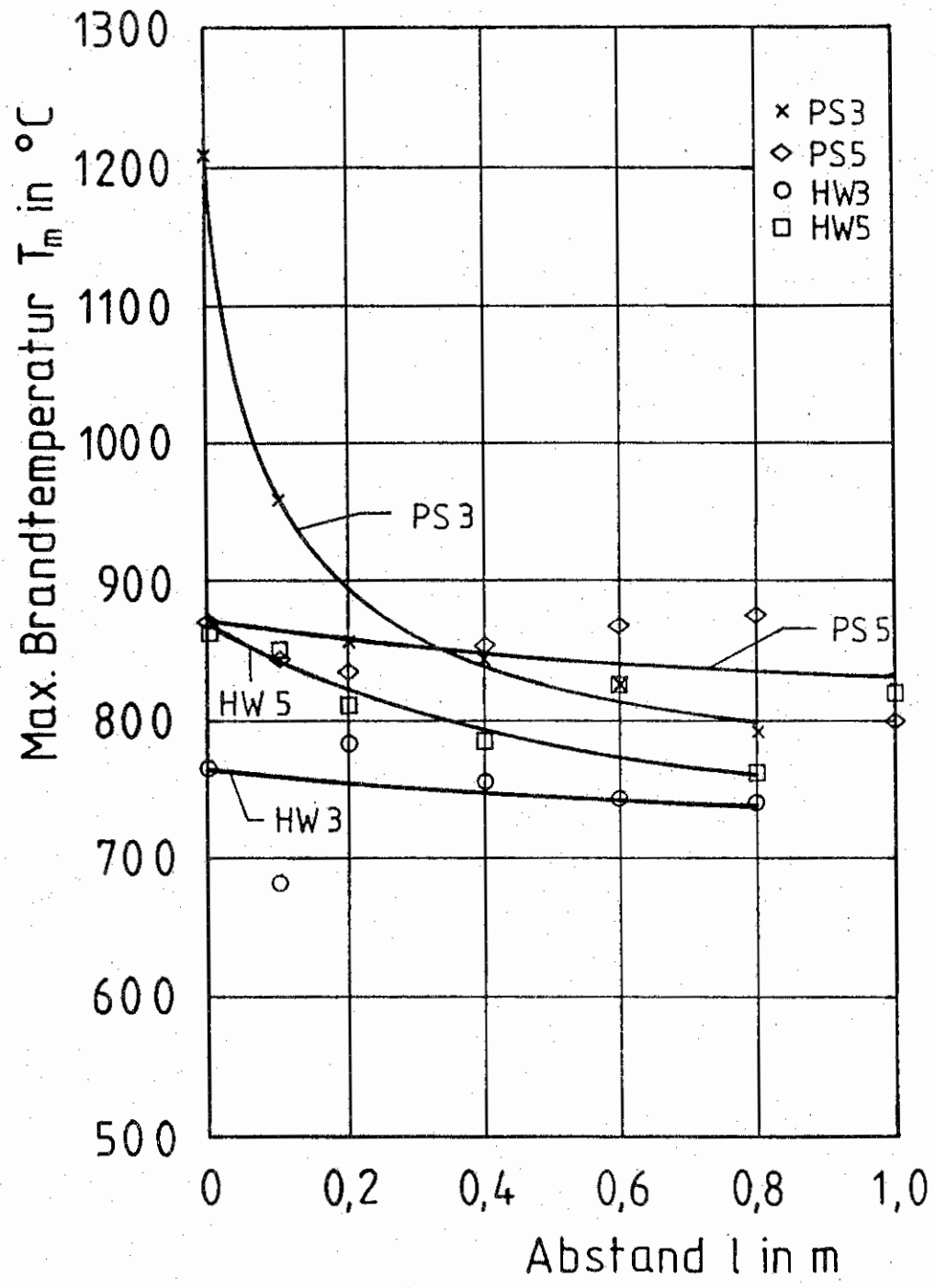



Bild 8 Maximale Brandtemperatur als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Stoßschutzmaterialien.

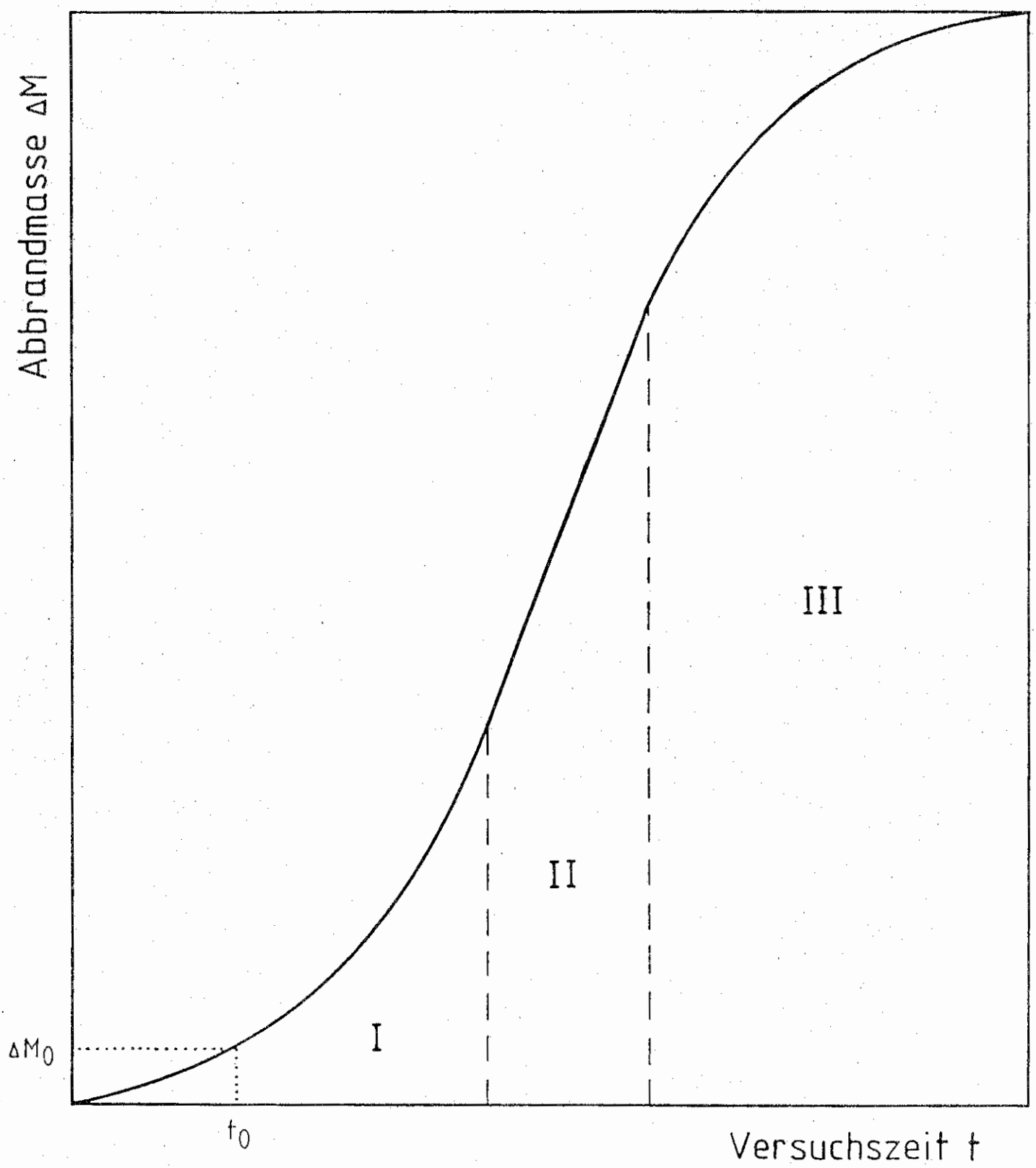



Bild 9 Vollständiger Verlauf der Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit nach /5/.
Bereich I Brandentwicklungsphase
Bereich II Stationärer Abbrand
Bereich III Abklingphase

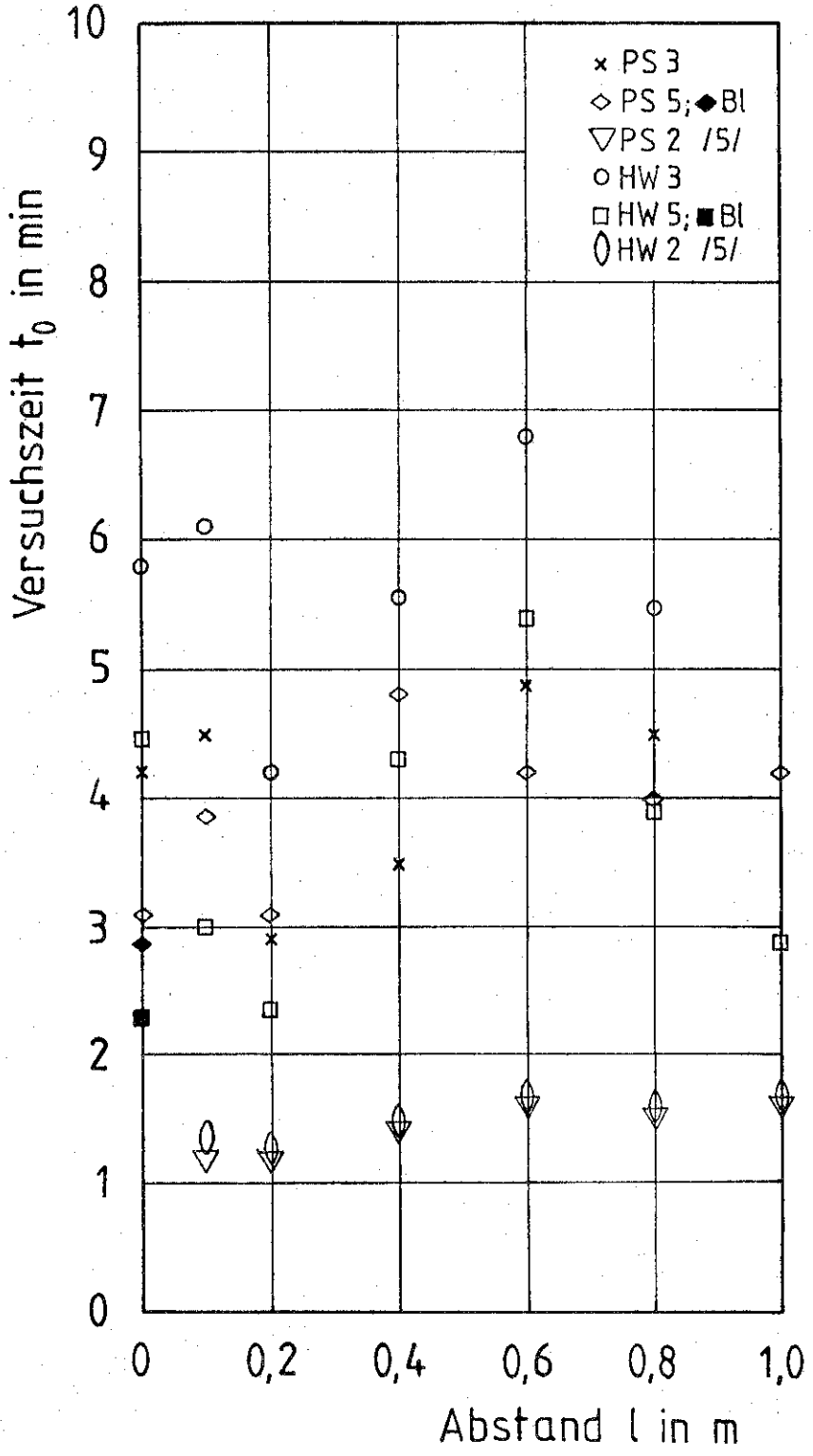



Bild 10 Versuchszeit $t_0$ als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Lagerkonfigurationen und Stoßschutzmaterialien.

