

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil 4: Großbrandversuche 3

65

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

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

Forschungsbericht Nr.65

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 4: Großbrandversuche 3

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Juni 1988

FA.Nr. 113 (2/86)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMELZEICHEN	1
1. EINLEITUNG	2
2. VERSUCHSPROGRAMM	3
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	5
3.1 Vorversuche und Versuchsserie I	5
3.2 Versuchsserie II	8
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN	9
4.1 Vorversuche und Versuchsserie I	9
4.2 Versuchsserie II	12
5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE	13
6. ZUSAMMEMFASSUNG	22
7. LITERATURVERZEICHNIS	24
8. TABELLEN UND BILDER	26

FORMELZEICHEN

a_I	Regressionskoeffizient (Versuchsserie Teil I)
b_I	Regressionskoeffizient (Versuchsserie Teil I)
a_{II}	Regressionskoeffizient (Versuchsserie Teil II)
b_{II}	Regressionskoeffizient (Versuchsserie Teil II)
B_{II}	Multiplikationsfaktor
dt	differentielles Zeitelement
dz	differentielles Wegelement in vertikaler Richtung
HL	Zündposition hinten links
H_u	unterer Heizwert in MJ/kg
L	Abstand zwischen den Lagerattrappen in m ¹⁾
L_T	Abstand zwischen Temperaturmeßstelle und Wellpappe- oberfläche in mm
ML	Zündposition Mitte links
MR	Zündposition Mitte rechts
R^2	Determinationskoeffizient
t	Versuchszeit in min ¹⁾
t_1	Zeitpunkt 1 in min
t_2	Zeitpunkt 2 in min
t_v	Verdoppelungszeit in s
T_m	Maximale Brandtemperatur in °C
ΔT	Temperaturdifferenz in K
v	Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in m/min
z	Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat in m
z_g	Höhe, bei der die gegenüberstehende Lagerattrappe zündet in m

1) Falls im Text nicht anders angegeben.

1. EINLEITUNG

Brände im Lagerbereich führen aufgrund der zunehmenden Wertekonzentration und der Verwendung von Materialien mit erhöhtem Brandrisiko zu hohen Schäden, wenn Brandmeldung und -bekämpfung nicht rechtzeitig erfolgen.

Die Brandausbreitung bei gestapelten brennbaren Stoffen wird dabei von den Stoffeigenschaften, der räumlichen Zuordnung der Stoffe zueinander, der Lage und Größe der Zündquelle und der baulichen Umgebung beeinflusst.

Da die qualitativen, aber insbesondere quantitativen Auswirkungen bezüglich einer Veränderung einzelner dieser Einflußgrößen bis heute nur für relativ wenige Einzelfälle untersucht worden sind, läuft seit einiger Zeit ein mehrjähriges Forschungsprogramm an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), das sich mit dieser Thematik befaßt /1,2/.

Dabei sollen die Brandausbreitungsvorgänge, insbesondere die Geschwindigkeit der Brandausbreitung in Abhängigkeit von den obengenannten Parametern untersucht werden, da hiervon auch die Planung von selbsttätigen ortsfesten Löschanlagen und von Brandmeldeanlagen für Lagergebäude beeinflusst wird.

Bei den Lagerbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) wurde damit begonnen, parallel zu den Versuchen mit konstantem horizontalem Abstand zwischen der gelagerten Brandlast den Einfluß unterschiedlicher Abstände zwischen den gelagerten Gütern auf die Geschwindigkeit der Brandausbreitung und die Gefährdung benachbarter Brandlast zu untersuchen.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Um eine Aussage darüber machen zu können, wie schnell sich ein Brand in vertikaler Richtung und auf eine benachbarte Brandlast ausbreitet, ist es sinnvoll, die Vorgänge zunächst an einem stark vereinfachten Modell zu betrachten und dieses dann in Stufen auf den realen Lagerfall zu erweitern. Es ist dadurch möglich, Erkenntnisse zu gewinnen, die man am komplizierten Versuchsobjekt evtl. übersehen würde, die aber zum Verständnis der Gesamtsituation wichtig sind. Zudem können am vereinfachten Modell leichter Detailstudien betrieben, d.h. weitere Versuchsparameter verändert werden, um dann bei der Erweiterungsstufe entscheiden zu können, ob diese erforderlich sind oder nicht bzw. nicht zweckmäßig sind und daher den Erfordernissen entsprechend angepaßt werden müssen. Hierunter zählen z.B. die Lage und Größe der Zündquelle sowie die Anzahl und Position der Temperaturmeßstellen.

