

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 5: Großbrandversuche 4

68

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

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

Forschungsbericht Nr. 68

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 5: Großbrandversuche 4

von  
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Januar 1989

FA.Nr. 118 (3/87)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMELZEICHEN	1
1. EINLEITUNG	2
2. VERSUCHSPROGRAMM	3
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	5
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN	6
5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE	8
6. ZUSAMMENFASSUNG	18
7. LITERATURVERZEICHNIS	20
8. TABELLEN UND BILDER	22

FORMELZEICHEN

a	Regressionskoeffizient
b	Regressionskoeffizient
dt	differentielles Zeitelement
dz <sub>b</sub>	differentielles Wegelement in vertikaler Richtung
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert in MJ/kg
$\bar{H}_u$	gewichteter unterer Heizwert in MJ/kg
L	Abstand zwischen den Lagerattrappen in m
M	Masse in kg
$\dot{M}$	zeitlicher Massenverlust in kg/min
M <sub>a</sub>	Anfangsmasse in kg
$\Delta M$	Abbrandmasse in kg
$\Delta M_0$	1 kg Abbrandmasse zum Zeitpunkt t <sub>0</sub>
P	Teilmasse eines Stoffes im Brandgut in kg
p	Massenanteil eines Stoffes im Brandgut
$\dot{Q}$	Wärmestrom in kW
$\dot{Q}_f$	Fühlbarer Wärmestrom
R <sup>2</sup>	Determinationskoeffizient
t	Versuchszeit in min
t <sub>0</sub>	Zeitpunkt, bei dem $\Delta M_0 = 1$ kg
T <sub>m</sub>	Maximale Brandtemperatur in °C
v	Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Flammenwurzel) in m/min
z <sub>b</sub>	Höhe, die die Flammenwurzel an dem durch die Zündquelle gezündeten Stapel erreicht hat in m
z <sub>g</sub>	Höhe, bei der der gegenüberstehende Lagerstapel zündet in m

Indizes

HW	Holzwohle
PS	Polystyrol
I	Flammenausbreitung auf der Wellpappeoberfläche
II	Volumetrische Brandausbreitung

## 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 das Brandausbreitungsrisiko in den letzten Jahren stark zugenommen hat und eine Untersuchung dieser Problematik auch im Hinblick auf die Planung und Auslegung von selbsttätigen ortsfesten Löschanlagen und von Brandmeldeanlagen bisher nur für wenige Einzelfälle durchgeführt worden ist.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßten sich mit einer Literaturlauswertung des in- und ausländischen Schrifttums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4/.

Die wesentlichen Parameter, die die Brandausbreitung bei gelagerten brennbaren Stoffen beeinflussen, sind in /2/ aufgeführt und werden in den Großbrandversuchen berücksichtigt. Hierzu seien besonders die Stoffeigenschaften der gelagerten Güter, die räumliche Zuordnung der Stoffe zueinander, die Lage und Größe der Zündquelle sowie die bauliche Umgebung zu erwähnen. Diese Einflußgrößen sind teilweise, wie zum Beispiel die Lage und Größe der Zündquelle, mehr in der Entstehungsphase des Brandes wirksam bzw. wirken sich teilweise erst im weiter fortgeschrittenen Brandstadium aus.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Diese Arbeit hat zum Ziel, den Einfluß der Variation des Abstandes zwischen gelagerten Gütern auf die Brandausbreitung weiter zu untersuchen. Dieser Versuchsparameter wurde in /4/ als Fortsetzung der bisher an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführten Versuche eingeführt, wobei in der ersten Versuchsserie zwei parallel aufgestellte Lagerattrappen aus einlagiger Wellpappe gewählt wurden, zwischen denen der Abstand variiert wurde. In Erweiterung dazu wurde in einer zweiten Versuchsserie das Brandverhalten zweier paralleler Lagersäulen, bei denen die Brandlast (gefüllte Wellpappenkartons) ähnlich einem Blocklager gestapelt war, unter Variation des Abstandes untersucht. Die dritte hier beschriebene Versuchsserie (Teil III) umfaßt die Untersuchung des Brandverhaltens zweier paralleler Gitterboxensäulen mit eingelagerter Brandlast, bei denen der Einfluß des Abstandes auf die Brandausbreitung untersucht wird. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Aussage darüber treffen zu können, wie schnell sich ein Brand bei unterschiedlichen Abständen vertikal und auf benachbarte Brandlast horizontal ausbreitet bzw. den kritischen Abstand zu bestimmen, bei dem der Nachbarstapel gerade noch gezündet wird. Die Regallagerkonstruktion hat meß- und sicherheitstechnisch den Vorteil, daß die bei der Blocklagerung auftretenden Nachteile, wie z.B. das Zusammenfallen des Lagergutes im fortgeschrittenen Brandstadium, nicht auftreten können. Dies führt nicht nur dazu, daß sich in der Praxis benachbarte Brandlast durch direkte Berührung mit brennendem Material entzünden und damit die Brandausbreitung auf benachbarte Stapel beschleunigen kann, sondern auch Fluchtwege eventuell versperrt werden können. Ein weiterer Nachteil bei der Blocklagerung besteht darin, daß durch das Zusammenfallen der Stoffe Temperaturmeßfühler nicht mehr in dem erforderlichen Maße an der vorgegebenen Meßstelle fixiert sind, was zu einer Verfälschung des Meßergebnisses führt. Die Regallageranordnung weist gegenüber der Blocklagerung den folgenden weiteren Vorteil auf. Da sich, wie Versuchsserie II /4/ gezeigt hat, bei der Blocklagerung im weiter fortgeschrittenen

Brandstadium infolge der großen Wärmeentwicklung auf der Innenseite der Lagerstapel, dem dadurch bedingten schnelleren Abbrand und der hieraus zwangsläufig resultierenden nachlassenden Stabilität der gezündete Stapel nach innen neigt, ist der eingestellte Abstand zwischen den Lagerstapeln für die Dauer des Versuches nicht aufrechtzuerhalten. Bei der Regallageranordnung dagegen kann der obere kritische Abstand, bei dem sich der Nachbarstapel gerade noch entzündet, bzw. der untere kritische Abstand, bei dem die Brandausbreitung infolge von Strömungswiderständen im Spalt und geringerer Luftzufuhr verzögert wird, eindeutig bestimmt werden.

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. Hierbei handelte es 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. Die Kartongröße weicht geringfügig von der bei den bisher durchgeführten Versuchen verwendeten ab. Dadurch ergeben sich kleine Änderungen bei der Größe der Brandlast und bei dem in Abschnitt 5. berechneten gewichteten Heizwert. Der zwischen dem Lagergut und der Wellpappe verbleibende Zwischenraum wurde mit zwei der am häufigsten verwendeten Stoßschutzmaterialien Holzwolle oder schwerentflammbarem Polystyrol-Partikelschaum ausgefüllt.

Die Lage und Größe der Zündquelle wurde analog zu der in Versuchsserie II gewählt, um eine zu große Variationsbreite bezüglich der Versuchsparameter zu vermeiden. Die Größe der Zündquelle wurde dabei so bemessen, daß vor allem in der Entstehungsphase das Brandverhalten der gelagerten Stoffe nicht vom Brandverhalten der Zündquelle überlagert wird. Zum anderen können sich bei einer sehr kleinen Zündquelle insbesondere die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum und die Feuchte des Lagergutes in erhöhtem Maße verzögernd auf die Brandausbreitung, besonders während der Brandentwicklungsphase auswirken.

### 3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Für die Durchführung der Brandversuche im Realmaßstab wurde ein Versuchsstand in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet, der eine Untersuchung dieser Problematik ermöglicht.

Der prinzipielle Versuchsaufbau und die Abmessungen sind Bild 1 zu entnehmen.

Hierbei wurden je 4 Gitterboxen übereinandergestapelt und zwei dieser Stapel parallel zueinander auf einer Abbrandwaage mit den Grundflächenabmessungen 4 m \* 4 m aufgestellt. Die Abbrandwaage bestand aus einer Trägerkonstruktion, einer Gitterauflage sowie 4 Wägezellen. Die benützten Gitterboxen wurde bereits in Versuchen der vorhergehenden Untersuchungen /2/ und /3/ verwendet. Jede Gitterbox wurde mit vier Kartons der in Abschnitt 2 beschriebenen Brandlast befüllt, was eine Zahl von 16 Stück pro Lagerstapel bzw. 32 Stück gesamt ergibt. In Tabelle 1 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.

Die Meßtechnik umfaßte die Messung zeitlicher Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen. Die Meßstellen sind Bild 1 zu entnehmen. 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 Personalcomputer-gesteuerten Datenerfassungsanlage. Mit Hilfe dieses Rechners wurden die Daten nach dem Versuch ausgewertet.

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBSACHTUNGEN

Der Abstand zwischen beiden Lagerstapeln wurde, ausgehend von einem minimalen Abstand von 0,05 m so lange erhöht, bis keine Brandausbreitung auf den benachbarten Lagerstapel mehr erfolgte. Dabei wurde in Übereinstimmung mit Versuchsserie II /4/ am Fußpunkt des linken Stapels gezündet. Im Bereich des oberen und unteren kritischen Abstandes wurde die Schrittweite von 0,2 m auf 0,1 m bzw. 0,05 m reduziert, um diese relativ exakt bestimmen zu können. Die Versuche wurden gegebenenfalls wiederholt, um Unregelmäßigkeiten im Brandverlauf feststellen zu können. Unter anderem sind folgende Faktoren, auf die in /4/ bereits eingegangen wurde, für die Streuung der Meßwerte verantwortlich. Infolge der nicht klimatisierten Versuchshalle wirken sich schwankende Umgebungsbedingungen auf die Brandausbreitung aus. Dabei sind vor allem Unterschiede in der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit zu erwähnen. Diese haben ihre Ursache nicht nur in den natürlichen klimatischen Schwankungen, sondern auch durch vorhergehende Versuche, da durch die Verbrennung die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit erhöht werden. Beide Faktoren wirken sich unterschiedlich auf die Brandausbreitung aus. Eine erhöhte Umgebungstemperatur hat eine stärkere Vorwärmung der Brandlast, eine Verringerung der Lagergutfeuchte und damit schnellere Brandausbreitung zur Folge. Eine erhöhte Luftfeuchtigkeit hat eine erhöhte Lagergutfeuchte und damit langsamere Brandausbreitung zur Folge. Ein erhöhter Anteil der durch die Verbrennung freigesetzten Wärme wird daher 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. Wie bereits bei den in Versuchsserie I und II durchgeführten Versuchen, konnten die Brandgase frei nach oben abströmen, wodurch sich keine Staupunktströmung zumindest in einer genügend kurzen Entfernung von der Oberkante des Versuchsstandes ausbilden

konnte, die die Brandausbreitung hätte beeinflussen können.

Es konnte beobachtet werden, daß die Zündquelle eine Flammenlänge von ungefähr 15 cm erzeugte. Vorversuche haben gezeigt, daß diese Flammenlänge relativ unabhängig von der Spiritusmenge ist. Der Lagerbrand wird durch diese im Vergleich zur Brandlast relativ kleinen Zündquelle nur in einem relativ kleinen Bereich durch die Zündquelle beeinflußt und ist damit zu vernachlässigen. Durch die Länge der Zündquelle von 600 mm ist gewährleistet, daß die Brandlast auf einer breiten Fläche gleichmäßig gezündet wird.