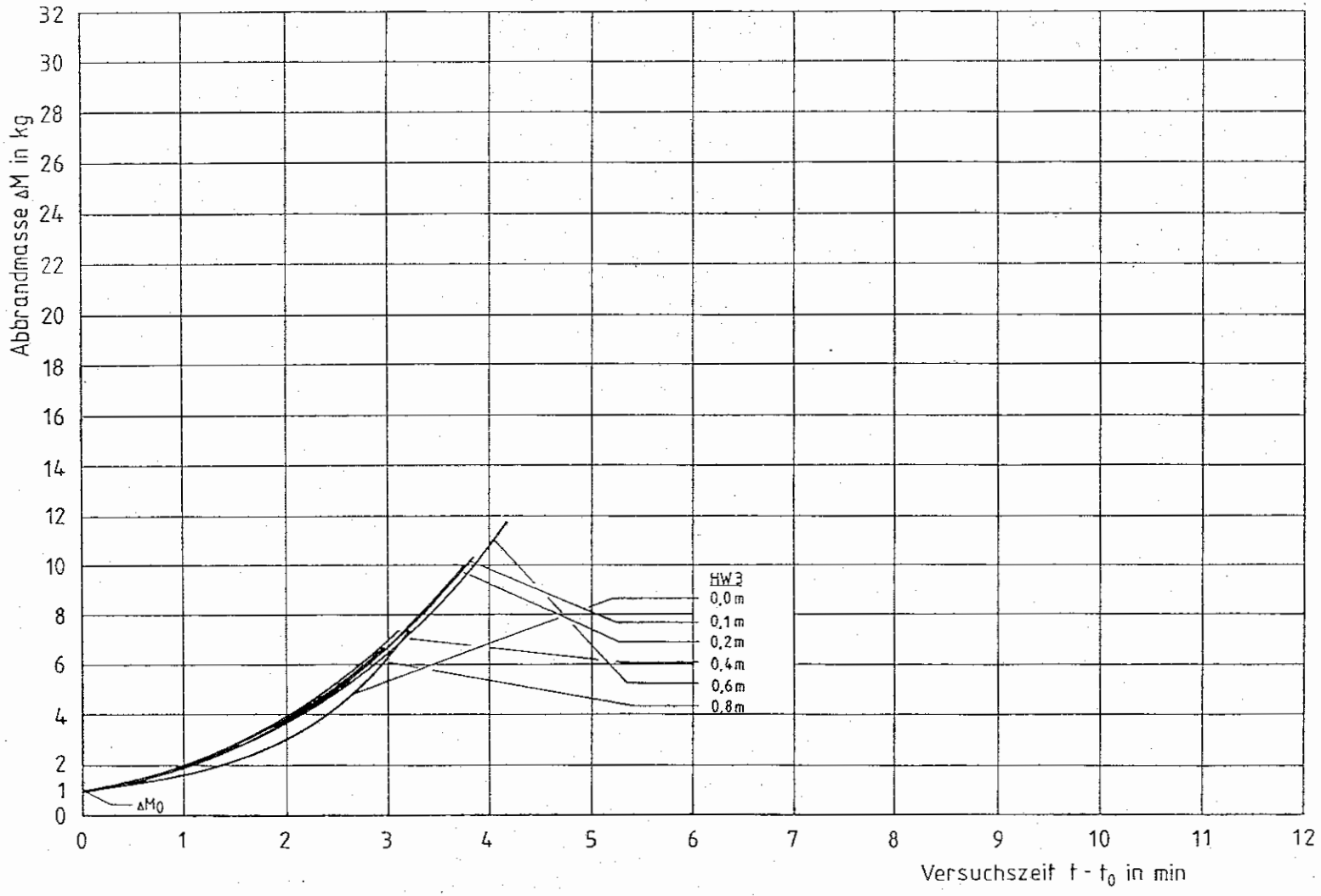



Bild 11 Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

Bild 11.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

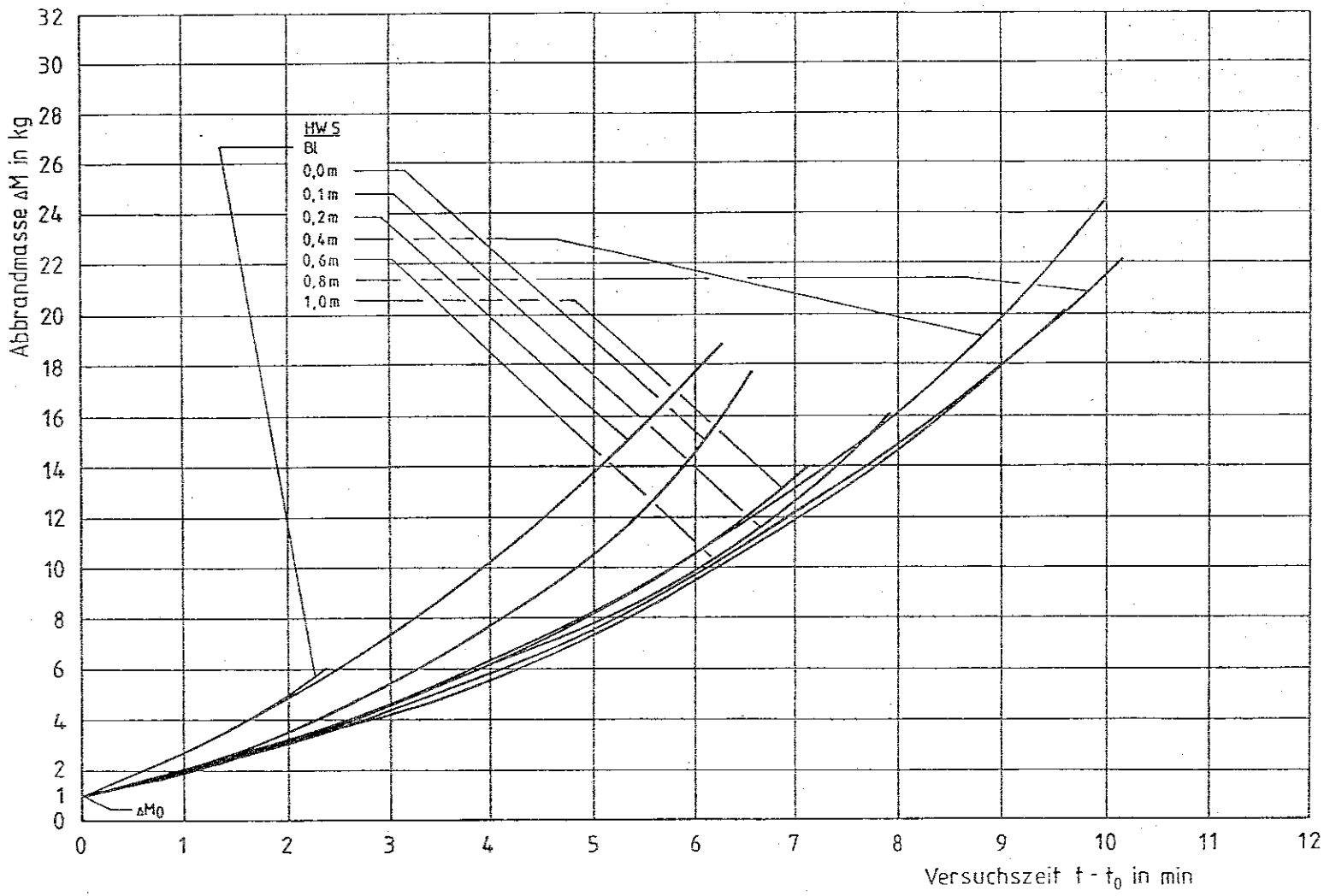



Bild 11.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

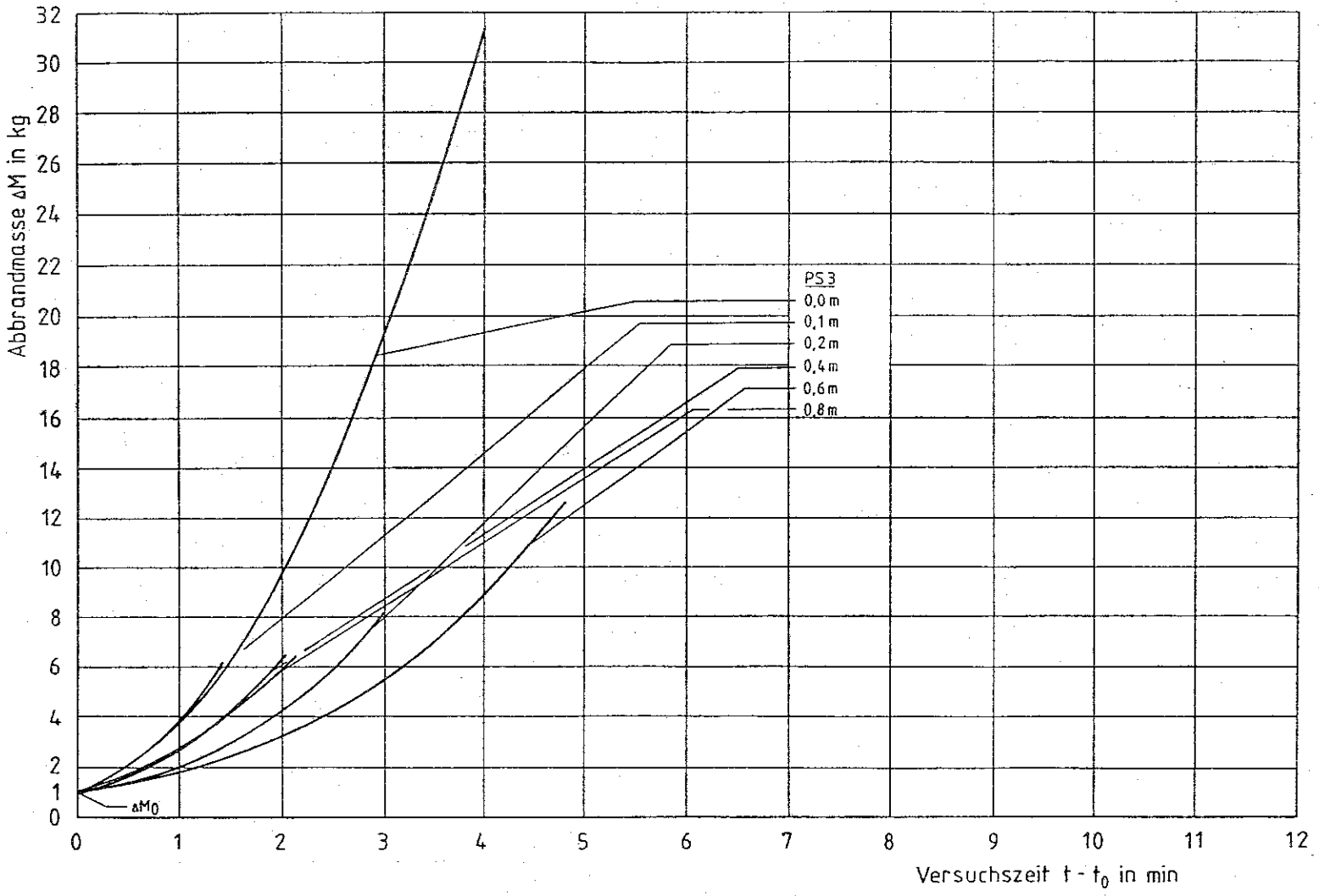



Bild 11.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

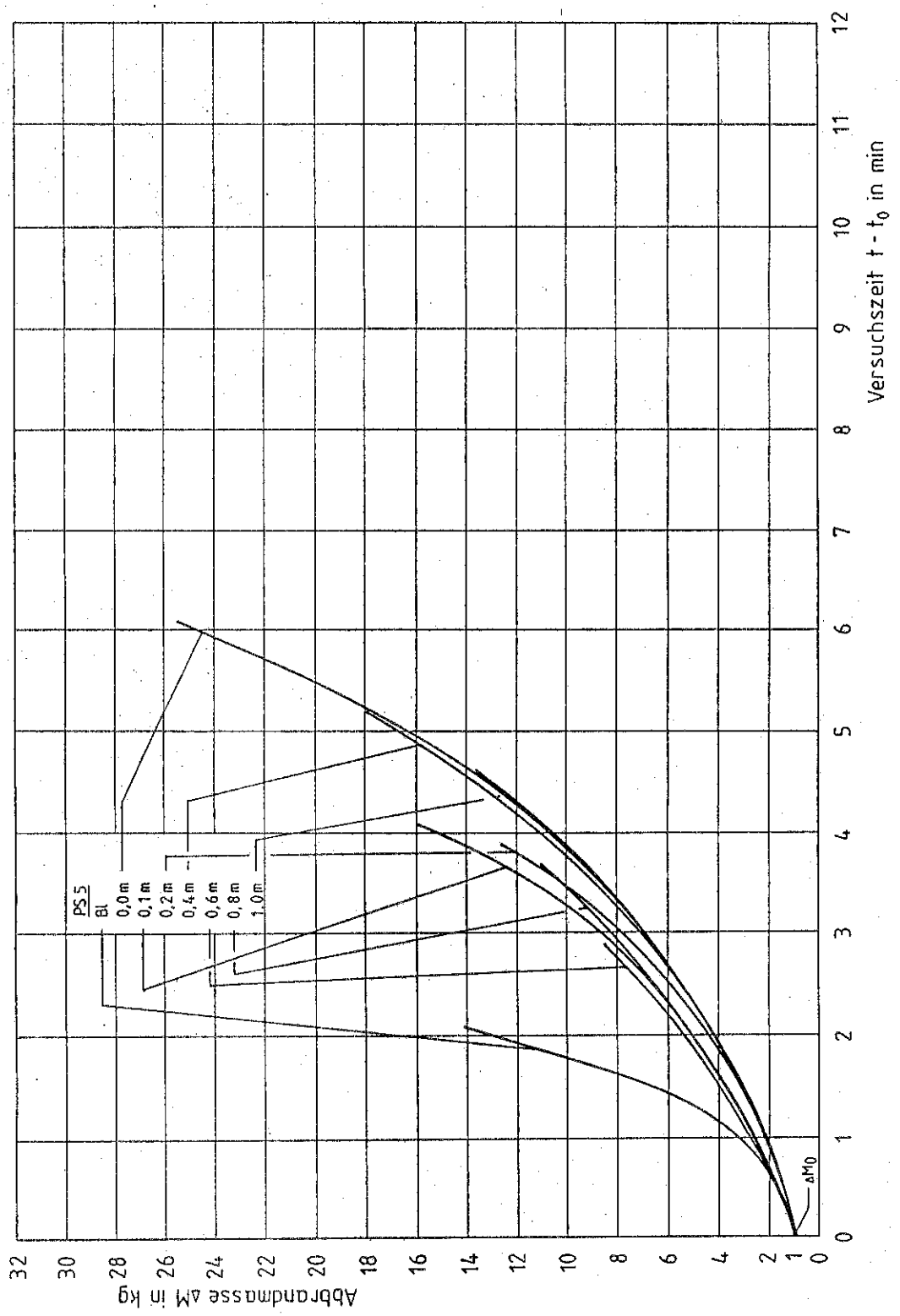



Bild 11.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

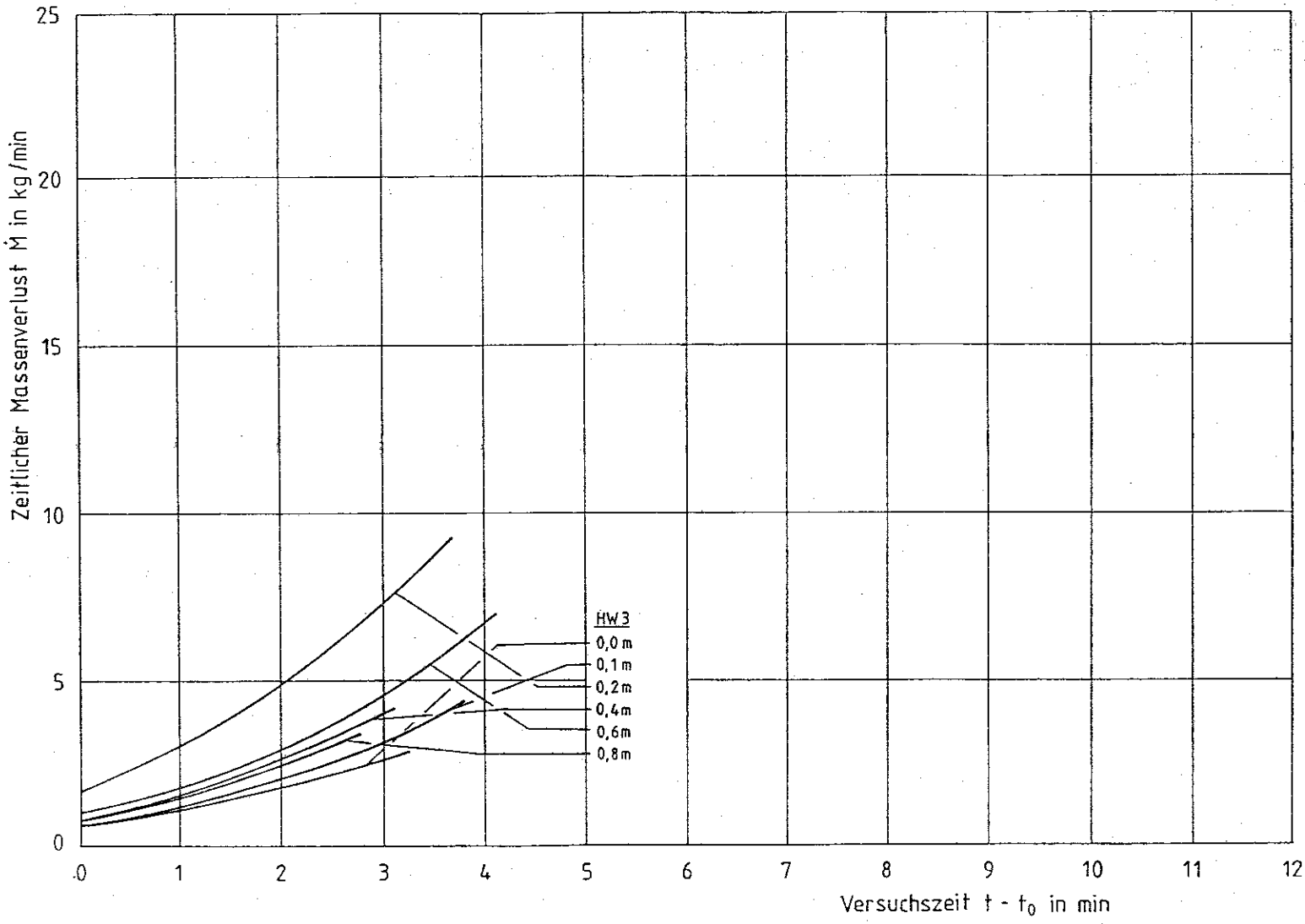



Bild 12 Zeitlicher Massenverlust als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