Für die erste Versuchsserie (Teil I) wurden zwei parallel aufgestellte Lagerattrappen gewählt, bei denen als Brandlast einlagige Wellpappe verwendet wurde. Die Zündung erfolgte jeweils am Fußpunkt einer Attrappe. Dieser einfache Versuchsaufbau ist dafür geeignet, einen ersten Einblick in die Problematik zu gewähren, wobei evtl. Änderungen an den Versuchsparametern im Rahmen der Möglichkeiten relativ einfach durchzuführen sind.

Die zweite Versuchsserie (Teil II) umfaßt die Untersuchung des Brandverhaltens zweier paralleler Lagersäulen, bei denen die Brandlast (gefüllte Wellpappenkartons) ähnlich einem Blocklager gestapelt ist. Die Zündung erfolgt jeweils an einer Säule am Fußpunkt. Dieser Versuchsaufbau wurde deswegen gewählt, da durch die dichte Packung der Kartons jeweils eine spaltfreie Kartongrenzfläche entsteht, die direkt vergleichbar mit den Versuchen der ersten Versuchsserie ist. Dies hat gleichzeitig den Nebeneffekt, daß die Blocklagerung in die Untersuchungen mit aufgenommen wurde, da diese in der Praxis ebenfalls vorkommt und eine Erhöhung des Gefährdungspotentials darstellt. Dem Verfasser kam

es bei diesen Versuchen hauptsächlich darauf an, wie sich der kritische Abstand, bei dem der Nachbarstapel gerade noch gezündet wird, bei Erhöhung der Brandlast ändert. An dieser Stelle soll jedoch darauf hingewiesen werden, daß Meßergebnisse, insbesondere Temperaturmessungen nur bedingt zur Auswertung herangezogen werden können, da im fortgeschrittenen Brandstadium mit einem Zusammenfallen der Stoffe gerechnet werden muß und damit die Temperaturmeßfühler nicht mehr in dem erforderlichen Maße an der vorgegebenen Meßstelle fixiert sind. Dies führt zu einer Verfälschung des Meßergebnisses. Das Zusammenfallen des Lagergutes bewirkt im realen Brandfall, daß die Zündung benachbarter Brandlast begünstigt wird und gleichzeitig Angriffswege der Feuerwehr versperrt werden können. Die Problematik der Blocklagerung soll jedoch zunächst nur gestreift werden, da sich die bisherigen Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik hauptsächlich mit der Regallagerung befaßten.

Die dritte Versuchsserie (Teil III, Versuchsserie begonnen) umfaßt die Untersuchung des Brandverhaltens zweier paralleler Gitterboxensäulen mit eingelagerter Brandlast, zwischen denen der Abstand variiert wird. Die Zündung erfolgt in analoger Weise zu den vorherigen Versuchen. Diese Form von Lagerung hat meß- und sicherheitstechnisch den Vorteil, daß die bei der Blocklagerung aufgeführten Nachteile hier in weit geringerem Maße auftreten. Es ist hierbei jedoch mit abweichenden Versuchsergebnissen zu rechnen, da sich zwischen den Gitterboxen Spalte ausbilden, die sich auf die Brandausbreitung auswirken können.

Als vierte und vorläufig letzte Versuchsserie (Teil IV) ist geplant, den bisherigen Lageraufbau, bei dem vier Gitterboxenstapel in der Fläche angeordnet wurden, durch Variation des horizontalen Abstandes zu modifizieren.

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.

3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

3.1 Vorversuche und Versuchsserie I

Für die Durchführung der Brandversuche im Realmaßstab wurde ein Versuchsstand in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet, der entsprechend den jeweiligen Anforderungen modifiziert bzw. erweitert wurde.