Der Brand breitet sich infolge der thermischen Auftriebsströmung der heißen Flammengase, die stärkere Erwärmung der Oberfläche durch direkten Wärme- und Stoffaustausch mit der Flamme und dem erhöhten Luftzutritt zunächst über die Wellpappe aus, bevor das Stoßschutzmaterial bzw. das Lagergut angegriffen wird. Aus diesen Gründen erfolgt auch die vertikale Brandausbreitung schneller als die horizontale.

Es war weiterhin festzustellen, daß mit zunehmendem Abstand die Brandausbreitung langsamer wurde. Unabhängig davon, ob Holzwolle oder Polystyrol-Partikelschaum als Stoßschutzmaterial verwendet wird, nimmt bei sehr großen Abständen nahe dem kritischen Abstand der Einfluß des gegenüberstehenden Stapels in Bezug auf Wärmeübertragung und Luft- bzw. Rauchgasströmung für die Brandausbreitung immer mehr ab, so daß beide Stapel unabhängig voneinander betrachtet werden können.

## 5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

Analog zu den Untersuchungen in /4/ 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 Bild 2 und 3 ist der Verlauf der aus dem Versuch ermittelten Höhe, den die Flammenwurzel am gezündeten Lagerstapel als Funktion der Versuchszeit erreicht hat bei verschiedenen Abständen zwischen den Stapeln und bei den Stoßschutzmaterialien Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum dargestellt.

Die Meßwertepaare Höhe der Flammenwurzel  $z_b$  und Versuchszeit  $t$  wurden rechnerisch mittels Regression bei Holzwolle an eine Exponentialfunktion der Form

$$z_{bHW} = a_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} \cdot t} \quad (1)$$

bzw. bei Polystyrol-Partikelschaum an eine Potenzfunktion der Form

$$z_{bPS} = a_{IPS} \cdot t^{b_{IPS}} \quad (2)$$

angepaßt, da sich gezeigt hat, daß diese die Meßwerte durch Vergleich der Determinationskoeffizienten  $R^2$  am genauesten wiedergeben. Eine Ungenauigkeit zeigt sich im unteren Bereich der Exponentialfunktion, da diese den Nullpunkt mehr oder weniger genau wiedergibt. Die Kurven wurden daher graphisch durch den Nullpunkt extrapoliert. Hierdurch macht man jedoch den Fehler, daß sich durch die unterschiedliche Charakteristik der Anpassungsfunktionen im Zeitbereich der Zündphase unterschiedliche Geschwindigkeiten für Polystyrol-Partikelschaum und Holzwolle ergeben. Zu diesem Zeitpunkt brennt jedoch erst die Wellpappe, d.h. die Stoßschutzmaterialien haben noch keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung. Eine für alle Versuche

gültige Höhe  $z_{b0}$ , bei der der unregelmäßige Zündvorgang nach einer Zeit  $t_0$  abgeschlossen ist, konnte dabei nicht festgestellt werden. Es wurde angenommen, daß bei der verwendeten Zündquelle die Zündphase relativ kurz und daher für die Bestimmung der Flammenausbreitung auf der Oberfläche in erster Näherung vernachlässigbar ist.

Die Flammen breiten sich zunächst schneller auf der Oberfläche der Wellpappe infolge des Luftzutrittes, der Vorwärmung durch heiße Rauchgase sowie des direkten Wärmeaustausches mit der Flamme aus. Nach und nach trägt das Stoßschutzmaterial nach Durchbrand der Umverpackung infolge einer größeren Wärmefreisetzung zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit bei.

Beim Vergleich dieser Untersuchungen mit denjenigen in /4/ zeigt sich, daß die Flammenausbreitung auf der Oberfläche bei mit Holzwolle gefüllten Wellpappenkartons ebenso wie bei Lagerattrappen mit einlagiger Wellpappe mittels einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Das in /4/ untersuchte Blocklager mit Polystyrol-Partikelschaum als Stoßschutzmaterial läßt sich ebenso wie die in Gitterboxen gelagerte Brandlast mit PS als Stoßschutzmaterial durch eine Potenzfunktion beschreiben.

Angaben zur Kurvenanpassung werden in Tabelle 2 und 3 aufgeführt.

Die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Flammenwurzel)  $v$  ergibt sich durch Differentiation zu

$$v = dz_b/dt . \quad (3)$$

Hieraus folgt für das Stoßschutzmaterial Holzwolle

$$v_{HW} = a_{IHW} \cdot b_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} t} = a'_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} t} \quad (4)$$

mit  $a'_{IHW} = a_{IHW} \cdot b_{IHW}$

bzw. für Polystyrol-Partikelschaum

$$v_{PS} = a_{IPS} \cdot b_{IPS} \cdot t^{b'_{IPS}-1} = a'_{IPS} \cdot t^{b'_{IPS}} \quad (5)$$

mit  $a'_{IPS} = a_{IPS} \cdot b_{IPS}$  und  $b'_{IPS} = b_{IPS} - 1$ .

Bild 4 zeigt die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit für Holzwolle, Bild 5 für Polystyrol 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 Holzwolle als auch bei Polystyrol 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. Dieses wurde bei dieser Versuchsserie nicht weiter untersucht.

Bild 6 zeigt den Quotienten der Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten bei Polystyrol-Partikelschaum und Holzwolle als Funktion der Versuchszeit  $t$ . Wie bereits erläutert hat das Stoßschutzmaterial während der Zündphase keinen Einfluß auf diese Geschwindigkeit, da im Anfangsstadium nur die Wellpappeoberfläche brennt. Es ist daher nur sinnvoll, das Verhältnis  $v_{PS}/v_{HW}$  ab dem

Zeitpunkt zu betrachten, bei dem der Wert 1 überschritten wird. Man erkennt, daß die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum im mittleren Zeitbereich wesentlich größer als bei Holzwolle ist. Eine mögliche Ursache hierfür ist, daß infolge der schnelleren Wärmefreisetzung und dem schnelleren Abbrand der Wellpappeoberfläche die horizontale Brandausbreitung in das Innere der Brandlast relativ früh zur Brandentwicklung beiträgt. Dies bedeutet wiederum, daß die freigesetzte Wärme infolge des höheren Heizwertes von Polystyrol die Flammenausbreitung auf der Oberfläche stärker begünstigt. Die anschließende Beschleunigung bei Holzwolle, d.h. die Abnahme des Quotienten  $v_{PS}/v_{HW}$  ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht erklärbar.

Beim Vergleich mit einlagiger Wellpappe nach /4/ zeigt sich, daß die maximalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten der aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Brandlast bei gleichem Abstand um das 3 bis 4-fache höher liegen. Hier machen sich die verschiedenen Stoßschutzmaterialien bemerkbar.

Betrachtet man die auftretenden Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten bei einem Blocklager nach /4/, so ergeben sich bei gleichem Abstand geringfügig höhere Werte als bei der hier untersuchten Regallagerung. Hierbei sind zwei Einflußfaktoren zu betrachten. Bei dem untersuchten Blocklager steht das Lagergut spaltfrei aufeinander. Bei der Regallageranordnung dagegen ergibt sich durch das Aufeinanderstellen der Gitterboxen eine Trennstelle zwischen den Wellpappenkartons. In dieser Zone wird ein Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Energie in den Metallrahmen der Gitterbox abgeleitet und steht somit im Hinblick auf eine rasche Flammenausbreitung auf der Wellpappenoberfläche nicht mehr zur Verfügung. Da die Gitterboxen zum einen herstellungsbedingt andererseits jedoch in weit größerem Maße durch die Wärmeeinwirkung aus vorhergehenden Brandversuchen nicht genau spaltfrei aufeinanderstehen, ist ein geringfügiger Austausch Abgas/Luft möglich. Hierdurch wird die horizontale Brandausbreitung begünstigt.

Bild 7 zeigt die Versuchszeit  $t$ , bei der die gegenüberstehende Lagersäule durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes bei den verwendeten Stoßschutzmaterialien zündet.

In Bild 8 ist die Höhe  $z_g$ , bei der der gegenüberstehende Lagerstapel 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 Wärmenergie 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 Holzwolle bei 1,0 m und mit Polystyrol-Partikelschaum 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 Polystyrol-Partikelschaum früher und bei einer geringeren Höhe  $z_g$  erfolgt als bei Holzwolle. Dies ist auf den höheren Heizwert von Polystyrol-Partikelschaum zurückzuführen.

Betrachtet man die maximal auftretende Verbrennungstemperatur als Funktion des Abstandes nach Bild 9, 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 Holzwolle auf.

Um eine Aussage darüber treffen zu können, wie schnell sich ein

Brand vertikal und in das Innere des Lagergutes ausbreitet, ist die Massenabnahme des Lagergutes während der Verbrennung zu untersuchen. Die Abbrandmasse  $\Delta M$  ergibt sich aus der Differenz zwischen der Anfangsmasse  $M_a$  und der Masse  $M$  des Lagergutes zum Zeitpunkt  $t$  zu

$$\Delta M = M_a - M(t) . \quad (6)$$

Der zeitliche Massenverlust oder die Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = - \frac{dM}{dt} = - \dot{M} . \quad (7)$$

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

Wie bereits erläutert, breitet sich der Brand zunächst über die Kartonoberfläche aus und greift nach Durchbrand auf das Stoßschutzmaterial über.

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

$$\dot{Q} = - \dot{M} H_u . \quad (8)$$

Bei einer aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Brandlast sind die Massenströme und Heizwerte der Einzelkomponenten zu berücksichtigen, welches 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 näherungsweise der gewichtete Heizwert aus den Komponenten der Brandlast eingesetzt. Dieser ergibt sich nach folgender Beziehung

$$\bar{H}_U = \frac{\sum_{i=1}^n P_i H_{U,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n P_i H_{U,i} \quad (9)$$

Da in der Praxis die Tabellenwerte für  $H_{U,i}$  wegen Rußbildung, dem Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, Sauerstoffmangel und nicht ausreichende 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 theoretischen Heizwertes 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 Gewichte und Heizwerte erhält man für den Lageraufbau Karton mit Holzwohle einen Wert von  $\bar{H}_U = 15,4$  MJ/kg bzw. für den Lageraufbau Karton mit Polystyrol-Partikelschaum einen Wert  $\bar{H}_U = 22,0$  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 Holzwohle als Stoßschutzmaterial

$$\dot{Q}_{fHW} = -1000/60 \cdot 0,5 \cdot 15,4 \cdot \dot{M} \quad (10)$$

bzw. für Polystyrol-Partikelschaum

$$\dot{Q}_{fPS} = -1000/60 \cdot 0,5 \cdot 22,0 \cdot \dot{M} \quad (11)$$

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

Der tatsächliche Verlauf der Abbrandkurven kann bei den hier durchgeführten Versuchen im Unterschied zu den Ergebnissen in /2/ und /3/ nicht durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden. Dies ist damit zu erklären, daß im Gegensatz zu den bisherigen, an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Lagerbrandversuchen mit 4 Gitterboxenstapeln der Lageraufbau und die Zündung gemäß Bild 1 geändert wurde. Hierdurch kommt es zu Unterschieden in der Wärmefreisetzung, der Wärmeübertragung auf die benachbarte Brandlast, dem Austausch Abgas/Luft sowie den Strömungsverhältnissen.