Bild 12.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

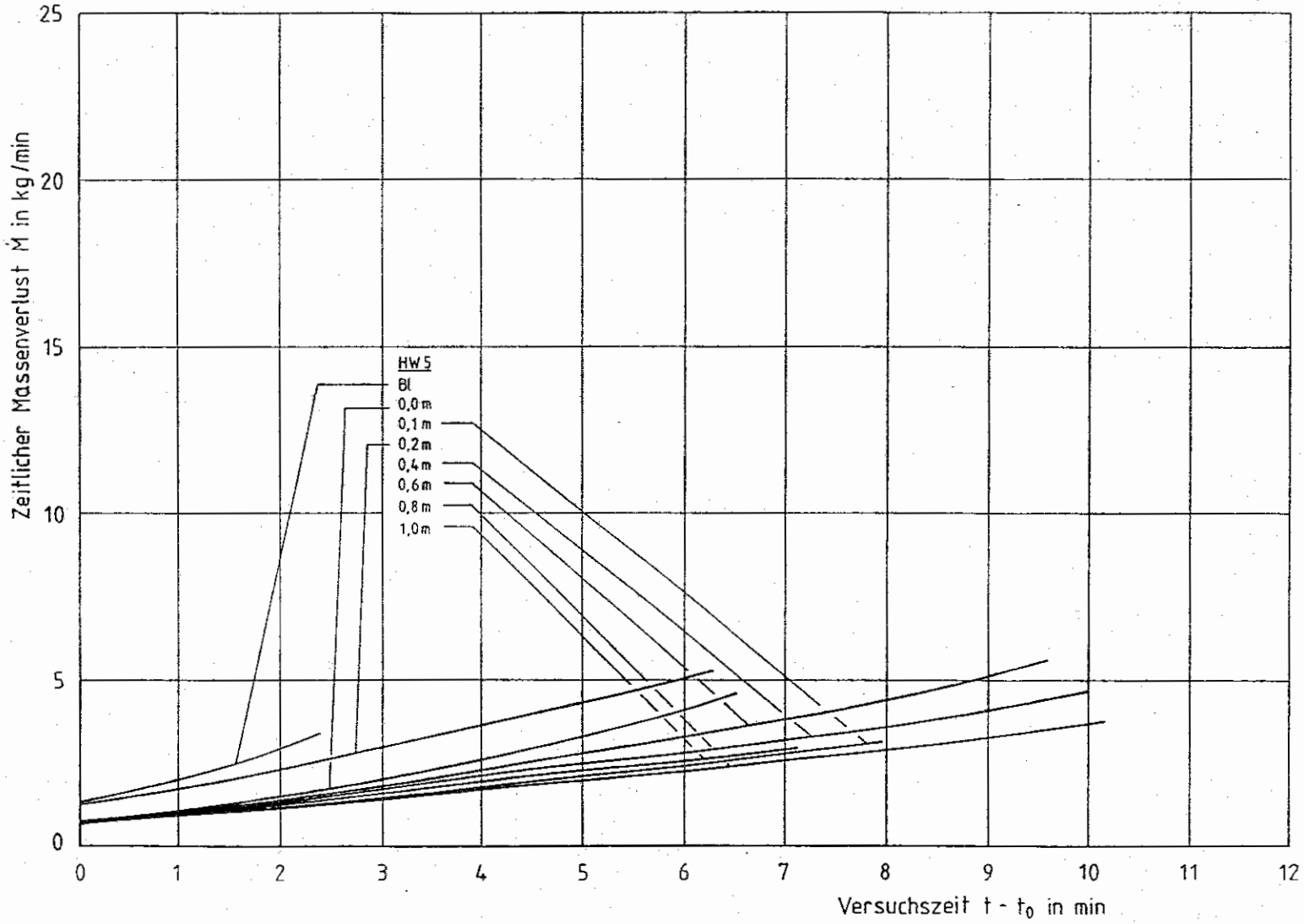



Bild 12.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

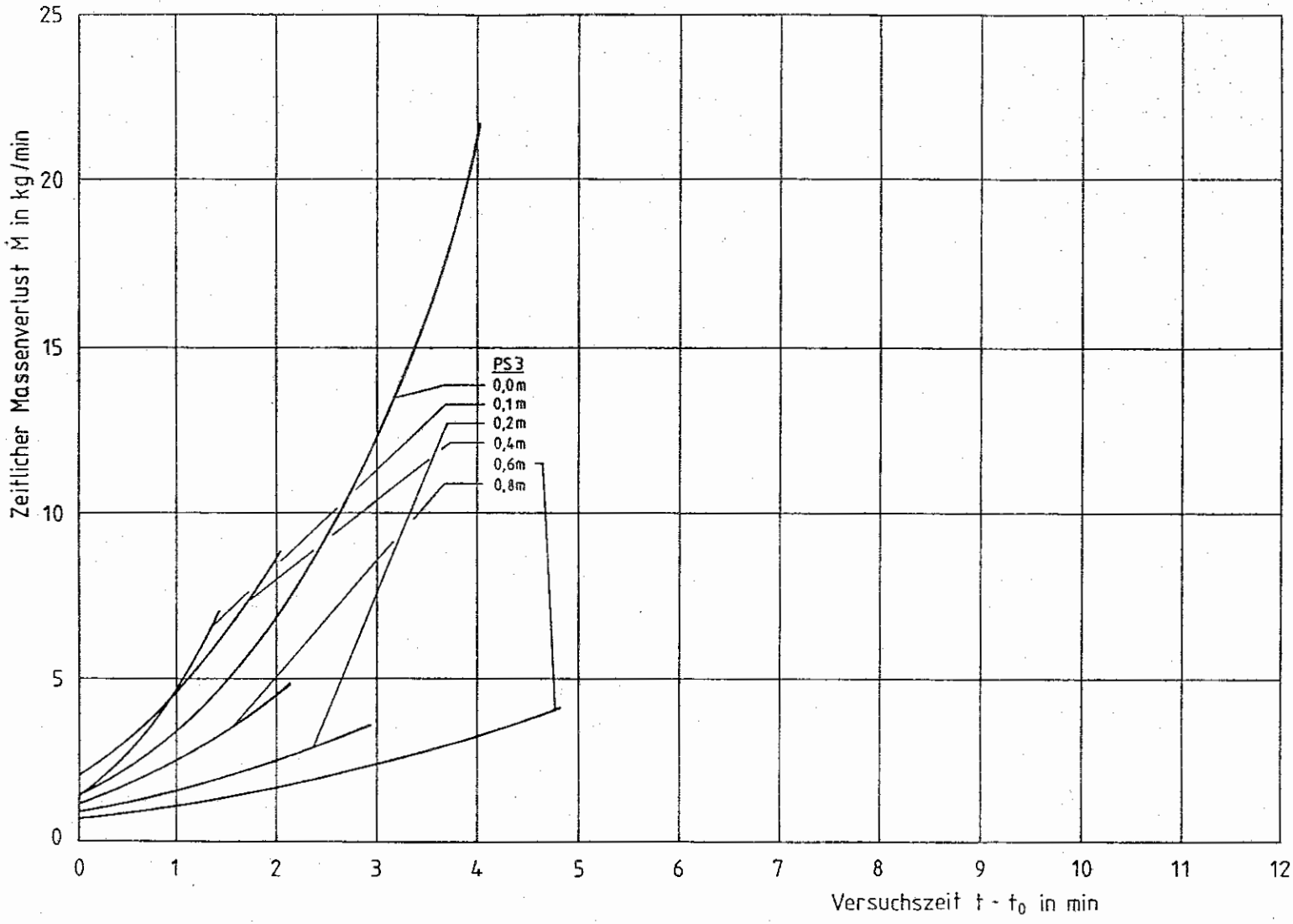



Bild 12.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

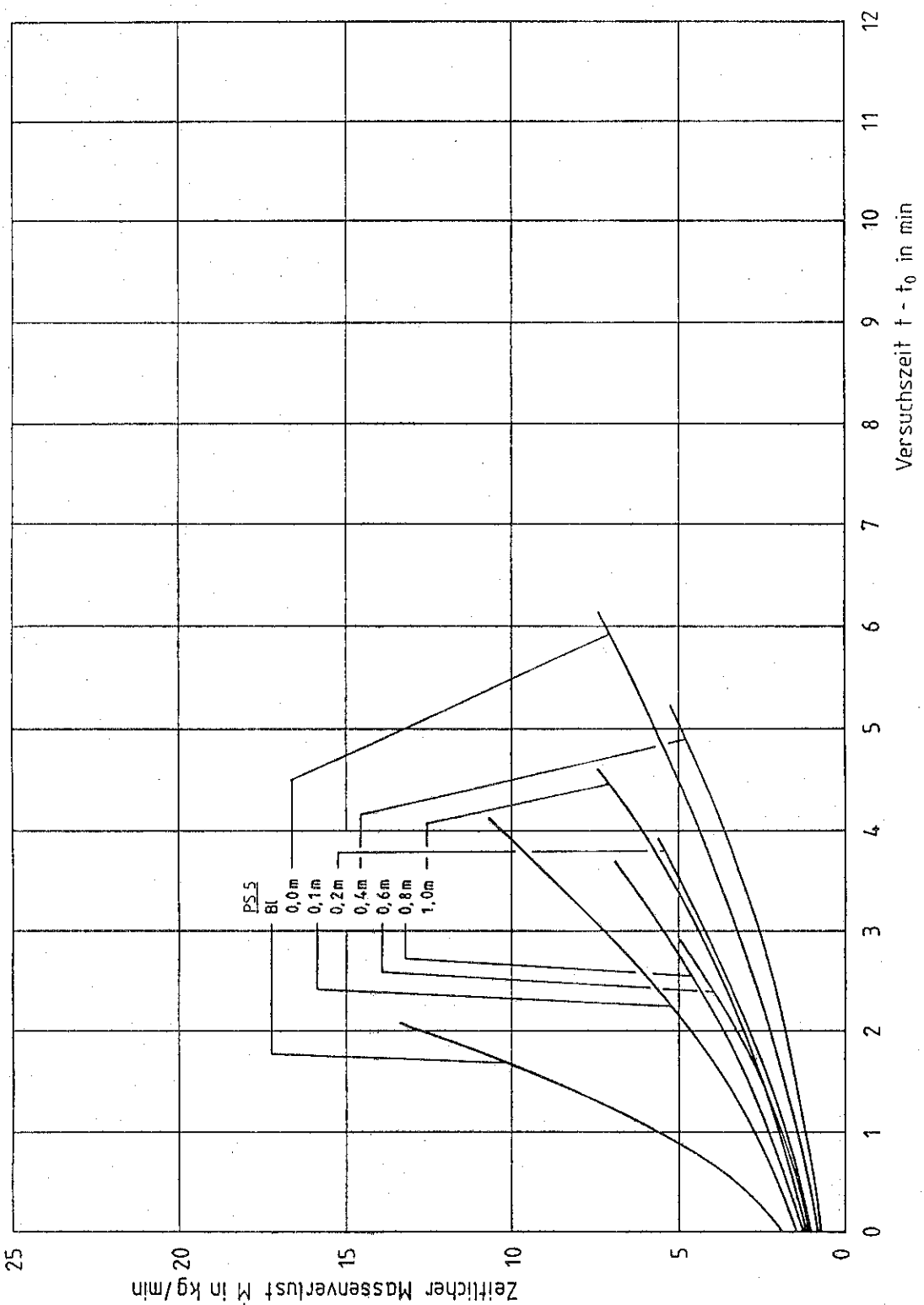



Bild 12.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

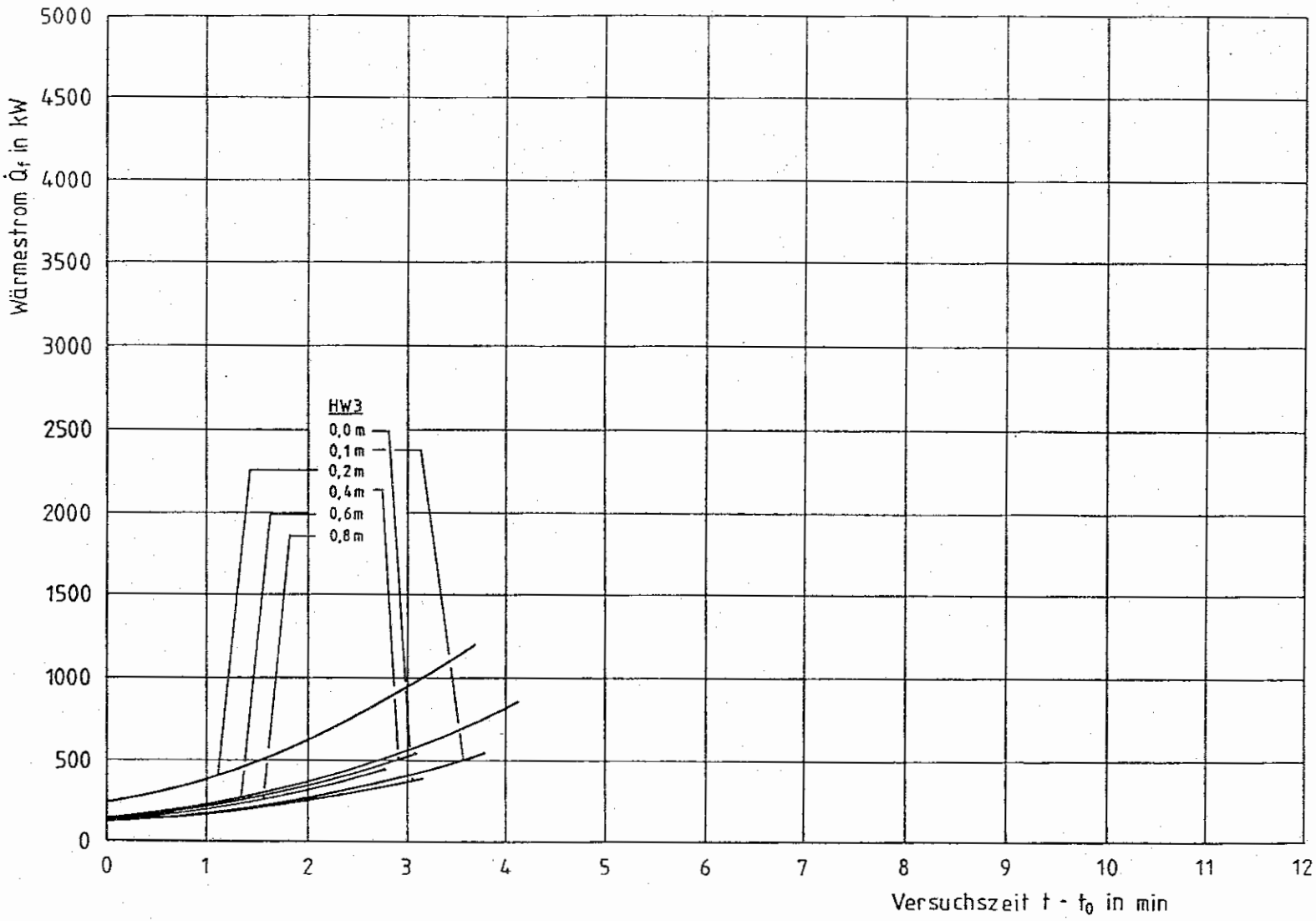



Bild 13 Fühlbarer Wärmestrom als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