Der Versuchsaufbau und die Abmessungen sind der Prinzipskizze in Bild 1 zu entnehmen. An je einem Metall-Gestell wurden nicht-brennbare Stütz- bzw. Trägerplatten aus asbestfreiem Fibersilikat befestigt, auf denen handelsübliche einlagige Wellpappe mittels Draht fixiert wurde. Zwei identische Gestelle wurden parallel zu einander aufgestellt und zwischen beiden der gewünschte Abstand durch Verschieben eingestellt. In Folge der geringen Wärmeleitfähigkeit der Fibersilikat-Platten von ca. $0,175 \text{ W/mK}$ nach /3/ wirken diese als Wärmeisolierung, sodaß der Wärmeaustausch hauptsächlich auf den Bereich zwischen beiden Platten und der Luft beschränkt bleibt und der Wärmeaustausch mit der Luft auf der dem Brand abgewandten Seite in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Die Einflußgrößen auf die Brandausbreitung bei gelagerten Stoffen sind bei Brein /2/ aufgeführt. An beiden Gestellen wurden Markierungen angebracht um die Auswertung der Videoaufnahmen bezüglich der Brandausbreitung zu erleichtern. Zur Befestigung der Wellpappe ist zu bemerken, daß die Wellpappe an möglichst vielen Punkten befestigt werden mußte, um bei Wärmeeinwirkung im Brandfall und im Zusammenspiel mit der in der Versuchshalle unvermeidbaren, teilweise stark schwankenden Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit der durch den Verbrennungsprozeß entstehenden Feuchtigkeit ein vorzeitiges Ablösen weitestgehend zu verhindern, welches ein Verringern des zwischen den beiden Versuchsgestellen eingestellten Abstandes zur Folge gehabt hätte.

Einen entscheidenden Einfluß auf den Brandverlauf hat die Auswahl der geeigneten Zündquelle. In der Praxis tritt eine große Zündquelle in der Regel bei Brandstiftung, eine kleine häufiger bei

unbeabsichtigten Bränden auf. Wird bei Brandversuchen die Zündquelle relativ zum Lagergut zu groß gewählt, muß bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden, daß vor allem in der Entstehungsphase das Brandverhalten des Lagergutes vom Brandverhalten der Zündquelle überlagert wird. Bei einer sehr kleinen Zündquelle können sich insbesondere die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum und die Feuchte des Lagergutes in erhöhtem Maße verzögernd auf die Brandausbreitung, besonders während der Brandentwicklungsphase auswirken.

Die Zündung jeweils einer Lagerattrappe erfolgte mit einem relativ kurzen Reihenbrenner (Außendurchmesser: 4 mm) mit zwei Düsenbohrungen im Abstand von 20 mm. Der Brenner wurde mit einem Propan/Luftgemisch betrieben, wovon ca. 0,024 m³/h Propan im Betriebszustand durchgesetzt wurden. Das entspricht einer Wärmefreisetzung von ca. 0,6 kW. Der Propan-Durchsatz wurde mittels Druckminderer und Schwebekörper-Durchflußmesser bei jedem Versuch auf den angegebenen Wert eingestellt. Die Höhe der Zündflamme wurde dabei so bemessen, daß, wie bereits erwähnt, das Brandverhalten der Zündquelle nicht die dominierende Rolle in der Brandentwicklungsphase spielt. Vergleichsuntersuchungen mit schmalen Streifen mit Brennspritus getränkter (100 ml) handelsüblicher Weichfaserplatte (Querschnitt 18 mm x 30 mm, Länge 250 mm) als Zündquelle haben gezeigt, daß bei diesem Versuchsaufbau und bei sehr kleinem Abstand (0,05 m) zwischen den Platten eine sofortige Zündung der benachbarten Platte nicht ausgeschlossen werden kann. Deshalb wurde speziell bei diesen Versuchen dem Reihenbrenner, auch wegen einer relativ gut reproduzierbaren Zündflamme den Vorzug gegeben. Ein weiterer Vorteil des verwendeten Reihenbrenners ist die kurze Zündlänge, wodurch eine örtliche Begrenzung der Zündung und damit verschiedene Zündpositionen möglich sind. Infolge der geringen Größe der Zündquelle relativ zur Brandlast war es nicht notwendig, diese während des Versuches zu entfernen. Die verschiedenen Zündpositionen sind in Bild 1 dargestellt.

Die Meßtechnik umfaßt die Messung zeitlicher Temperaturverläufe

an zahlreichen Meßstellen mittels Mantelthermoelementen. Der zeitliche Verlauf des Temperaturanstieges kann dazu dienen, die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu ermitteln.