Der Vergleich der Determinationskoeffizienten  $R^2$  ergibt, daß die Potenzfunktion und die lineare Funktion sowohl bei Holzwolle als auch bei Polystyrol-Partikelschaum den Bereich der Brandentwicklung am genauesten wiedergeben. Hierbei zeigt sich, daß die Potenzfunktion bei Holzwolle bei allen Abständen außer 0,1; 0,2 und 0,4 m und bei Polystyrol-Partikelschaum bei allen Abständen außer 0,2 m zutrifft. Für diese Abstände trifft die lineare Funktion zu.

Für Holzwolle ergeben sich für die Darstellung der Abbrandmasse hiernach folgende Beziehungen

$$\Delta M_{HW} = a_{IIHW} \cdot t^{b_{IIHW}} \quad (12)$$

bzw.

$$\Delta M_{\text{HW}} = a_{\text{IIHW}} + b_{\text{IIHW}} \cdot t \quad (13)$$

mit  $t$  in min und  $\Delta M$  in kg.

Die Abbrandgeschwindigkeit ergibt sich durch Differentiation dieser Gleichungen zu

$$\dot{M}_{\text{WW}} = a_{\text{IIHW}} \cdot b_{\text{IIHW}} \cdot t^{b_{\text{IIHW}} - 1} = a'_{\text{IIHW}} \cdot t^{b'_{\text{IIHW}}} \quad (14)$$

mit  $a'_{\text{IIHW}} = a_{\text{IIHW}} \cdot b_{\text{IIHW}}$  und  $b'_{\text{IIHW}} = b_{\text{IIHW}} - 1$

bzw.

$$\dot{M}_{\text{HW}} = b_{\text{IIHW}} \quad (15)$$

mit  $\dot{M}$  in kg/min.

Für Polystyrol-Partikelschaum enthält man entsprechend für die Abbrandmasse

$$\Delta M_{\text{PS}} = a_{\text{IIPS}} \cdot t^{b_{\text{IIPS}}} \quad (16)$$

bzw.

$$\Delta M_{\text{PS}} = a_{\text{IIPS}} + b_{\text{IIPS}} \cdot t \quad (17)$$

Die Abbrandgeschwindigkeiten ergeben sich zu

$$\dot{M}_{\text{PS}} = a_{\text{IIPS}} \cdot b_{\text{IIPS}} \cdot t^{b_{\text{IIPS}} - 1} = a'_{\text{IIPS}} \cdot t^{b'_{\text{IIPS}}} \quad (18)$$

mit  $a'_{\text{IIPS}} = a_{\text{IIPS}} \cdot b_{\text{IIPS}}$  und  $b'_{\text{IIPS}} = b_{\text{IIPS}} - 1$

bzw.

$$\dot{M}_{\text{PS}} = b_{\text{IIPS}} \quad (19)$$

Hierzu befinden sich Angaben zur Kurvenanpassung in Tabelle 4 und

Tabelle 5.

Bild 10 zeigt die Abbrandmasse und Bild 11 den zeitlichen Massenverlust (Abbrandgeschwindigkeit) als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$  für die verschiedenen Abstände und Stoßschutzmaterialien während der Brandentwicklungsphase.  $t_0$  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.

Analog zur vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit ist bei der Abbrandgeschwindigkeit die Tendenz zu erkennen, daß diese 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 Maximum des zeitlichen Massenverlustes bei einem Abstand von 0,2 m erreicht wird. Bei kleineren Abständen, in diesem Falle 0,1 u. 0,05 m nimmt dieser wieder ab. Dieser Maximalwert 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. Die Tendenz, daß die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit nach Bild 4 und 5, jedoch noch weit deutlicher die Abbrandgeschwindigkeit nach Bild 11 sowohl bei Holzwolle als auch bei Polystyrol-Partikelschaum bei sehr großen Abständen wieder zunehmen, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht erklärt werden.

Ebenfalls ist zu erkennen, daß die Abbrandgeschwindigkeit beim Stoßschutzmaterial Holzwolle unterhalb derer von Polystyrol-Partikelschaum liegt. Die Hauptsache hierfür ist die schnellere und größere Wärmefreisetzung und damit frühere Zündung des Nachbarstapels bei Polystyrol.

Bemerkenswert bei den hier durchgeführten Versuchen ist, daß bei Holzwolle bei den Abständen 0,1; 0,2 und 0,4 m und bei Poly-

styrol-Partikelschaum beim Abstand 0,2 m die Abbrandmasse nach der Zündphase näherungsweise linear verläuft. Es ist also kein eindeutiger Unterschied zwischen Brandentwicklungsphase und stationärem Abbrand zu erkennen, wie dies bei einer üblichen Abbrandkurve nach Bild 12 der Fall ist.

Für die hier durchgeführten Versuche ergibt sich der fühlbare Wärmestrom durch Einsetzen der Gleichungen (14) und (15) in (10) bzw. (18) und (19) in (11). Bild 13 zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$ . Es gelten hierzu sinngemäß die Erläuterungen zum zeitlichen Massenverlust nach Bild 11.

Der Quotient aus den fühlbaren Wärmeströmen bei Verwendung der Stoßschutzmaterialien Polystyrol-Partikelschaum und Holzwolle nach Bild 14 ist im wesentlichen größer 1 und macht daher die größere und schnellere Wärmefreisetzung bei ersterem deutlich. Dies ist, wie bereits erläutert, auf den höheren Heizwert des synthetischen Materiales zurückzuführen. An den ansteigenden Kurven ist zu erkennen, daß Polystyrol-Partikelschaum mit wachsender Versuchszeit einen wesentlich größeren Einfluß auf die Wärmefreisetzung gewinnt als Holzwolle.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

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

Der Versuchsaufbau wurden gegenüber den bisherigen Untersuchungen derart modifiziert, daß der Einfluß des Abstandes zwischen zwei parallelen Gitterboxensäulen mit eingelagerter Brandlast in Form von Wellpappenkartons mit unterschiedlichen Füllungen bezüglich der Brandausbreitung untersucht wurde.

Rückschlüsse auf die Brandausbreitung ergaben sich hierbei aus den Temperatur- und Abbrandmessungen sowie der Auswertung von Videoaufzeichnungen.

Die Untersuchungen zeigten, daß sich der Brand zunächst relativ schnell auf der Wellpappeoberfläche ausbreitet und anschließend auf das Innere der Brandlast übergreift. Die Geschwindigkeit hängt bei gleicher Umverpackung und Lagergut in starkem Maße vom Abstand zwischen den gelagerten Stoffen sowie dem Stoßschutzmaterial ab.

Es hat sich dabei gezeigt, daß bei den untersuchten Abständen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenwurzel auf der Wellpappeoberfläche bei geringerer Spaltweite infolge der schnelleren Wärmefreisetzung zunimmt. Der zeitliche Massenverlust, der ein Maß für die volumetrische Ausbreitung des Brandes darstellt, nimmt mit kleinerem Abstand ebenfalls zu. Jedoch ist hierbei eine untere Grenze erkennbar, ab der der Austausch Luft/Abgas nicht mehr im erforderlichen Maße stattfindet und die Strömungswiderstände im Spalt nicht mehr zu vernachlässigen sind. Dieser Abstand beträgt bei Holzwolle und Polystyrol-Partikelschaum jeweils 0,2 m. Bei kleineren Abständen ergibt sich eine Abnahme des zeitlichen Massenverlustes. Ab einem oberen Grenzabstand reicht schließlich die freiwerdende Energie des gezündeten Stapels nicht mehr aus, den Nachbarstapel durch Wärmeaustausch zu entzünden. Dieser beträgt bei Holzwolle 1,0 m und bei Polystyrol-Partikelschaum 1,4 m.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein,D.:           Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 1: Literaturlauswertung.  
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemein-  
schaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrange-  
legenheiten.  
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-  
technik 1985.
- /2/ Brein,D.:           Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 2: Großbrandversuche 1.  
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemein-  
schaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrran-  
gelegenheiten.  
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-  
technik 1986.
- /3/ Brein,D.:           Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 3: Großbrandversuche 2.  
Forschungsbericht Nr. 64 der Arbeitsgemein-  
schaft der Innenministerien der Bundesländer.  
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrran-  
gelegenheiten.  
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-  
technik 1988.
- /4/ Kunkelmann,J.:     Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 4: Großbrandversuche 3.  
Forschungsbericht Nr. 65 der Arbeitsgemein-  
schaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1988.

8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1 : Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes

Heizwerte:

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

Massen pro Karton:

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

Masse Weichfaserstab: 0,09 kg zuzüglich 100 ml Äthylalkohol

Tabelle 2 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Versuchsserie Teil III, Höhe die die Flammwurzel erreicht hat und vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, Holzwolle)

Abstand m	z <sub>bHW</sub> 1)	R <sup>2</sup>	v <sub>HW</sub> 1)
	m		m/min
-----			
	a <sub>IHW</sub> ; b <sub>IHW</sub>		a' <sub>IHW</sub> ; b <sub>IHW</sub>
0,05	0,09; 4,20	0,98	0,38; 4,20
0,1	0,06; 4,21	0,90	0,25; 4,21
0,2	0,22; 2,19	0,96	0,48; 2,19
0,4	0,25; 1,88	0,99	0,47; 1,88
0,6	0,26; 1,60	0,99	0,42; 1,60
0,8	0,31; 1,46	0,99	0,45; 1,46
1,0	0,37; 1,26	0,98	0,47; 1,26
1,1	0,29; 1,44	1,00	0,42; 1,44

$$1) z_{bHW} = a_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} \cdot t}$$

$$v_{HW} = a_{IHW} \cdot b_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} \cdot t} = a'_{IHW} \cdot e^{b_{IHW} \cdot t}$$

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

Abstand m	z <sub>bPS</sub> 2) m		v <sub>PS</sub> 2) m/min	
	a <sub>IPS</sub> ;b <sub>IPS</sub>	R <sup>2</sup>	a' <sub>IPS</sub> ;b' <sub>IPS</sub>	
0,05	5,72;2,16	0,98	12,36;1,16	
0,1	5,86;3,86	0,93	22,62;2,86	
0,2	2,40;2,30	0,96	5,52;1,30	
0,4	1,57;1,43	0,99	2,25;0,43	
0,6	1,49;1,55	0,99	2,31;0,55	
0,8	1,45;1,45	0,99	2,10;0,45	
1,0	1,42;1,35	0,99	1,92;0,35	
1,2	1,51;1,36	0,99	2,05;0,36	
1,4	1,44;1,33	1,00	1,92;0,33	
1,5	1,37;1,36	0,99	1,86;0,36	
1,6	1,34;1,41	0,99	1,89;0,41	

$$2) \quad z_{bPS} = a_{IPS} \cdot t \quad b_{IPS}$$

$$v_{PS} = a_{IPS} \cdot b_{IPS} \cdot t \quad b_{IPS}^{-1} = a'_{IPS} \cdot t \quad b'_{IPS}$$

Tabelle 4 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Versuchsserie Teil III, Abbrandmasse, Holzwole)

Abstand m	$\Delta M_{\text{HW}}^{3)}$ kg	$t_0$ s	$\dot{M}_{\text{HW}}^{3)}$ kg/min	$\dot{Q}_{\text{fHW}}^{3)}$ kW	
$a_{\text{IIHW}}; b_{\text{IIHW}}$		$R^2$	$a'_{\text{IIHW}}; b'_{\text{IIHW}}$ bzw. $b_{\text{IIHW}}$	$a'_{\text{IIHW}}; b'_{\text{IIHW}}$ bzw. $\dot{Q}_{\text{f}}$	
0,05	0,49;2,23	0,99	87	1,09;1,23	-139,88;1,23
0,1	-6,83;5,64	0,99	81	5,64	-723,80
0,2	-6,77;6,65	1,00	76	6,65	-853,42
0,4	-8,96;6,54	1,00	91	6,54	-839,30
0,6	0,32;2,21	0,98	101	0,71;1,21	-91,12;1,21
0,8	0,38;2,34	0,99	96	0,89;1,34	-114,22;1,34
1,0	0,36;2,13	1,00	99	0,77;1,13	-98,82;1,13
1,1	0,41;2,10	0,99	96	0,86;1,10	-110,37;1,10