Bild 13.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

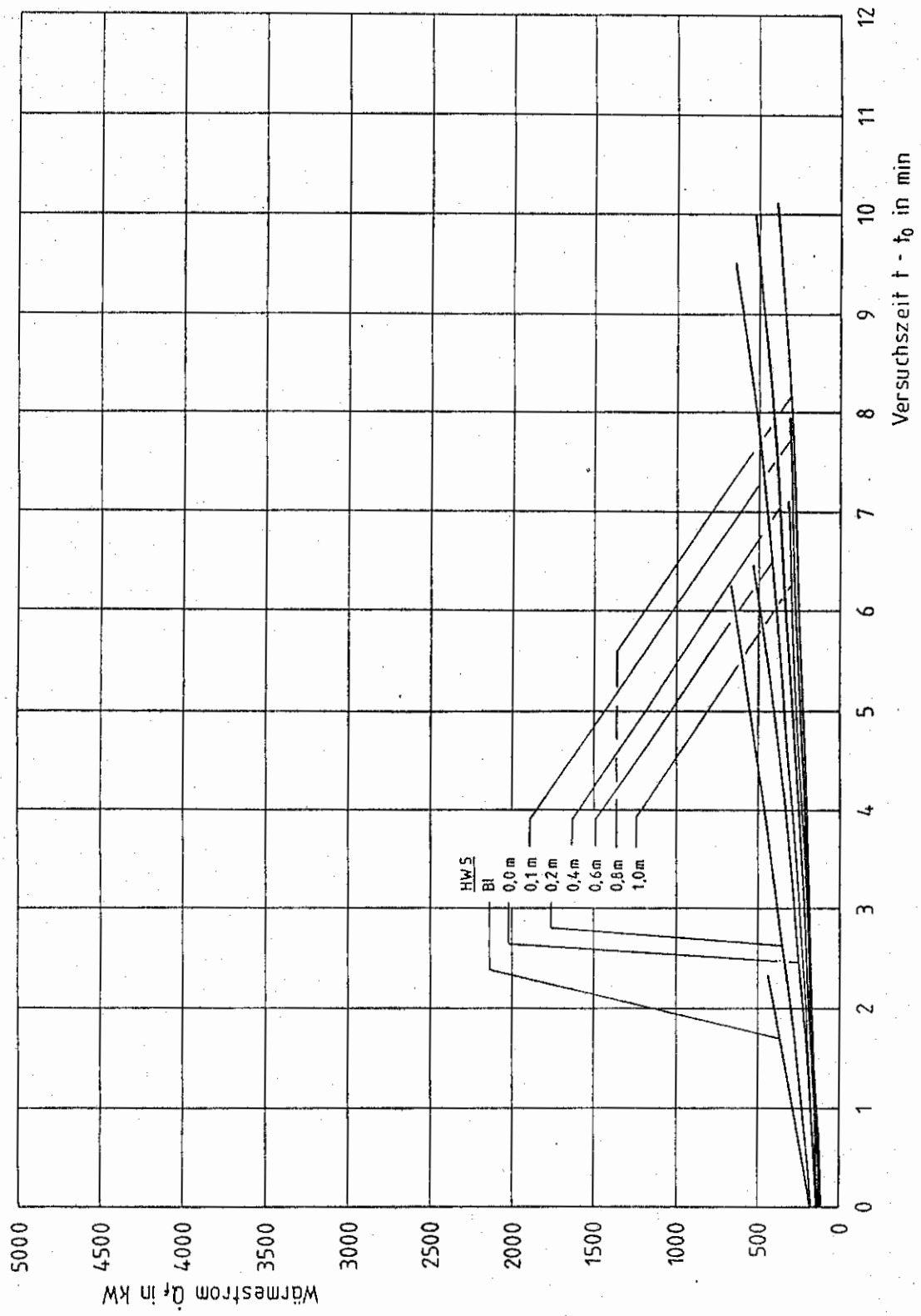



Bild 13.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

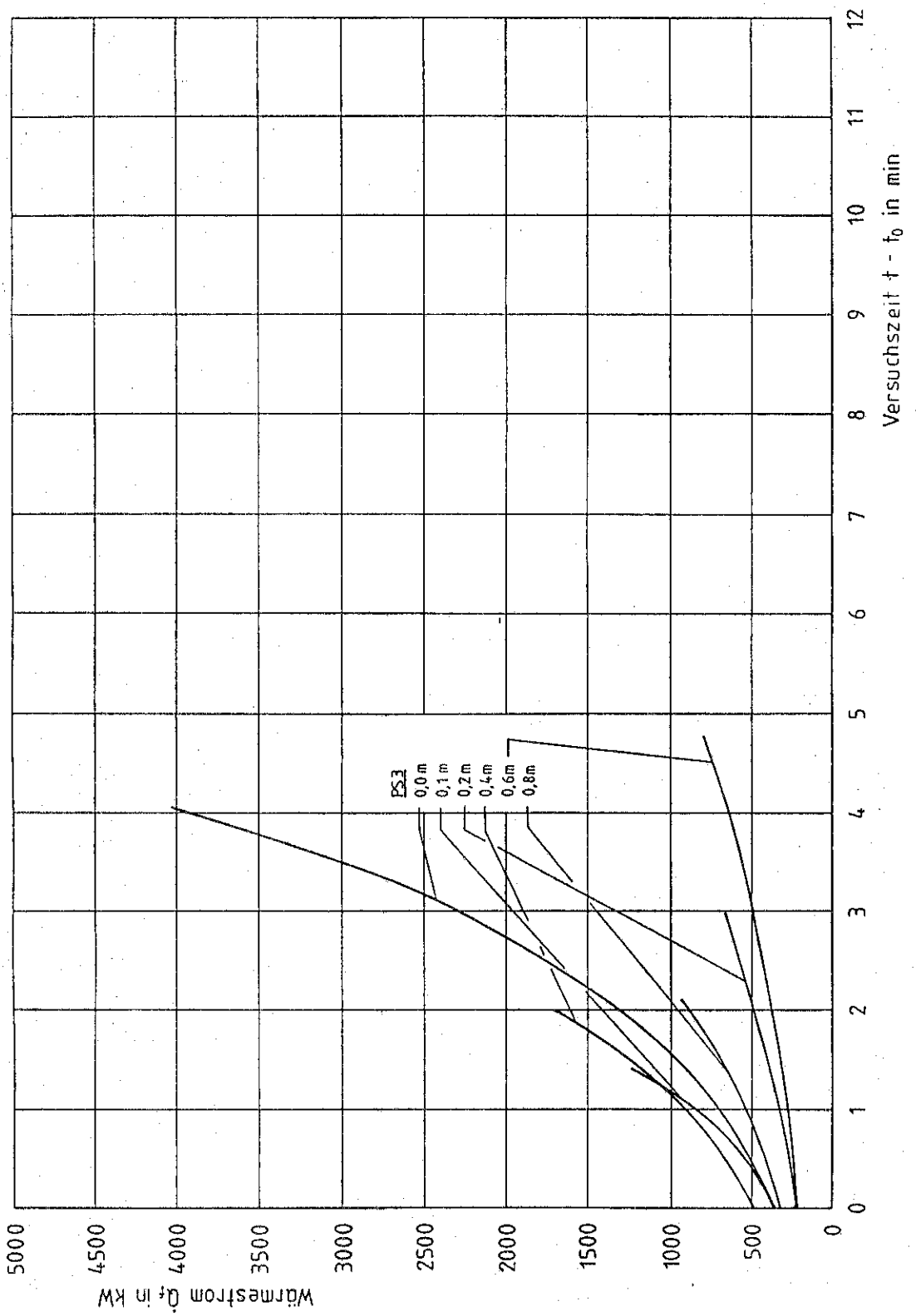



Bild 13.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

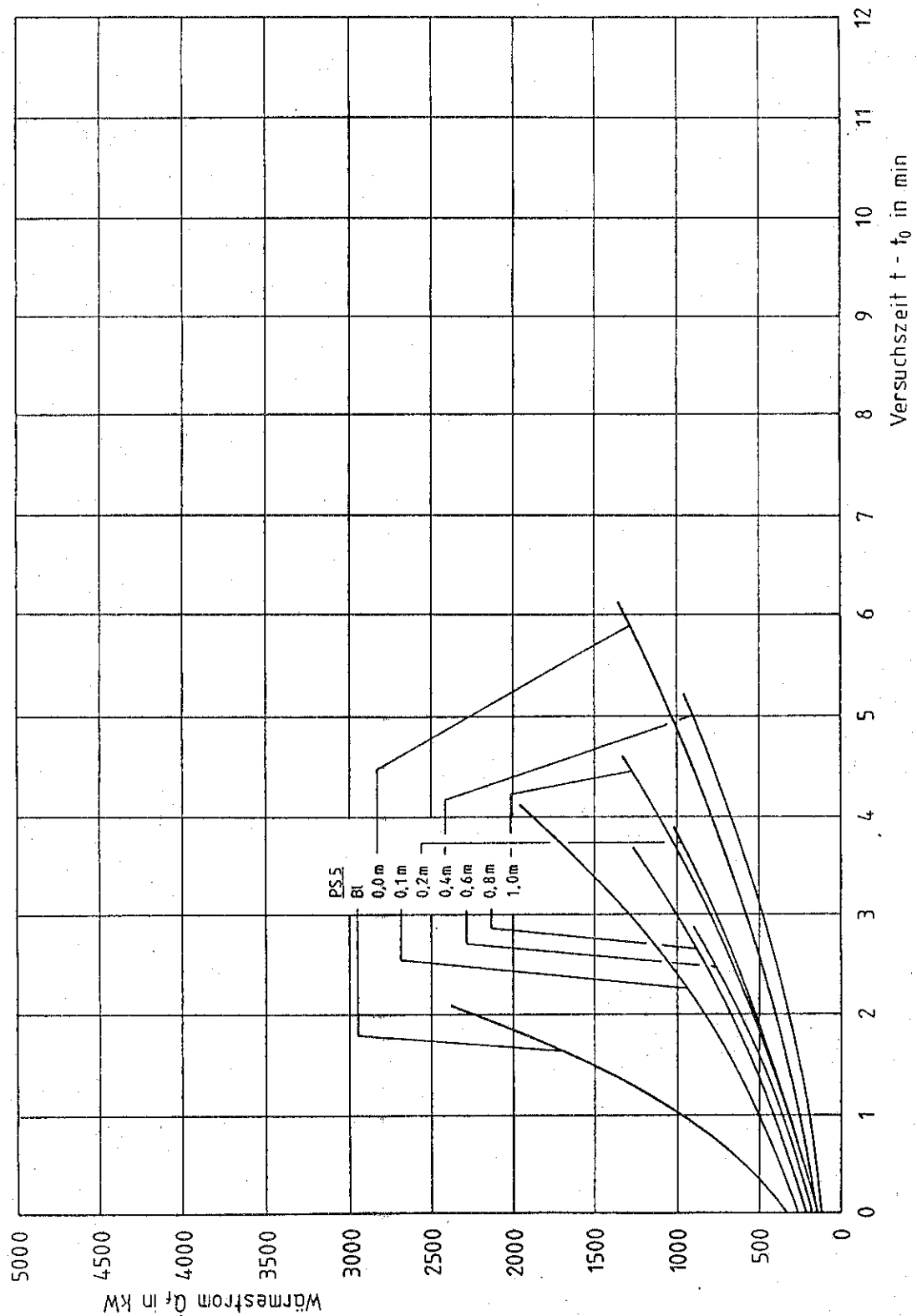



Bild 13.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

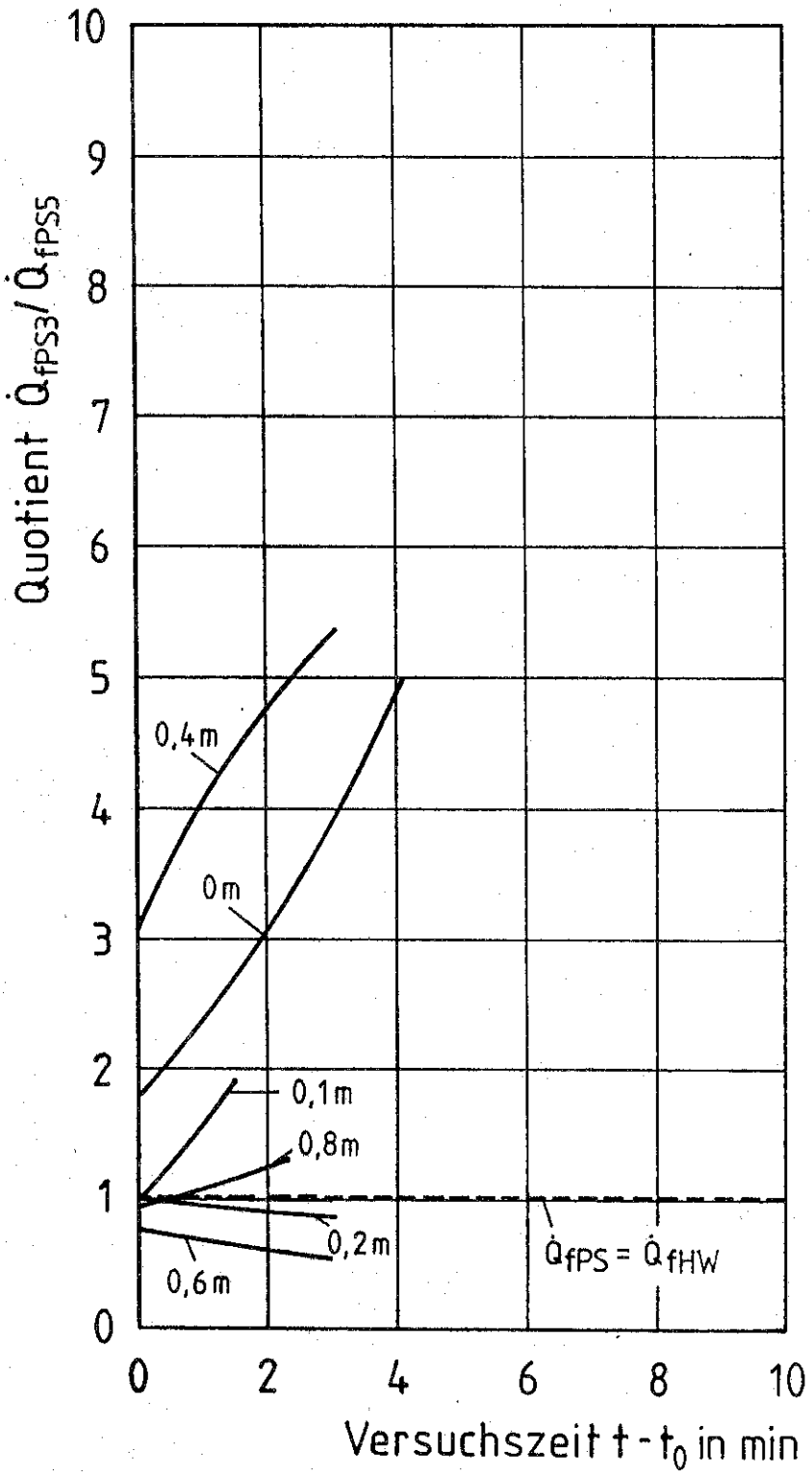



Bild 14 Vergleich der fühlbaren Wärmeströme als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen.