Um die im Großversuch gemessenen Temperaturen beurteilen zu können, wurden Vorversuche im Labormaßstab gemäß der Prinzipskizze in Bild 2 durchgeführt. Hierbei wurde ein Probekörper aus einlagiger Wellpappe mit den Abmessungen 130 mm x 180 mm vertikal mittels einer Haltevorrichtung auf einer nichtbrennbaren Stütz- bzw. Trägerplatte an einem Laborstativ befestigt. In der oberen Hälfte (50 mm unterhalb der Oberkante) des Probekörpers wurde eine Temperaturmeßstelle mittig angebracht, um die Entzündungstemperatur der Wellpappe zu bestimmen. Dabei wurde das Thermo- element durch eine Bohrung in der Trägerplatte in die Wellpappe eingeführt. Als Zündquelle diente ein Bunsenbrenner, der mit Erdgas betrieben wurde.

Beim Großversuch wurde in der Ebene der bereits erwähnten Höhenmarkierungen jeweils zentral auf der Ober- und Unterseite der Wellpappe eine Temperaturmeßstelle angebracht. Die Verteilung der Temperaturmeßstellen für diesen Versuchsaufbau ist ebenfalls in Bild 1 dargestellt.

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

Die Brandversuche wurden mit einer Farb-Video-Anlage aufgezeichnet, mit deren Hilfe eine visuelle Beurteilung der Brandausbreitung und eine Bestimmung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit auch nachträglich möglich ist.

Auf die Messung des zeitlichen Massenverlustes der Brandlast infolge der Verbrennung wurde bei diesen Versuchen verzichtet, da es nicht sinnvoll erschien, diese bei der geringen Brandlast von ca. 2,6 kg (einlagige Wellpappe) durchzuführen. Die zu erwartende Abbrandmasse liegt im Bereich der Meßungenauigkeit der vor-

handenen Abbrandwaage. Man macht bei der Beurteilung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit jedoch keinen allzu großen Fehler, da der Abbrand der einlagigen Wellpappe mit dem Abbrand der gesamten vorhandenen Brandlast gleichzusetzen ist. Handelt es sich dagegen um mit Verpackungsgut und Stoßschutzmaterial gefüllte Wellpappenkartons, ist die Ausbreitung des Brandes an der Oberfläche und im Innern getrennt zu untersuchen.

3.2 Versuchsserie II

Um zu Vergleichswerten mit realer Brandlast zu gelangen, wurde der Versuchsstand der ersten Versuchsserie derart modifiziert, daß, wie schon in Abschnitt 2 erwähnt wurde, mit Verpackungsgut und Stoßschutzmaterial gefüllte Wellpappenkartons verwendet wurden. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Als Verpackungsgut diente ein leerer Stahlblechkanister mit einem Volumen von 30 l. Der zwischen den Stahlblechkanistern und der Kartoninnenseite verbleibende Zwischenraum von 3 cm bis 5 cm wurde mit einem der derzeit am häufigsten verwendeten Stoßschutzmaterialien, nämlich schwerentflammaren Polystyrol-Partikelschaum, ausgefüllt. Damit beschränkte sich das Lagergut auf zwei brennbare Stoffe. In Tabelle 1 finden sich Angaben zur Brandlast, wobei zusätzlich der jeweilige untere Heizwert angegeben wird. Pro Lagerstapel ergab sich dabei eine Brandlast von ca. 14,75 kg. Die Versuchsgestelle der ersten Versuchsserie wurden hierbei weiterverwendet, um zum einen die Höhe zu markieren und zum anderen die Thermolemente zu fixieren.

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

Über der Lageranordnung wurden in einer Höhe von 0,5 m bzw. 1,5 m oberhalb der Oberkante jeweils ein Glasfaßsprinkler ohne Löschfunktion mit einer Nennauslösetemperatur von 68 °C zentral angeordnet. Auf diese wird jedoch in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN

4.1 Vorversuche und Versuchsserie I

In den Kleinversuchen im Labor wurde der Probekörper mittels eines Bunsenbrenners zentral an der unteren Kante so lange beflammt, bis dieser selbsttätig brannte. Danach wurde die Gaszufuhr abgestellt, um bei dem relativ kleinen Probekörper zu vermeiden, daß die Größe der Zündquelle das Brandverhalten der Wellpappe überlagert. Es wurde untersucht, wie sich die Temperatur der Wellpappe im Zeitpunkt des Entzündens bei unterschiedlichem Abstand der Meßstelle von der Oberfläche der Wellpappe verhält. Dabei wurden folgende Varianten untersucht:

- 1) Meßstelle zwischen Trägerplatte und Wellpappe
- 2) Meßstelle direkt unter der Außenlage der Wellpappe
- 3) Meßstelle bündig mit der Außenlage der Wellpappe heraus
- 4) Meßstelle ragt 2 mm aus der Wellpappenoberfläche heraus
- 5) Meßstelle ragt 5 mm aus der Wellpappenoberfläche heraus

Dies sind realistische Fälle, die beim Großversuch auftreten können, da sich beim Brand infolge der Wärmeentwicklung und der hieraus resultierenden Wärmespannungen auch bei sorgfältigster Fixierung von Wellpappe und Thermoelement die Relativposition der Meßstelle gegenüber der Wellpappe verändern kann (siehe Bild 2).

Weiterhin wurden noch die relativ unwahrscheinlichen Fälle

- 6) Meßstelle ragt 10 mm aus der Wellpappenoberfläche heraus
- 7) Meßstelle ragt 15 mm aus der Wellpappenoberfläche heraus
- 8) Meßstelle ragt 20 mm aus der Wellpappenoberfläche heraus

untersucht.

Die Laborversuche wurden jeweils mehrfach wiederholt und die Mittelwerte der Meßwerte mit dem vorgegebenen Sollwert der Entzündungstemperatur für Wellpappe verglichen. Schwartz /4/ gibt eine Entzündungstemperatur für Pappe und Papier von 300 °C bis 360 °C an.

Die Versuche haben gezeigt, daß bei einer für die Großversuche gewählten Fixierung der Meßstelle in Position 3 infolge geringer Ablösung der zunächst noch unverbrannten, aber bereits erwärmten Wellpappe, aber auch infolge Änderung der mechanischen Spannung im Thermoelement die Fälle 1, 2 oder 4 am wahrscheinlichsten sind.

Die aus den Laborversuchen gewonnenen Erkenntnisse fanden Eingang beim Aufbau des Großversuchsstandes.

In der ersten Großversuchsserie (Teil I) wurde der Abstand zwischen den beiden Lagerattrappen, beginnend mit einem minimalen Abstand von 0,05 m in Schritten von jeweils 0,05 m so lange erhöht, bis keine Brandausbreitung auf die benachbarte Lagerattrappe mehr erfolgte. Dabei wurde jeweils eine Lagerattrappe an verschiedenen Positionen (siehe Bild 1) am Fußpunkt gezündet und die Brandausbreitung beurteilt.

Die Versuche wurden teilweise mehrfach wiederholt, um anschließend durch Mittelwertbildung der Meßwerte die Streuung zwischen äquivalenten Versuchen auszugleichen. Unter anderem sind folgende Faktoren 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 Vor-

wärmung 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 freigesetzte 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.

Die Versuche haben gezeigt, daß zuerst die Außenlage der einlagigen Wellpappe abbrannte, bevor sich die gewellten Bahnen entzündeten. Dies ist unter anderem auf die thermische Auftriebsströmung der heißen Flammengase, die stärkere Erwärmung der Oberfläche durch direkten Wärme- und Stoffaustausch mit der Flamme und auf den erhöhten Luftzutritt zurückzuführen. Hieraus resultiert außerdem, daß unabhängig von der Position der Zündquelle und des Abstandes zwischen den beiden Lagerattrappen die vertikale Brandausbreitung wesentlich schneller als die horizontale erfolgt. Ein meßbarer Unterschied bezüglich der Richtung der Wellen in der Wellpappe konnte nicht festgestellt werden, jedoch ist denkbar, daß bei einer vertikalen Ausrichtung der Kanäle in der Wellpappe ein Kamineffekt die Brandausbreitung beschleunigt. Es war weiterhin festzustellen, daß mit zunehmendem Abstand die Brandausbreitung langsamer wurde.

Bei den 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.

4.2 Versuchsserie II

Die in Bild 3 dargestellte Lageranordnung wurde jeweils am linken Stapel an der Unterkante gezündet.