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

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

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

Ausnahme bei 0,1;0,2 und 0,4 m:

$$\Delta M_{\text{HW}} = a_{\text{IIHW}} + b_{\text{IIHW}} \cdot t$$

$$\dot{M}_{\text{HW}} = b_{\text{IIHW}}$$

$$\dot{Q}_{\text{fHW}} = -1000/60 \cdot 0,5 \cdot 15,4 \cdot \dot{M}_{\text{HW}}$$

Tabelle 5 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Versuchsserie Teil III, Abbrandmasse, Polystyrol)

Abstand m	$\Delta M_{PS}$ 4) kg		$t_0$ s	$\dot{M}_{PS}$ 4) kg/min	$\dot{Q}_{fPS}$ 4) kW
-----				-----	
$a_{IIIPS}; b_{IIIPS}$		$R^2$		$a'_{IIIPS}; b'_{IIIPS}$ bzw. $b_{IIIPS}$	$a''_{IIIPS}; b''_{IIIPS}$ bzw. $\dot{Q}_{fPS}$
0,05	0,42;2,49	1,00	84	1,05;1,49	-192,50;1,49
0,1	0,71;2,55	0,99	71	1,81;1,55	-331,83;1,55
0,2	-9,26;8,77	1,00	71	8,77	-1607,83
0,4	0,28;2,99	0,98	86	0,84;1,99	-154,00;1,99
0,6	0,26;2,87	1,00	96	0,75;1,87	-137,50;1,87
0,8	0,34;2,40	1,00	91	0,82;1,40	-150,33;1,40
1,0	0,34;2,30	1,00	96	0,78;1,30	-143,00;1,30
1,2	0,49;2,04	1,00	86	1,00;1,04	-183,33;1,04
1,4	0,31;2,44	1,00	96	0,76;1,44	-139,33;1,44
1,5	0,25;2,46	1,00	106	0,62;1,46	-113,67;1,46
1,6	0,22;2,66	1,00	106	0,59;1,66	-108,17;1,66

4)  $\Delta M_{PS} = a_{IIIPS} \cdot t^{b_{IIIPS}}$  mit t in min

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

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

Ausnahme bei 0,2 m:

$$\Delta M_{PS} = a_{IIIPS} + b_{IIIPS} \cdot t$$

$$\dot{M}_{PS} = b_{IIIPS}$$

$$\dot{Q}_{fPS} = - 1000/60 \cdot 0,5 \cdot 22,0 \cdot \dot{M}_{PS}$$

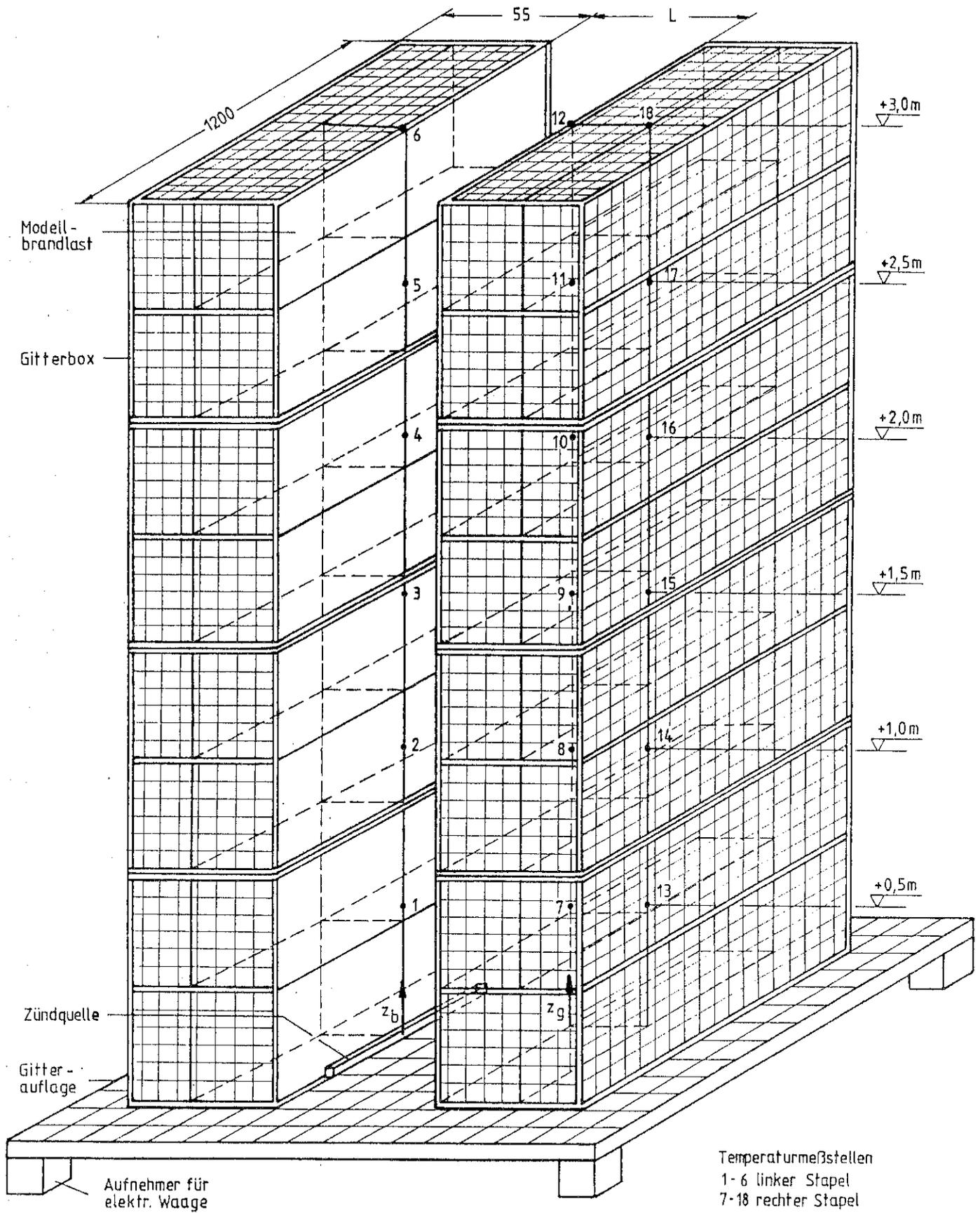


Bild 1 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Angabe der Temperaturmeßstellen.

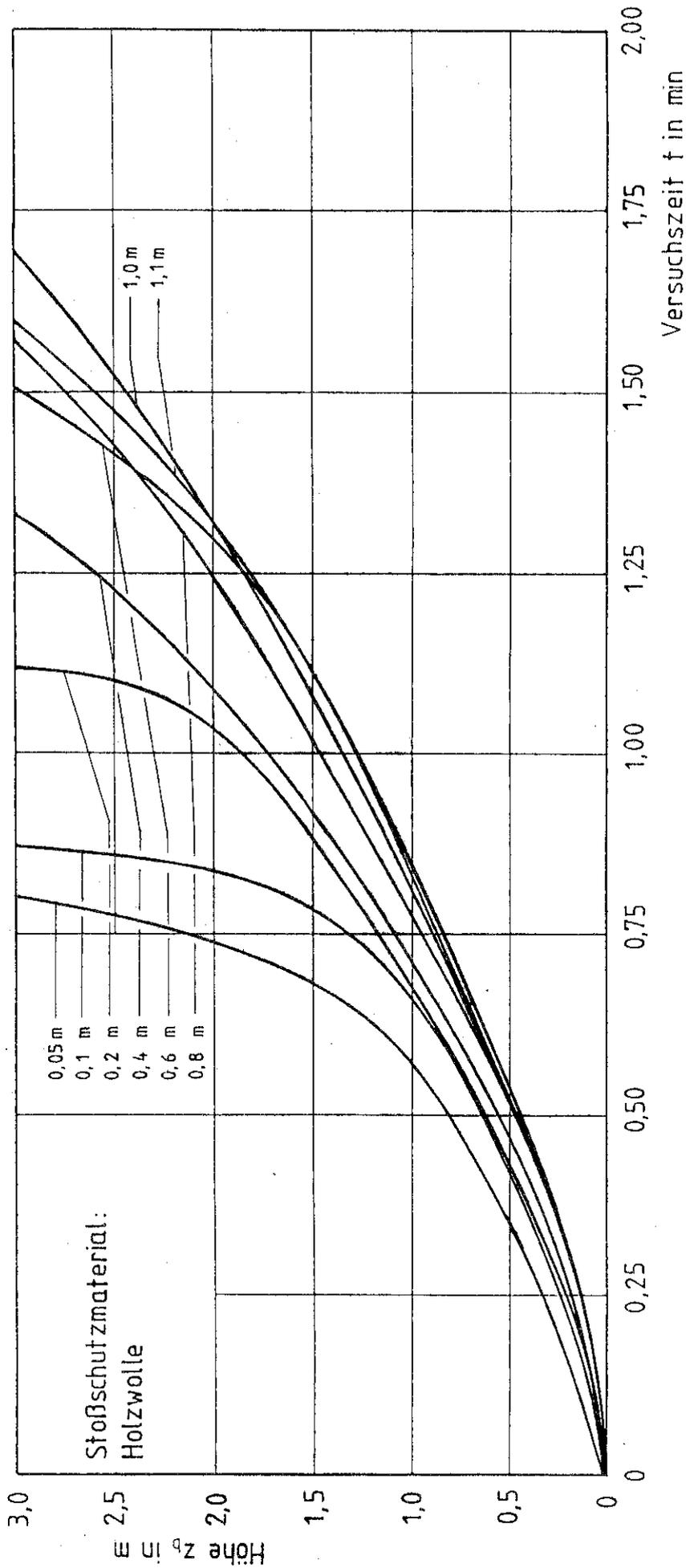


Bild 2 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit  $t$  bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterials Holzwolle.