Bild 14.1 Quotient $\dot{Q}_{fPS3} / \dot{Q}_{fPS5}$

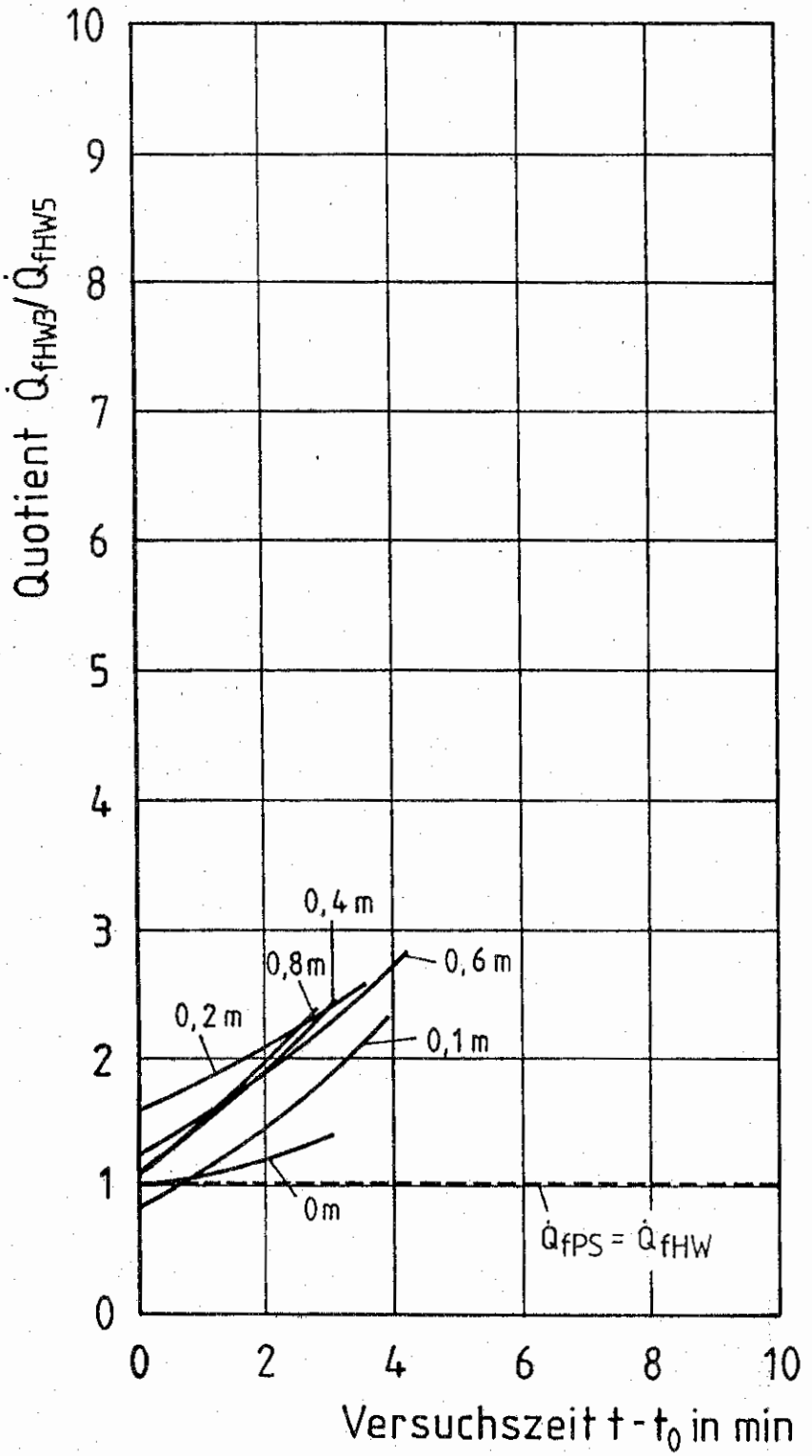



Bild 14.2 Quotient $\dot{Q}_{fHW3}$ / $\dot{Q}_{fHW5}$

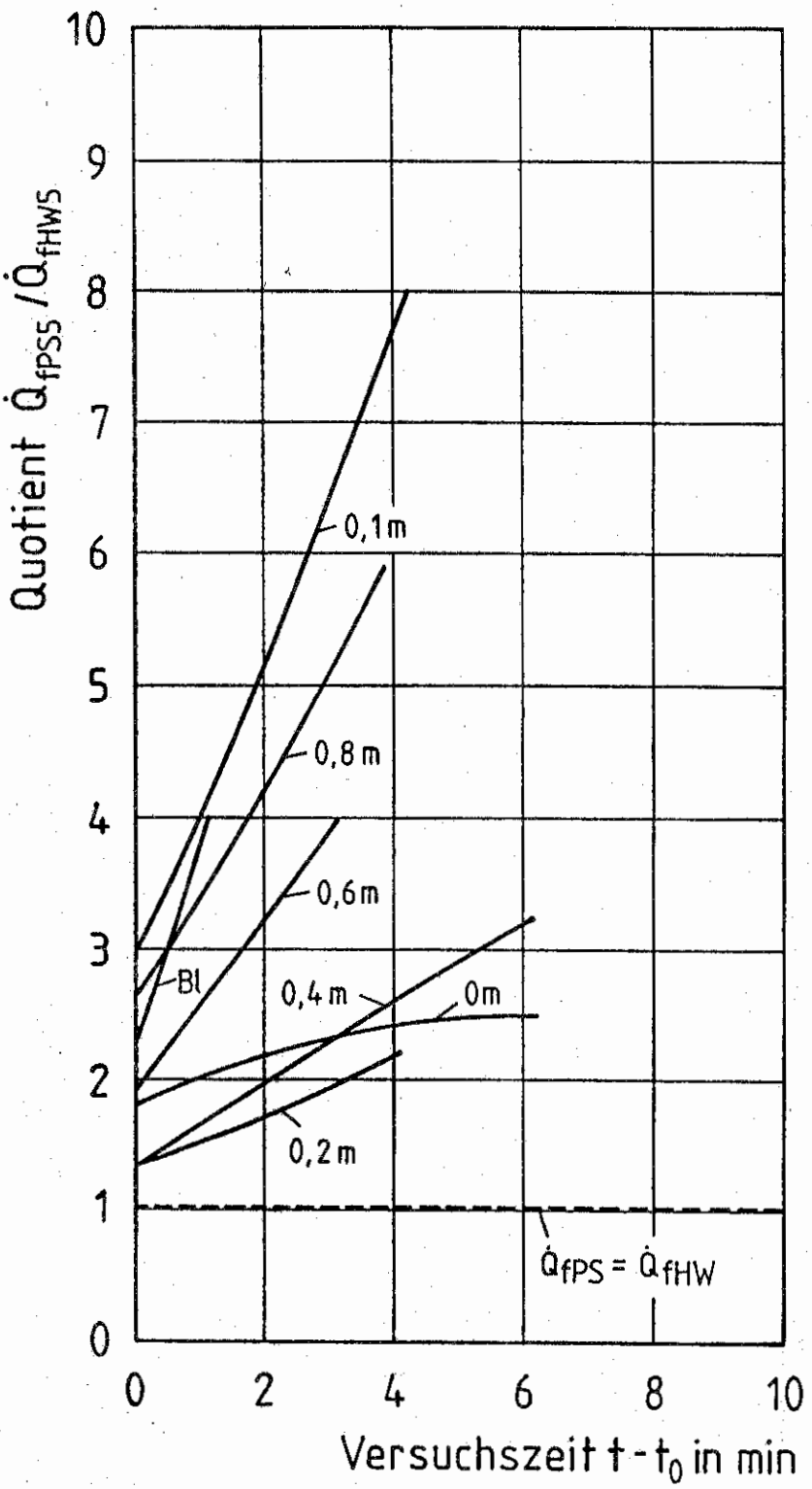



Bild 14.3 Quotient $\dot{Q}_{fPS5}$ / $\dot{Q}_{fHW5}$

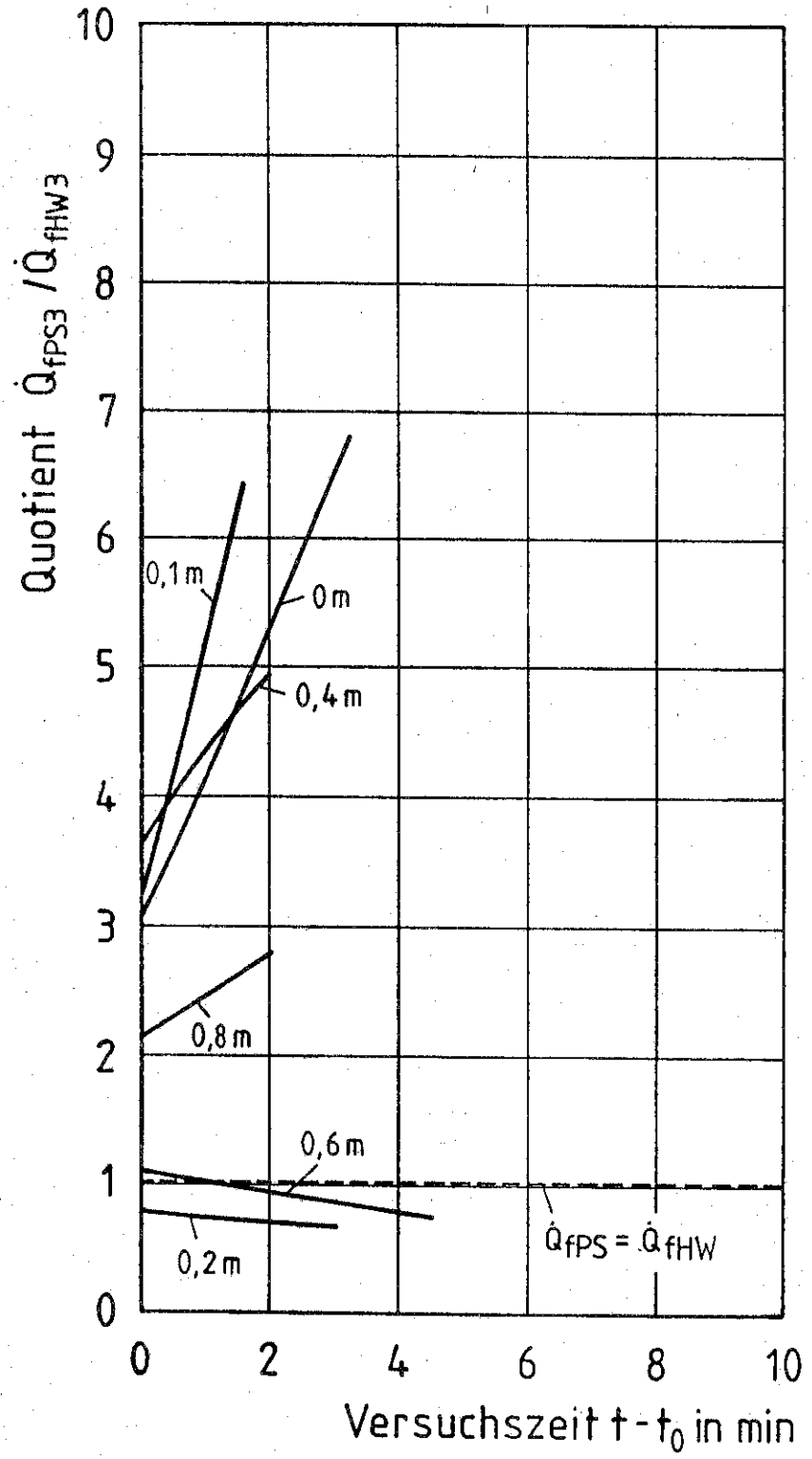



Bild 14.4 Quotient $\dot{Q}_{fPS3}$ / $\dot{Q}_{fHW3}$

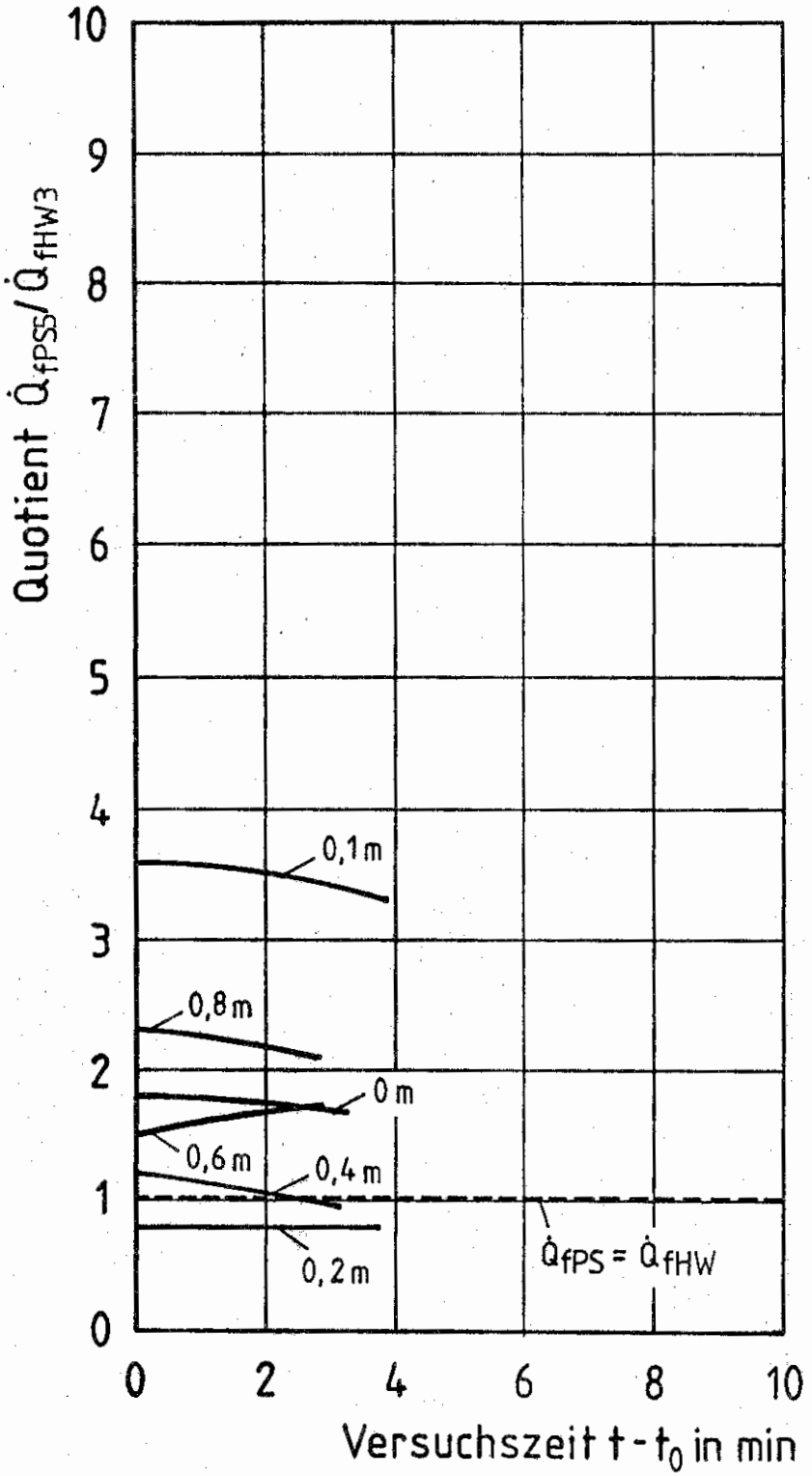



Bild 14.5 Quotient $\dot{Q}_{fPS5}$ / $\dot{Q}_{fHW3}$

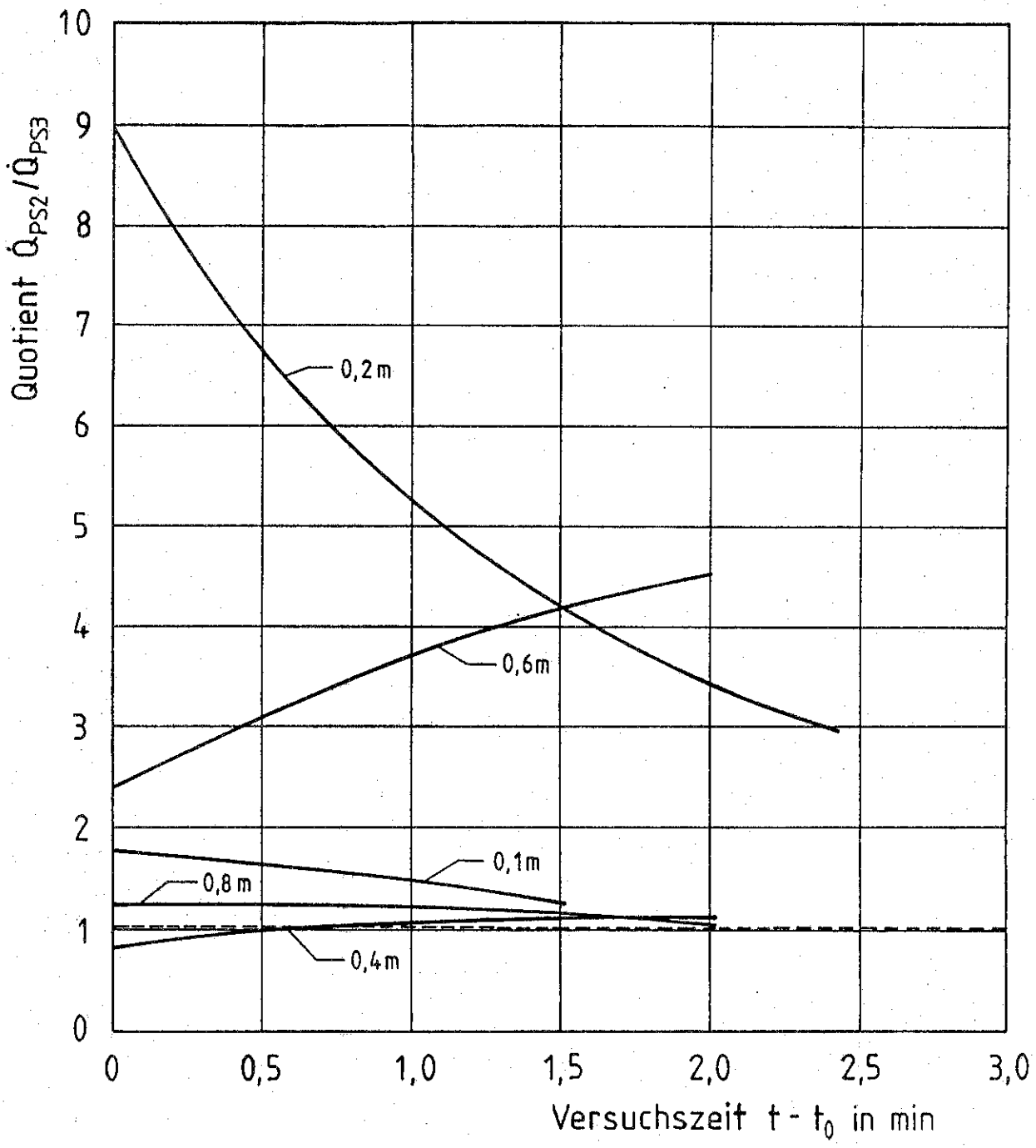



Bild 15 Vergleich der fühlbaren Wärmeströme mit den Ergebnissen in /5/ als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$.

Bild 15.1 Quotient $\dot{Q}_{fPS2} / \dot{Q}_{fPS3}$

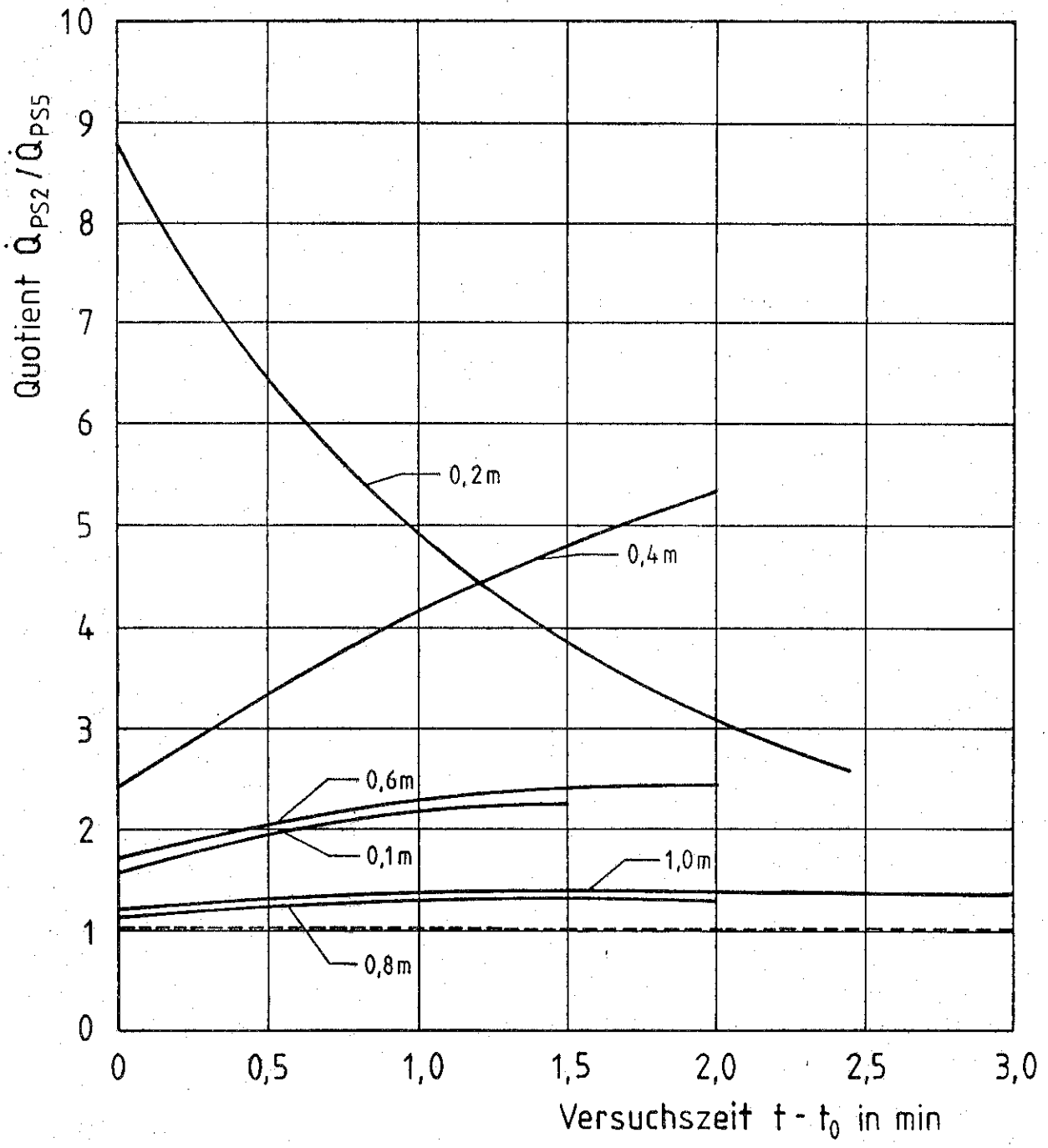



Bild 15.2 Quotient $\dot{Q}_{fPS2} / \dot{Q}_{fPS5}$

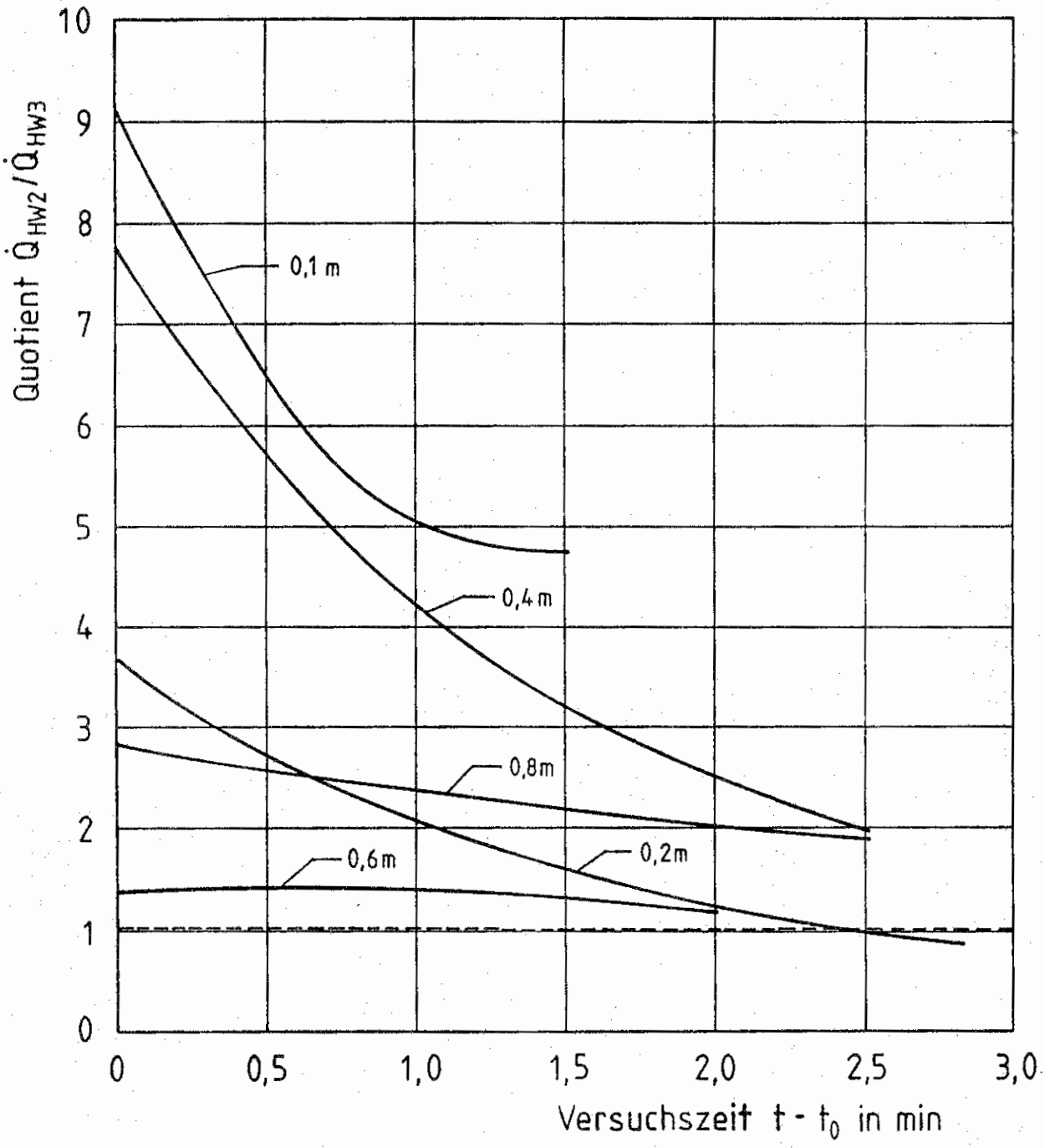



Bild 15.3 Quotient $\dot{Q}_{fHW2}$ / $\dot{Q}_{fHW3}$

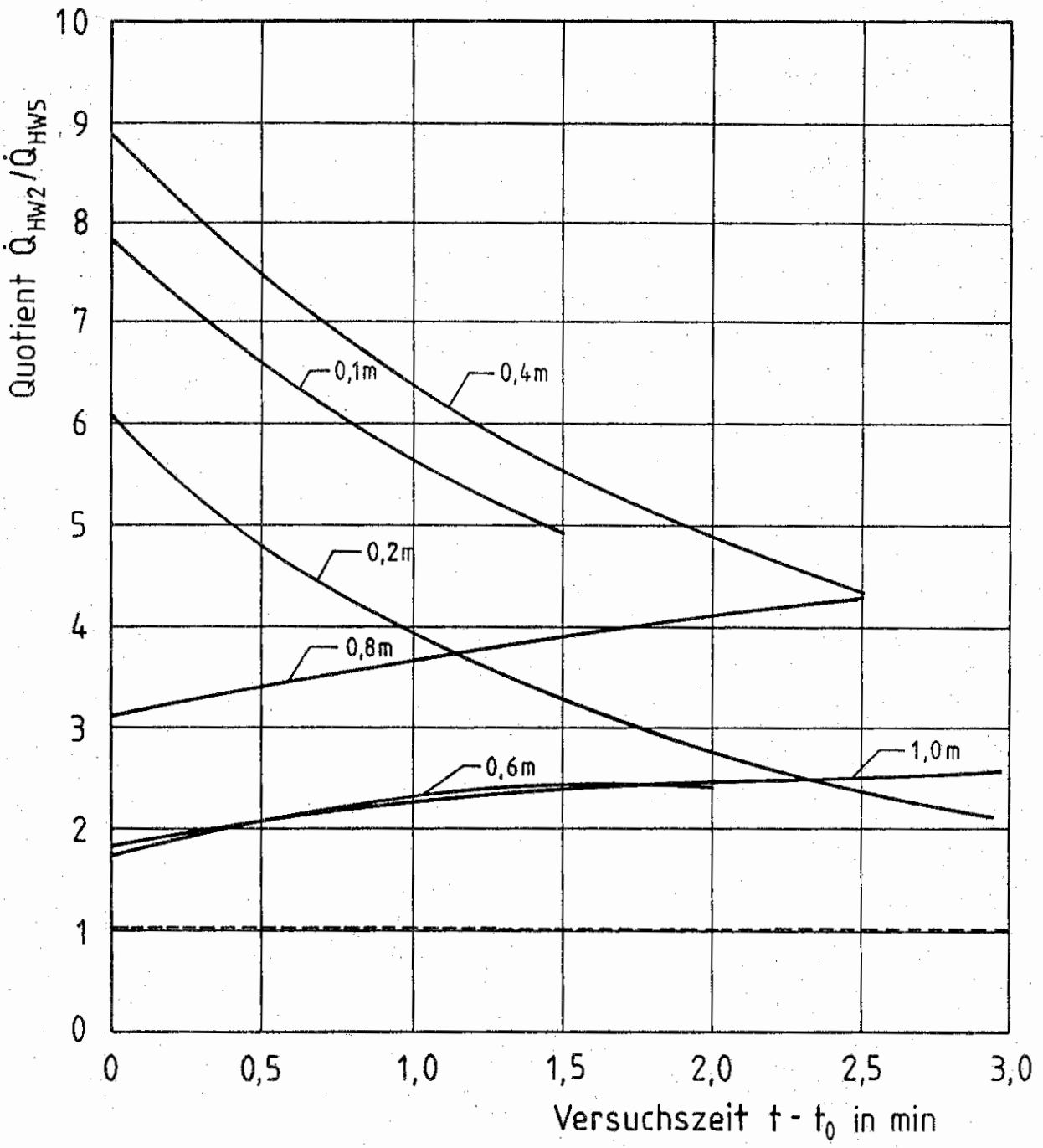



Bild 15.4 Quotient $\dot{Q}_{fHW2}$ / $\dot{Q}_{fHW5}$

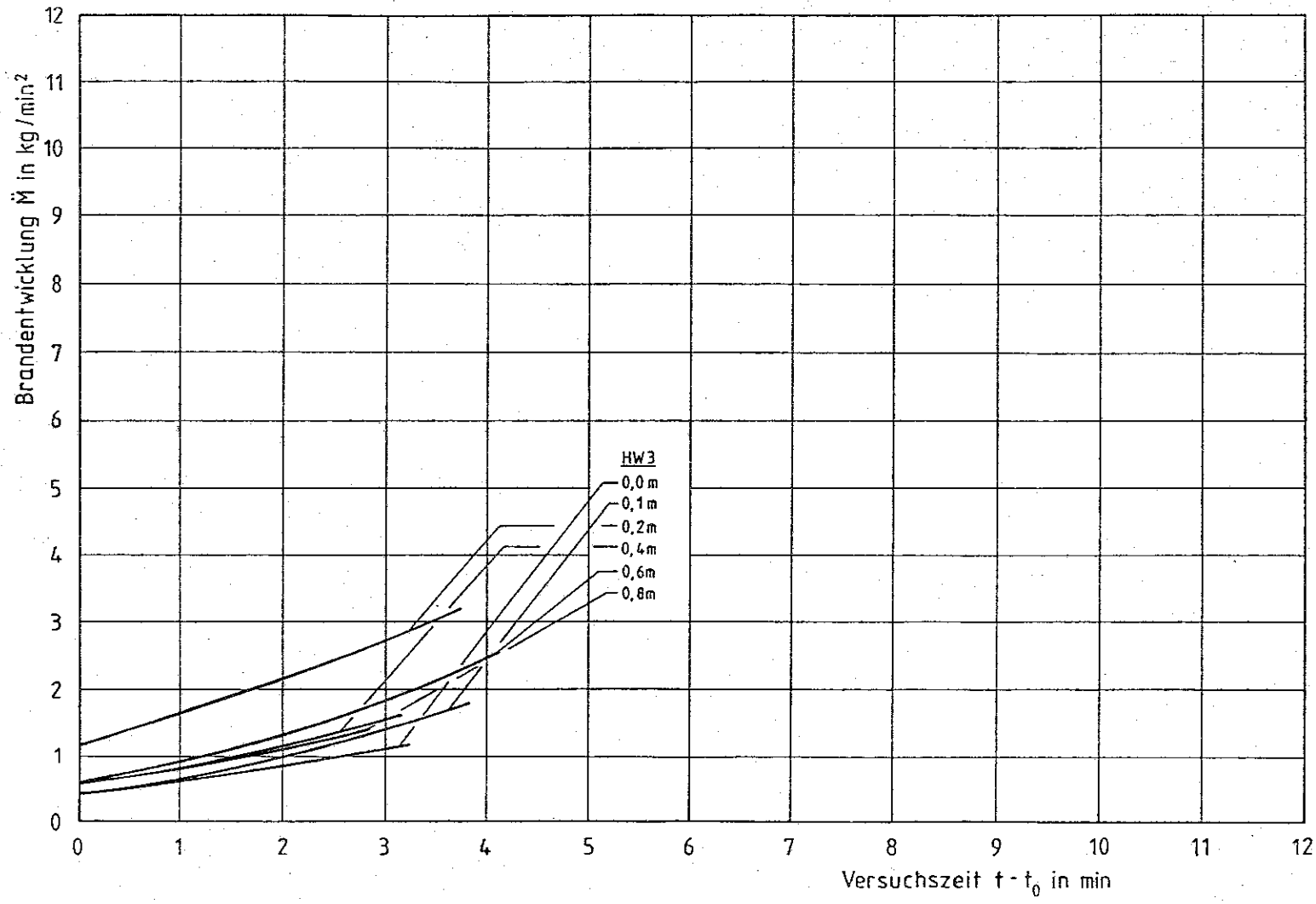



Bild 16 Brandentwicklung als Funktion der Versuchszeit $t - t_0$ bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

Bild 16.1 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
3 Kartons pro Gitterbox