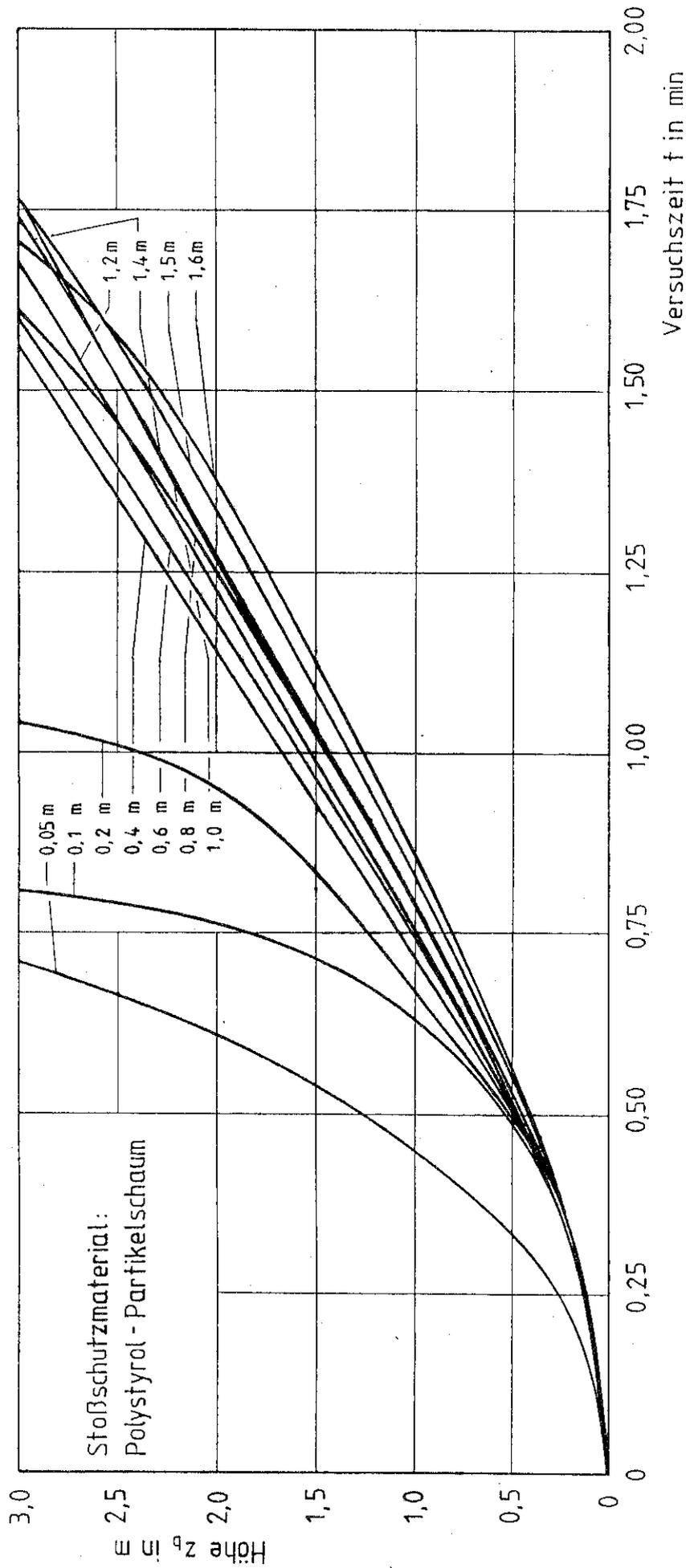


Bild 3 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit  $t$  bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterialies Polystyrol-Partikelschaum.

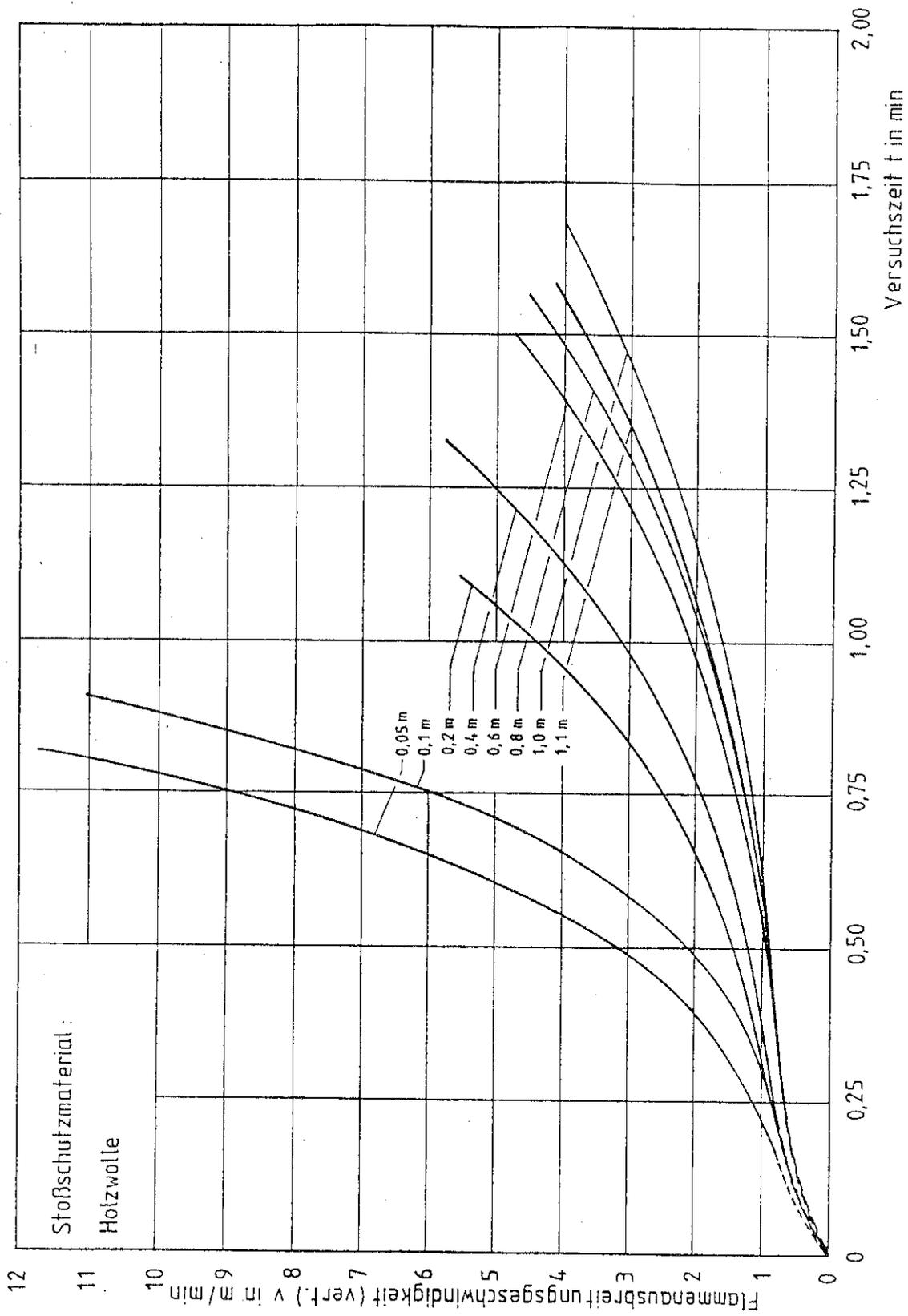


Bild 4 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit  $t$  bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterialies Holzwohle.

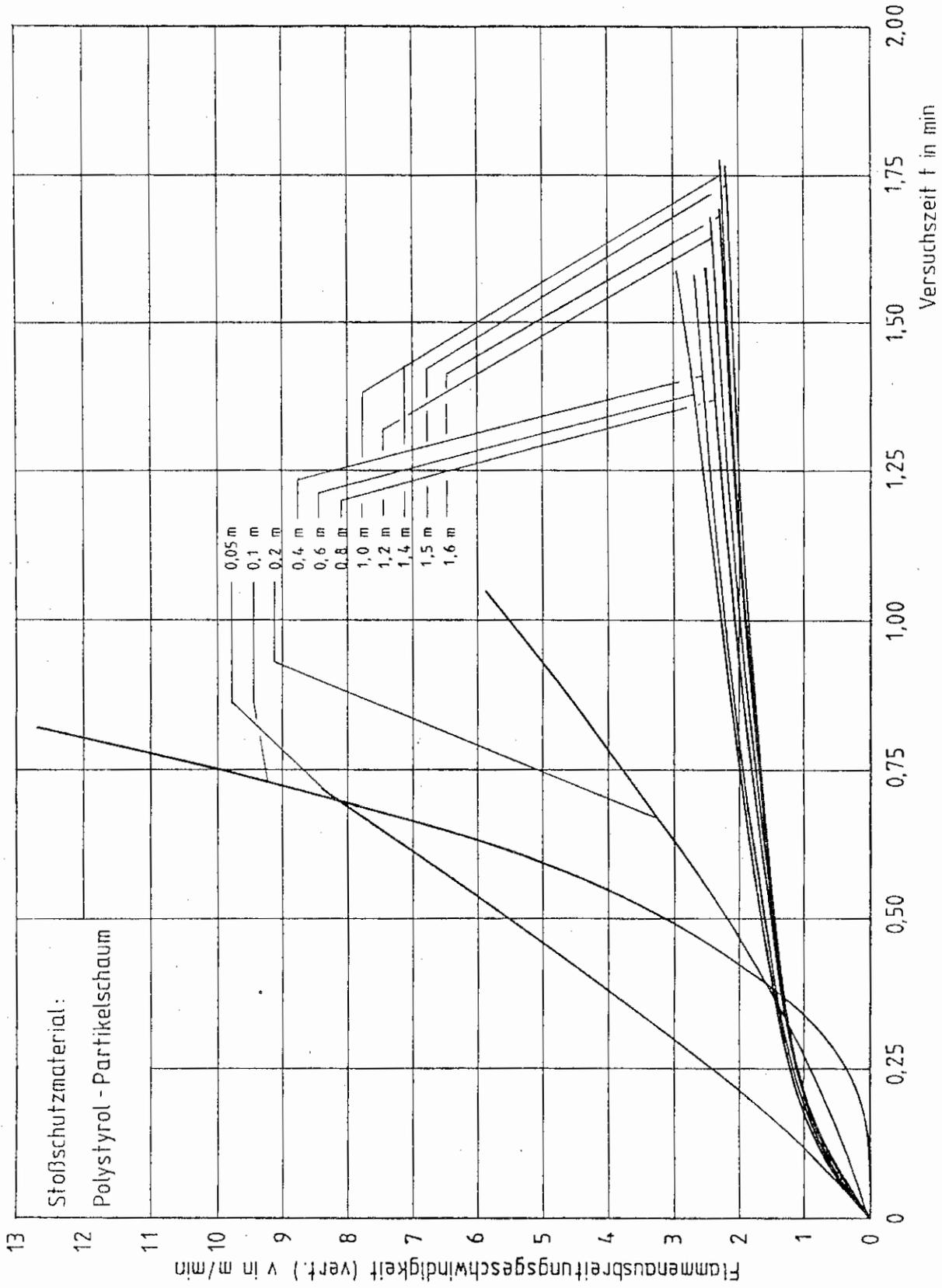


Bild 5 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit t bei verschiedenen Abständen unter Verwendung des Stoßschutzmaterialies Polystyrol-Partikelschaum.