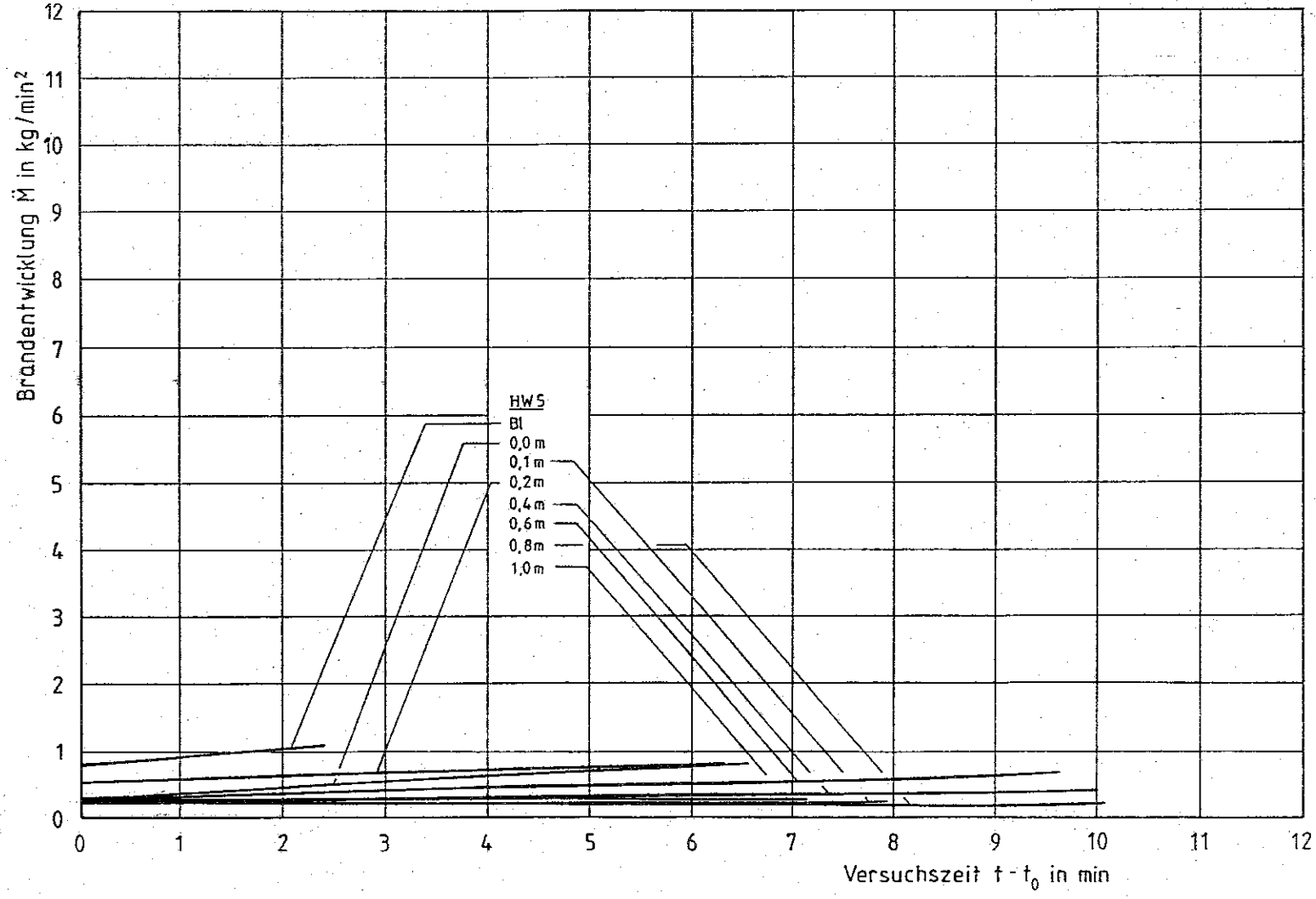



Bild 16.2 Stoßschutzmaterial: Holzwolle
5 Kartons pro Gitterbox

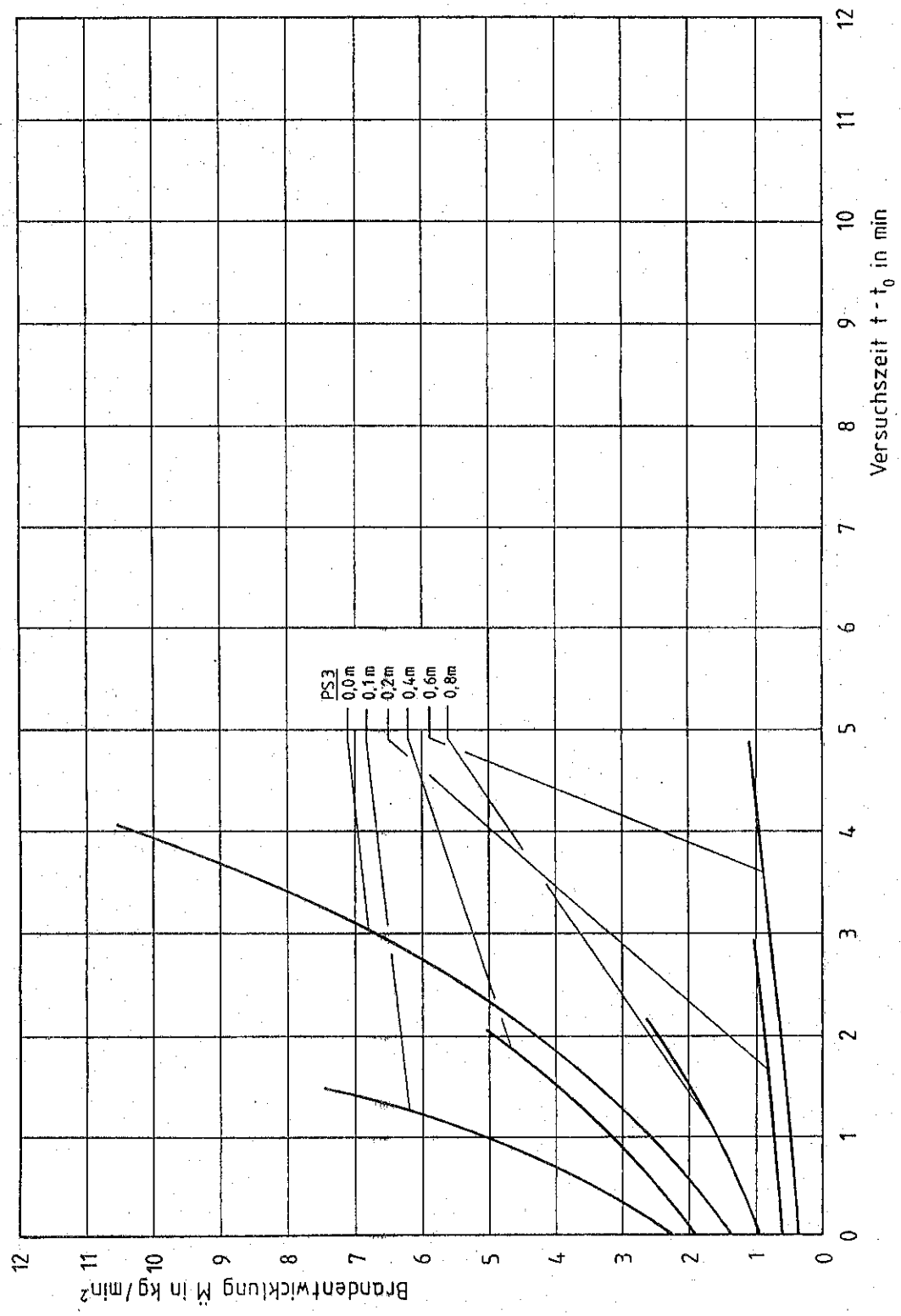



Bild 16.3 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
3 Kartons pro Gitterbox

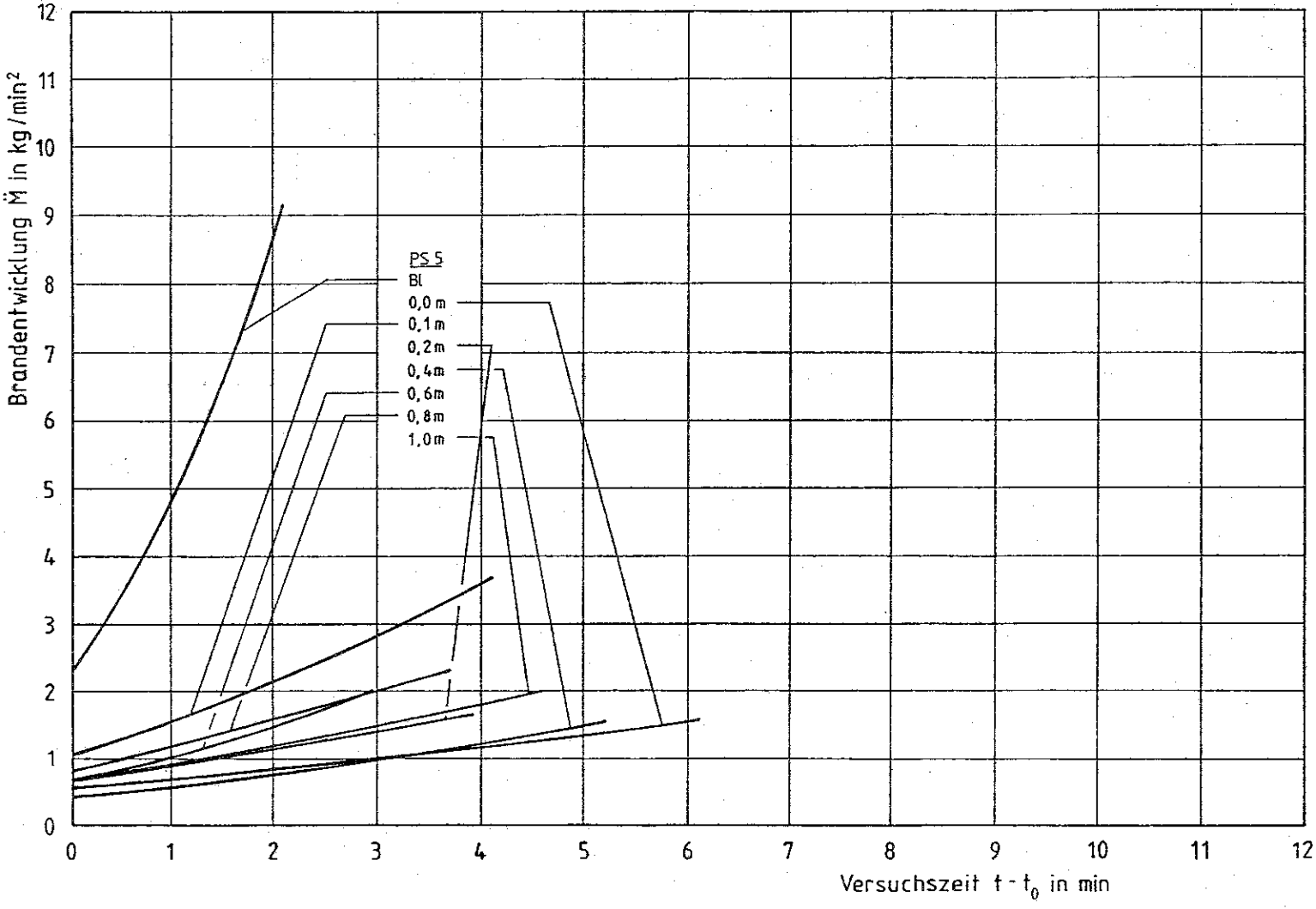



Bild 16.4 Stoßschutzmaterial: Polystyrol-Partikelschaum