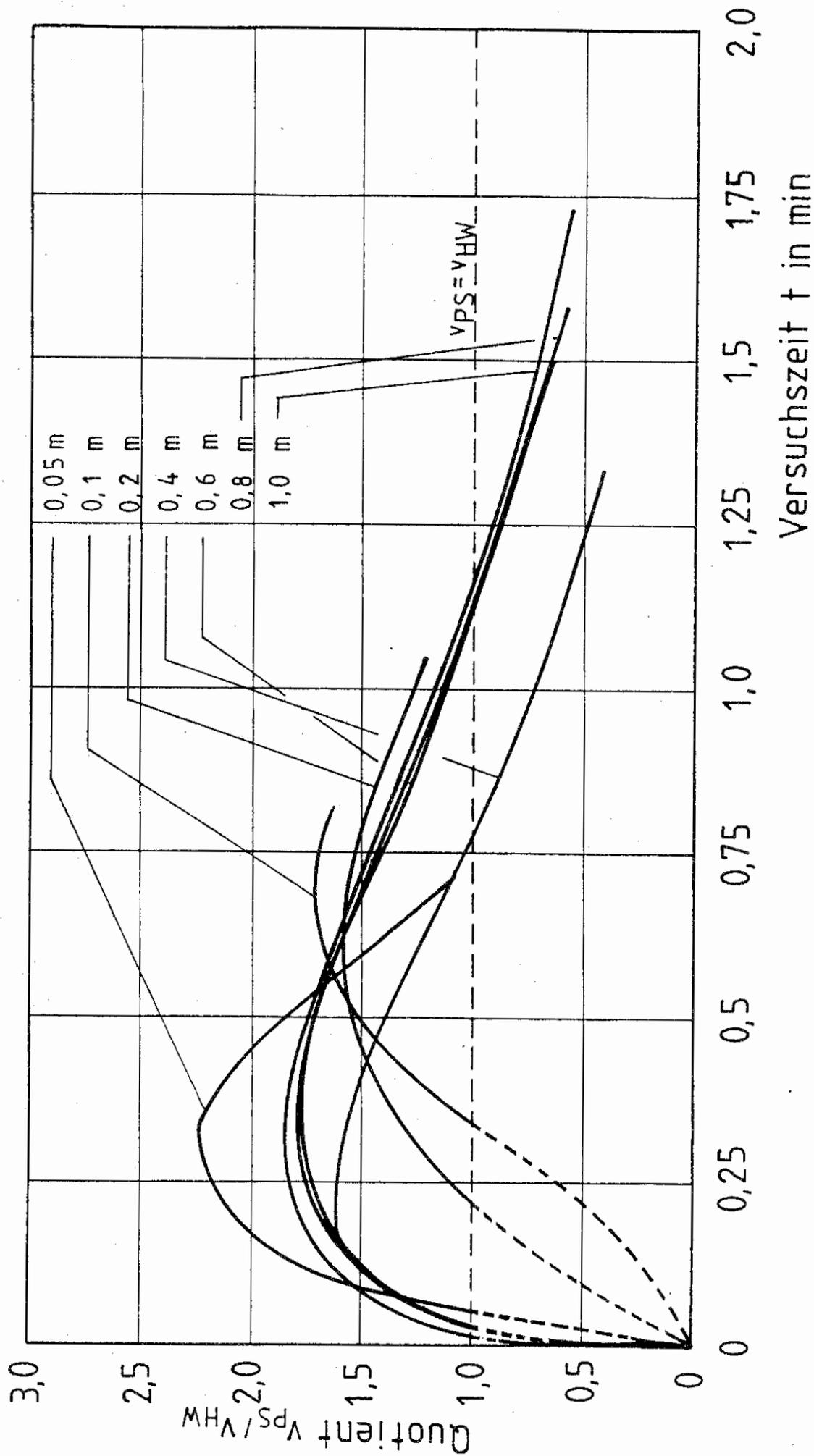


Bild 6 Quotient der Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten bei Verwendung der Stoßschutzmaterialien Polystyrol-Partikelschaum und Holzwolle als Funktion der Versuchszeit und des Abstandes.

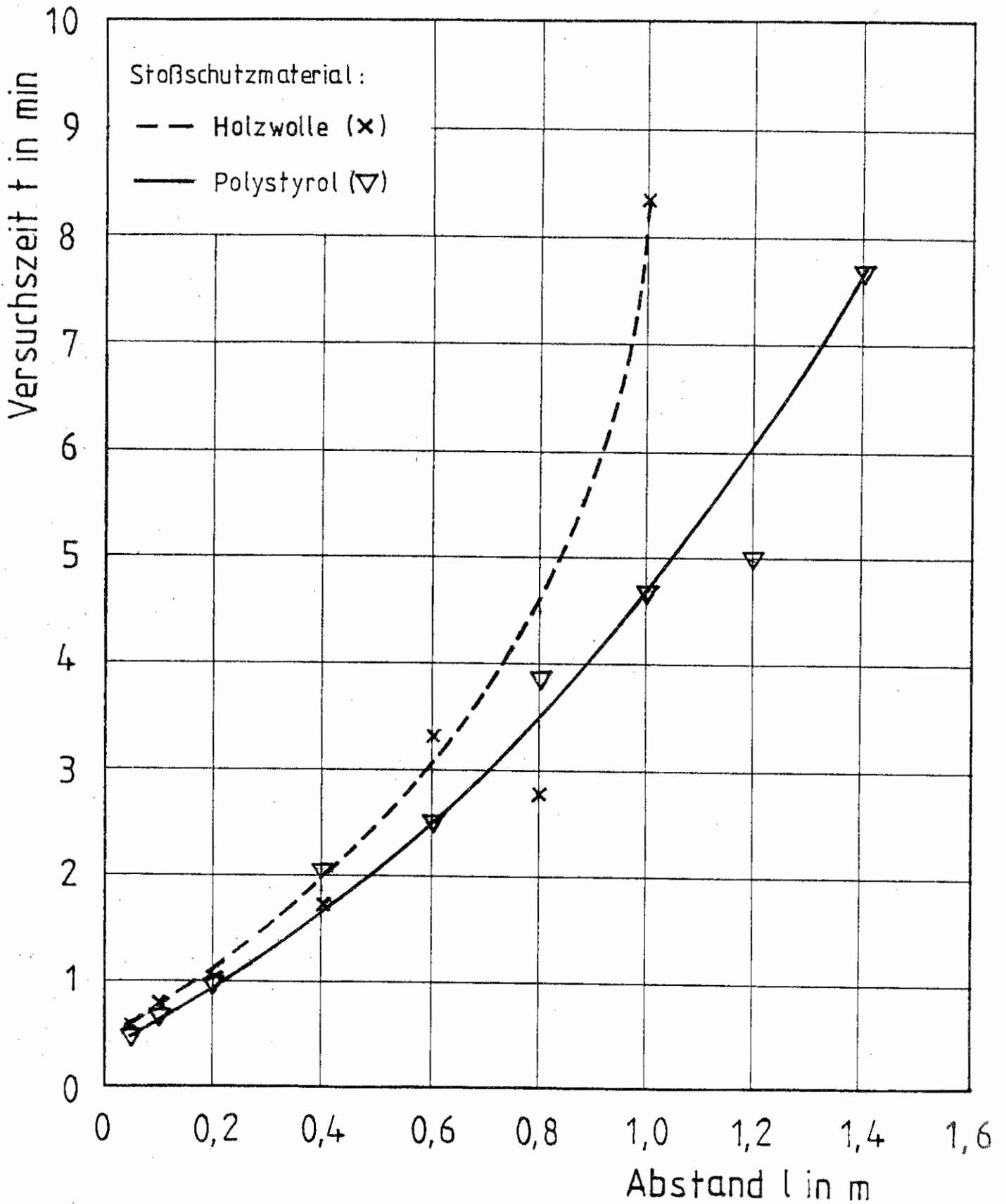


Bild 7. Versuchszeit, bei der sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzündet.

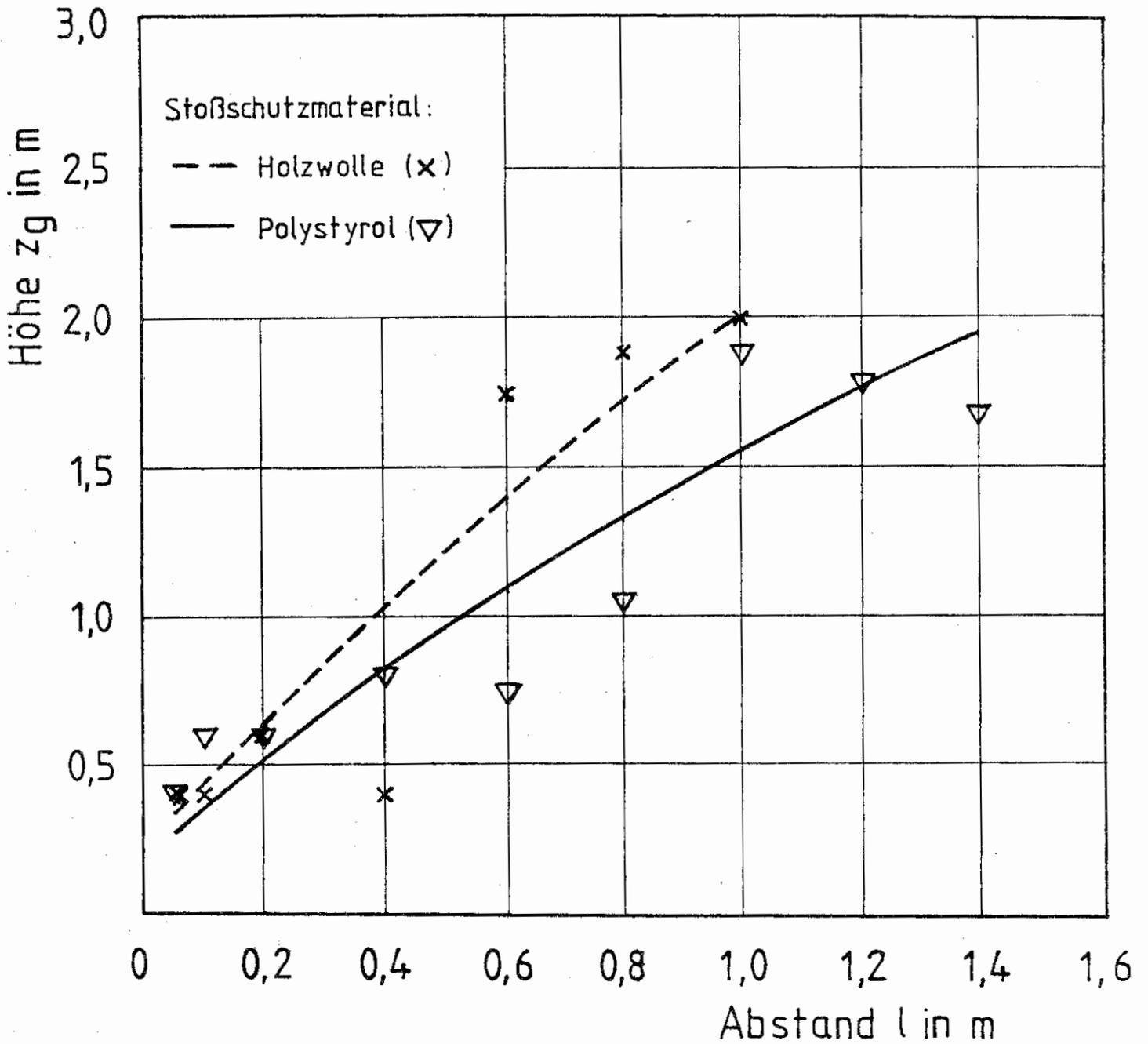


Bild 8 Höhe, bei der sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeaustausch als Funktion des Abstandes unter Berücksichtigung der verschiedenen Stoßschutzmaterialien entzündet.