5 Kartons pro Gitterbox

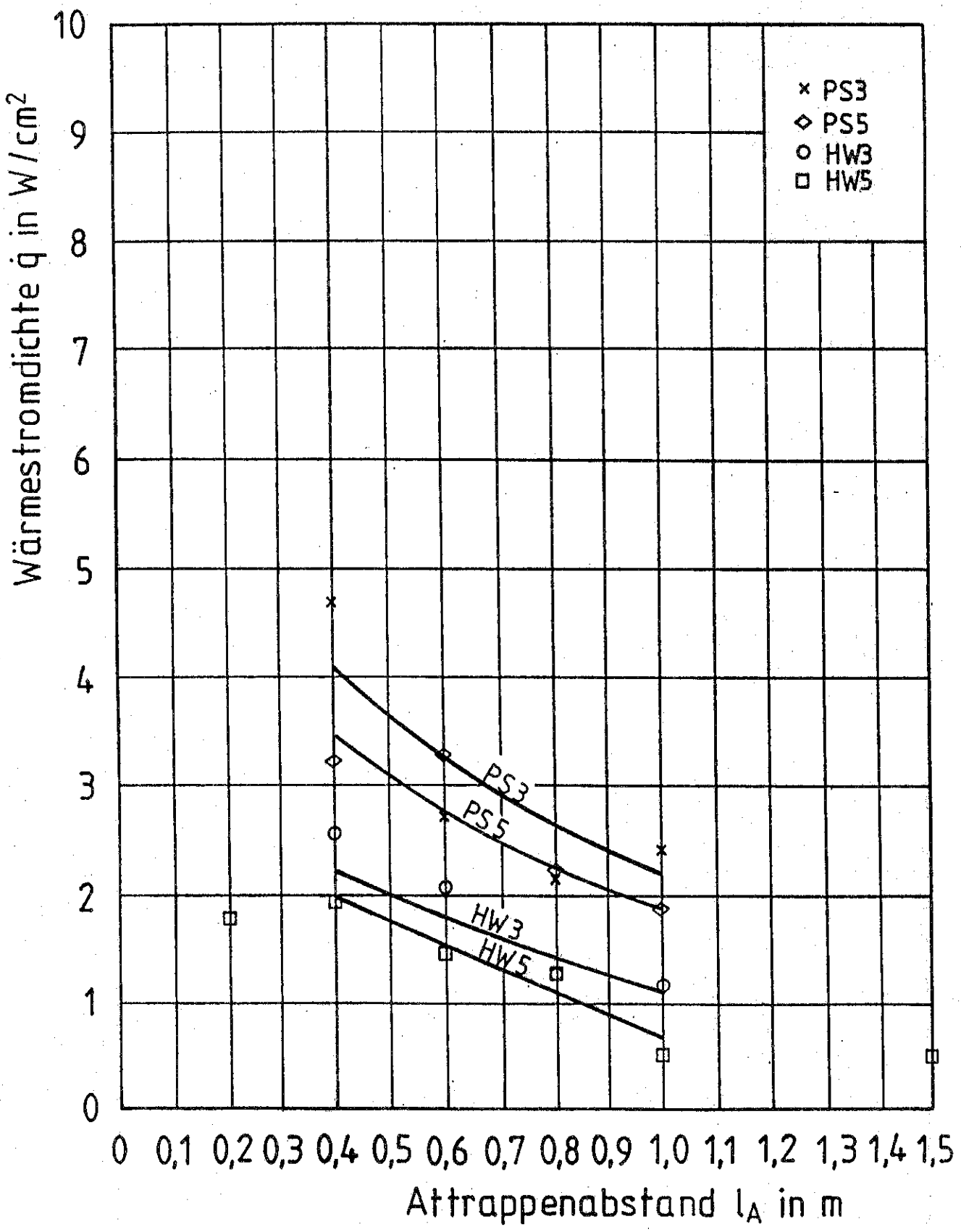



Bild 17 Maximale Wärmestromdichte an der Lagerattrappe als Funktion des Abstandes.

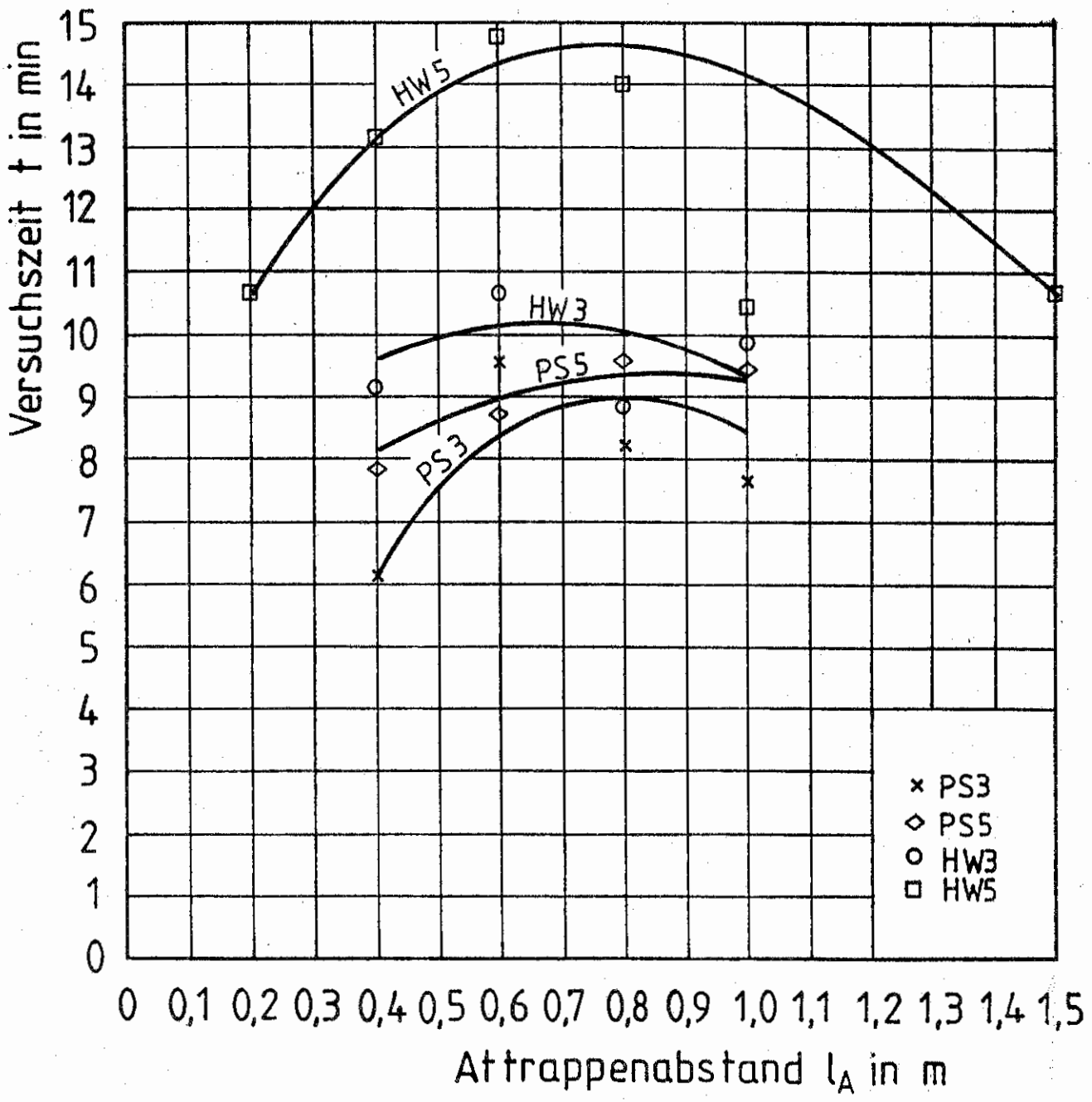



Bild 18 Versuchzeit t bei der der Maximalwert der Wärmestromdichte an der Lagerattrappe auftritt als Funktion des Abstandes.