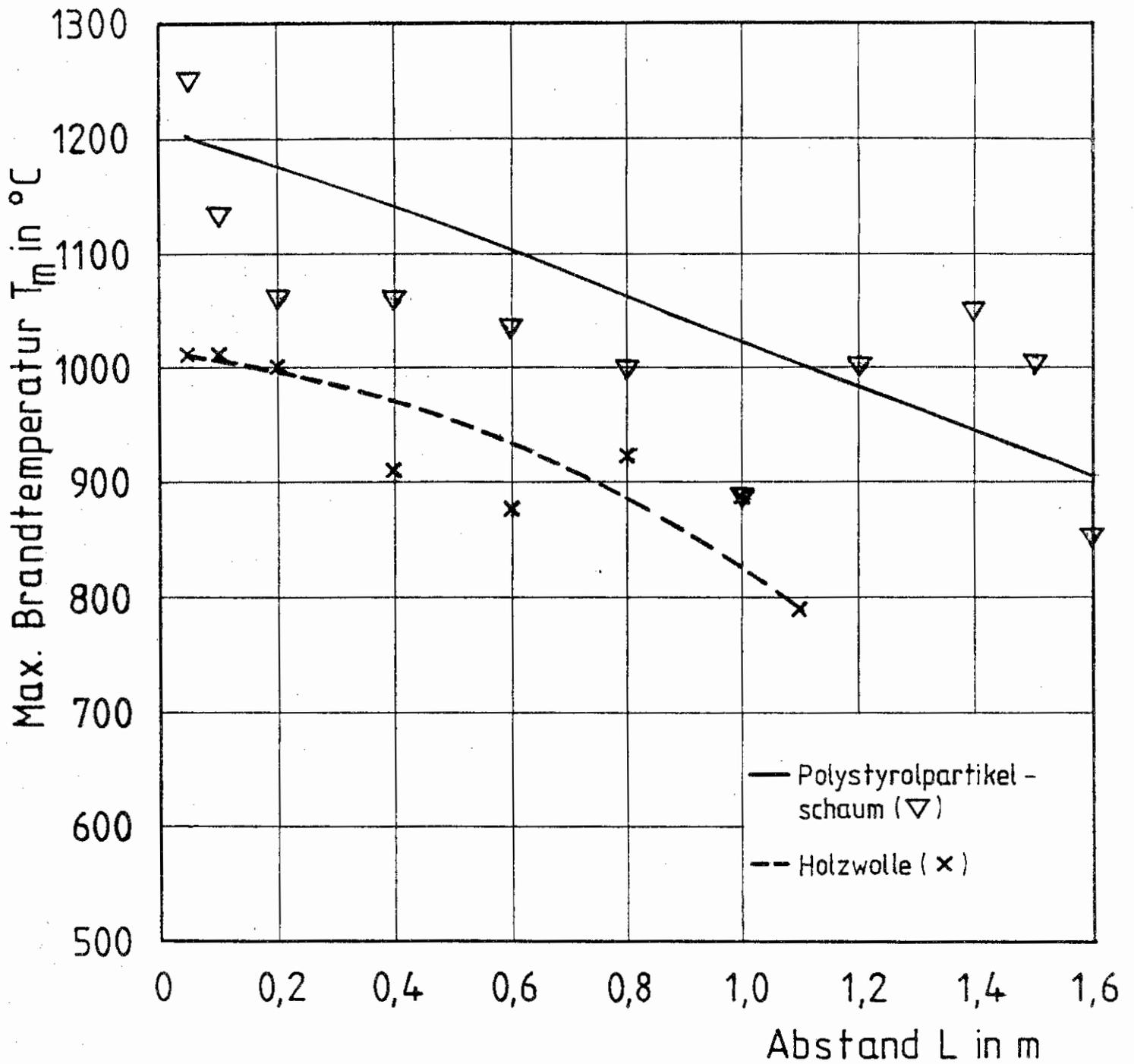


Bild 9 Maximale Brandtemperatur als Funktion des Abstandes bei verschiedenen Stoßschutzmaterialien.

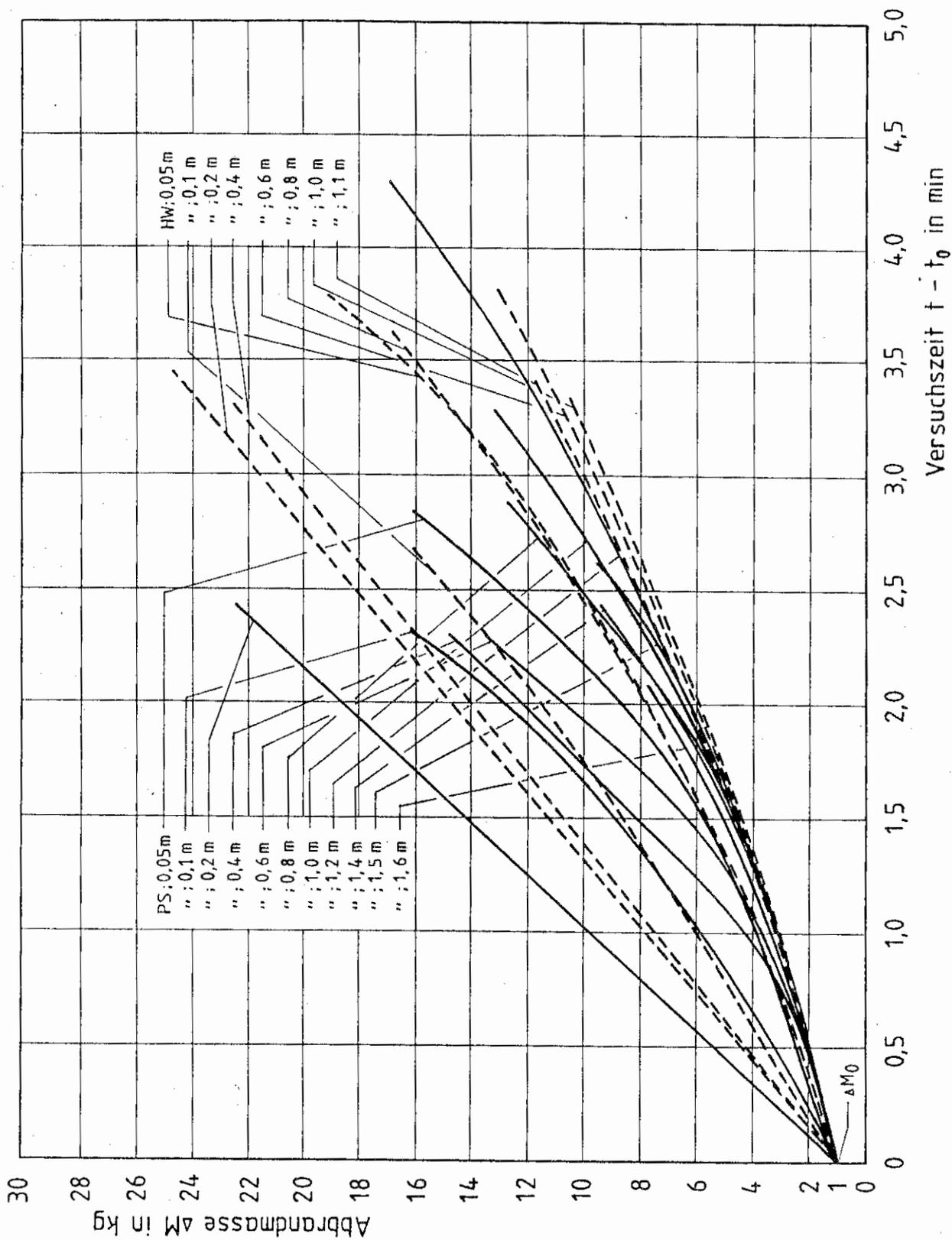


Bild 10 Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$  bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

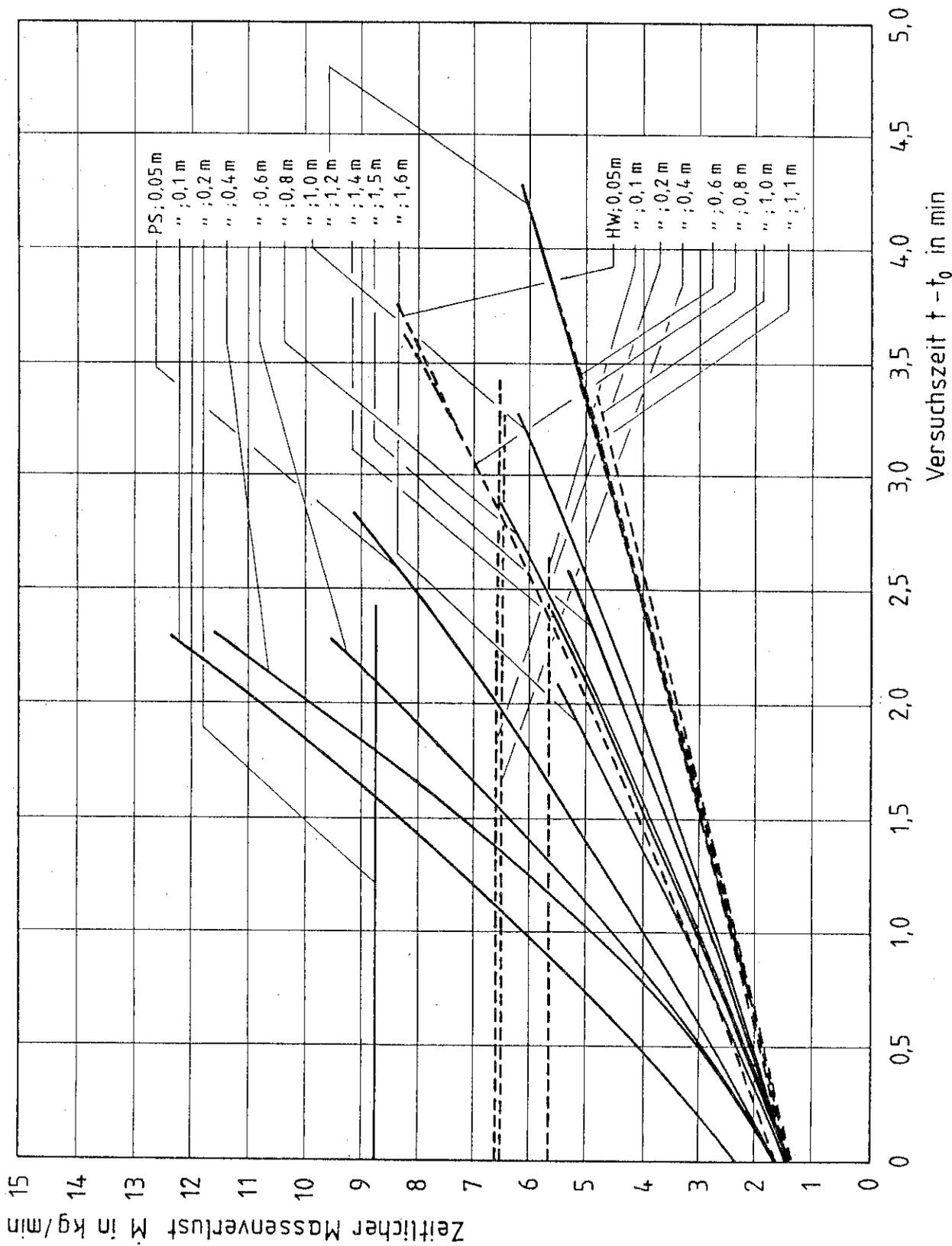


Bild 11 Zeitlicher Massenverlust als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$  bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

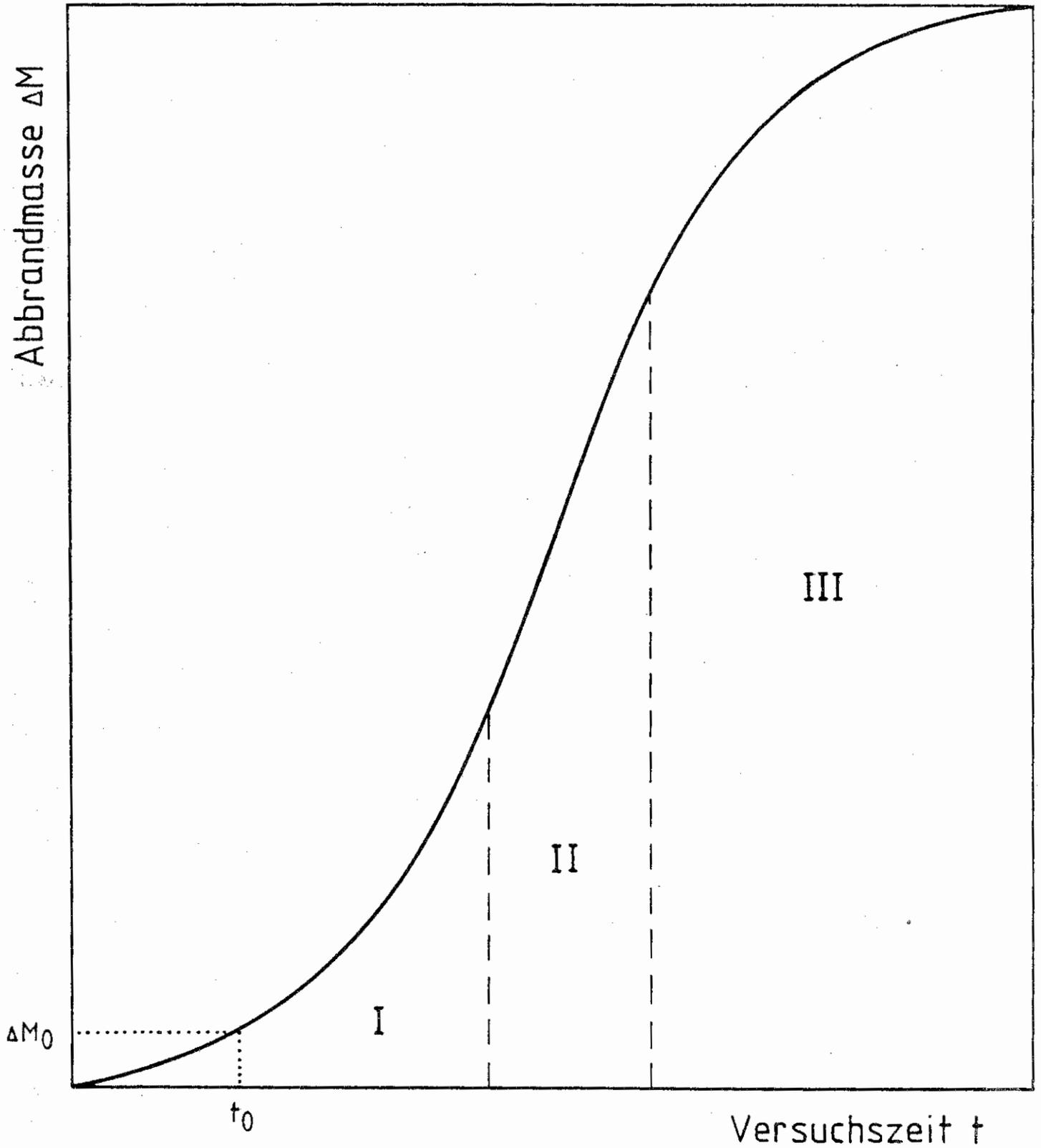


Bild 12 Vollständiger Verlauf der Abbrandmasse als Funktion der Versuchszeit.

- Bereich I Brandentwicklungsphase
- Bereich II Stationärer Abbrand
- Bereich III Abklingphase

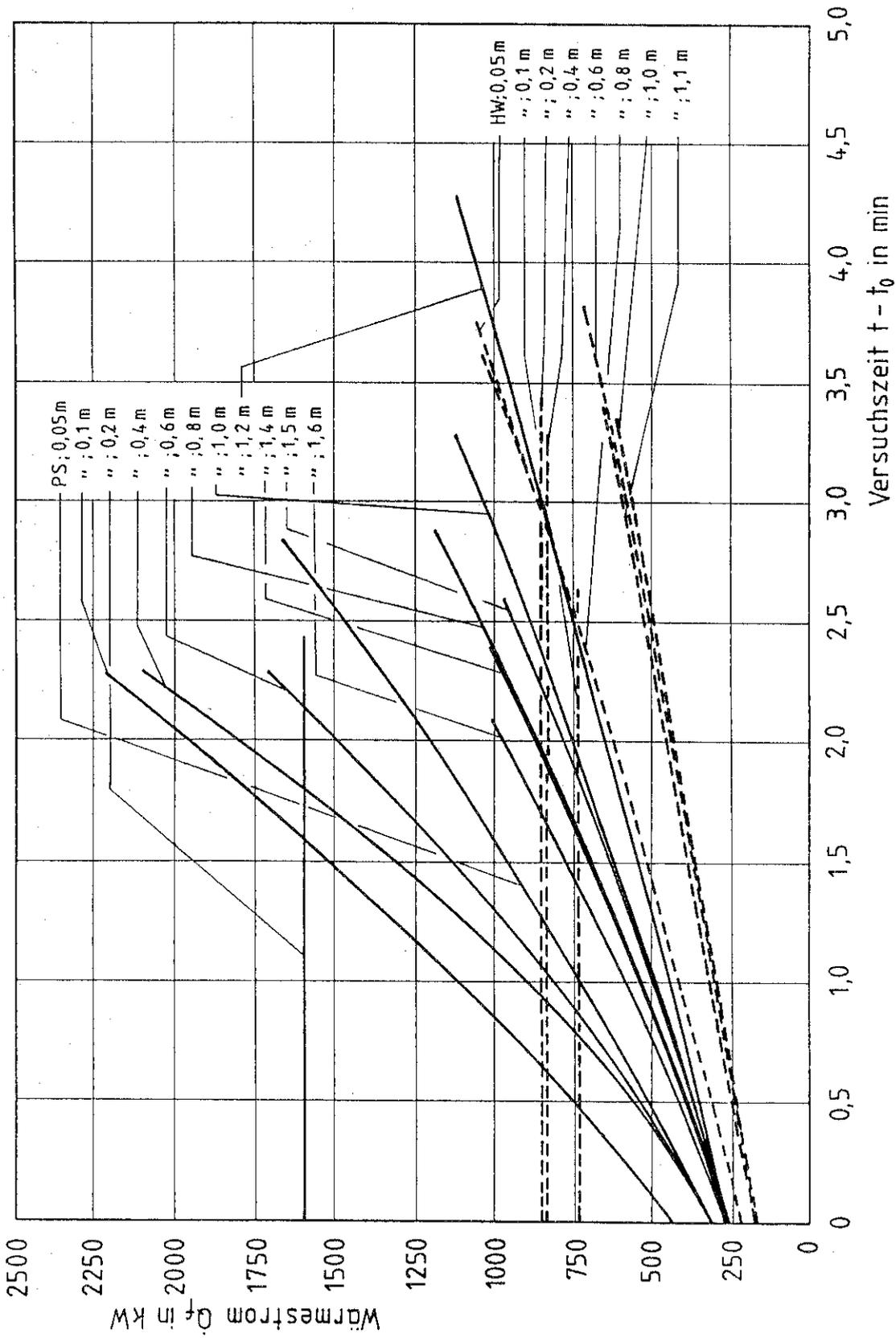


Bild 13 Fühlbarer Wärmestrom als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$  bei verschiedenen Abständen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoßschutzmaterialien.

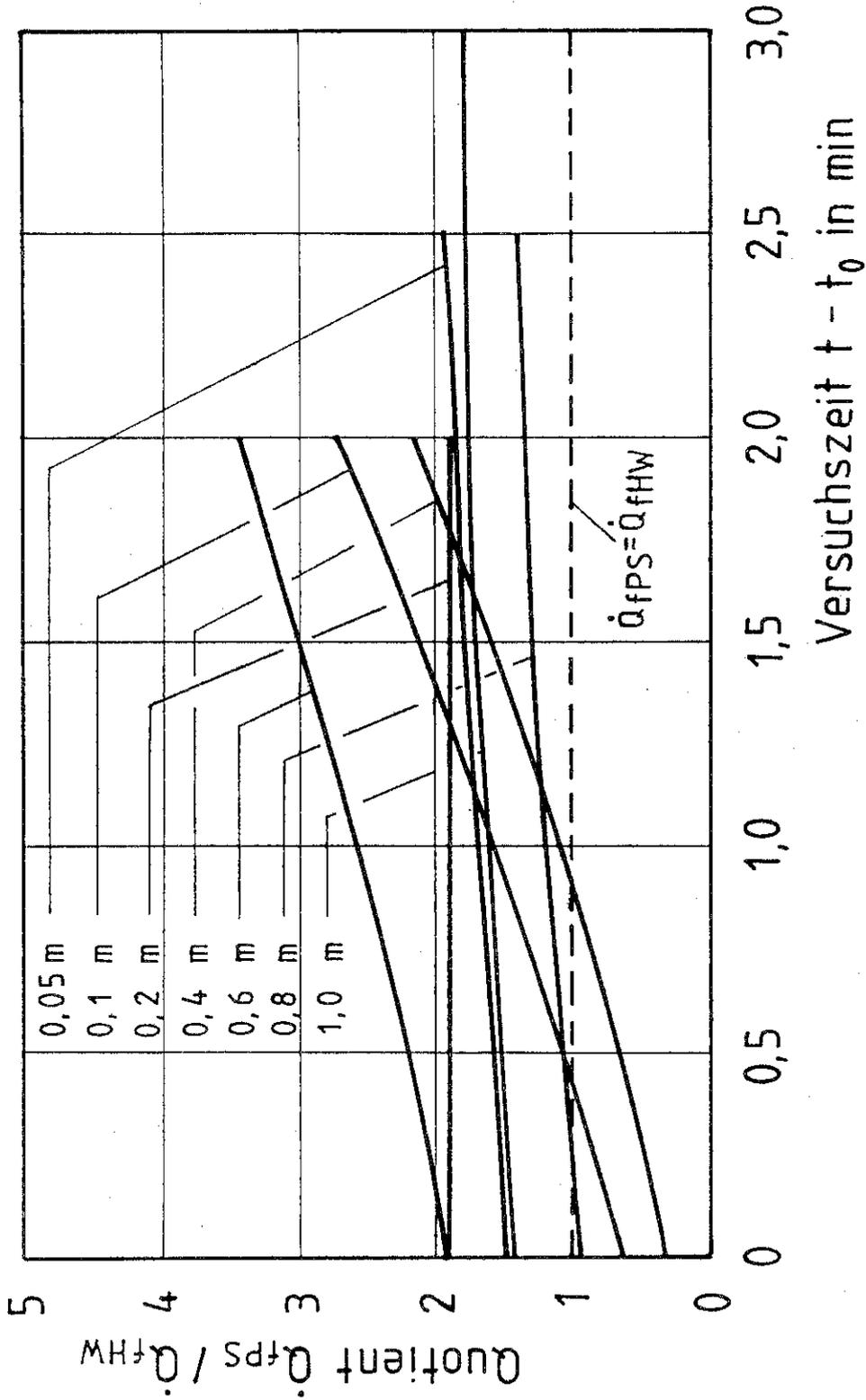


Bild 14 Quotient der fühlbaren Wärmeströme bei Verwendung von Polystyrol-Partikelschaum bzw. Holzwolle als Funktion der Versuchszeit  $t - t_0$  bei vergleichbaren Abständen.