Da, wie in Abschnitt 5 gezeigt wird, kein eindeutiger Unterschied bezüglich der Variation der Position der Zündquelle festzustellen war, wurde bei diesen Versuchen auch im Hinblick auf eine schnelle und gleichmäßige Brandentwicklung ein relativ langer mit Brennspritus getränkter Weichfaserstab verwendet. Vorversuche haben ergeben, daß die Flammenlänge der Zündquelle von ca. 150 mm relativ unabhängig von der Brennspritusmenge ist. Im Gegensatz dazu ändert sich die Brenndauer bei unterschiedlicher Spiritusmenge. Dies kann jedoch bei der Größe der Lagerstapel, zumindest im fortgeschrittenen Brandstadium vernachlässigt werden.

Der Abstand zwischen den beiden Lagerstapeln wurde beginnend mit einem minimalen Abstand von 0,4 m, in Schrittweiten von jeweils 0,1 m erhöht. Der minimale Abstand wurde mit 0,4 m relativ groß gewählt, da bei der höheren Brandlast von vornherein anzunehmen war, daß die Brandausbreitung auf den benachbarten Stapel auch bei größeren Abständen als in Versuchsserie I erfolgen würde. Auf die Untersuchung kleinerer Lagerabstände wurde auch deshalb verzichtet, da sich während des Versuchsablaufes bei dieser Art der Lageranordnung herausgestellt hat, daß schon bei dem relativ kleinen Abstand von 0,4 m infolge der großen Wärmeentwicklung auf der Innenseite der Lagerstapel und der hieraus zwangsläufig resultierenden nachlassenden Stabilität sich der gezündete Stapel nach innen neigte und somit der Abstand verringert wurde. Durch diesen Umstand wird der Vergleich mit Meßwerten aus stabileren Lageraufbauten erschwert.

In Bezug auf den Brandfall in der Praxis dürfte der Faktor, wie schnell sich ein Brand auf benachbarte Lagergüter ausbreitet die entscheidendere Rolle spielen als die vertikale Brandausbreitung, da das Ausmaß der räumlichen Ausbreitung hauptsächlich für den Gesamtschaden verantwortlich ist. Die Schnelligkeit der

vertikalen Brandausbreitung ist zwar zum Beispiel entscheidend für das Auslösen von Sprinklern in unmittelbarer Nähe über dem Brandherd, jedoch bewirkt die räumliche Ausdehnung das Auslösen eines größeren Teil des Sprinklersystems. Damit ergibt sich neben dem größeren Brandschaden auch ein größerer Schaden durch das Löschwasser.

5. MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

Die Kleinversuche im Labor haben ergeben, daß die Meßwerte der beim Brand entstehenden Temperaturen an der Wellpappe stark von der Position der Temperaturmeßstelle abhängt. Dies gilt insbesondere bei der Messung der Entzündungstemperatur und der damit verbundenen Bestimmung des Zündzeitpunktes. Bild 4 zeigt den Verlauf der gemessenen Entzündungstemperatur von einlagiger Wellpappe als Funktion des Abstandes zwischen Temperaturmeßstelle und Wellpappenoberfläche. Es zeigt sich, daß beim Vergleich mit der Sollentzündungstemperatur von 300 °C bis 360 °C die gemessene Temperatur starken Schwankungen unterworfen ist, je nachdem wie weit die Temperaturmeßstelle von der Wellpappenoberfläche entfernt ist. Während des Brandes ist die Relativposition der Temperaturmeßstelle gegenüber der Brandlast infolge der Wärmeentwicklung und der hieraus entstehenden thermischen Spannungen bzw. Deformationen in der Wellpappe nicht exakt zu fixieren. Falls die Temperaturmeßstelle zwischen Trägerplatte und Wellpappe gelangt werden Temperaturen gemessen, die ca. 100 °C bis 150 °C niedriger als die Solltemperatur liegen. Dies hat seine Ursache in der wärmeisolierenden Wirkung der Wellpappe gegenüber der Flamme. Die Solltemperatur wird relativ genau bei einem Abstand von 0 bis 3 mm ermittelt. Größere Abstände ergeben höhere Meßtemperaturen. Dies beruht auf dem erhöhten Wärmeaustausch zwischen Thermo-element und Flamme. Ebenfalls nimmt die Wärmemenge ab, die in die Oberfläche abgeleitet wird. Bei sehr großen Abständen nimmt die gemessene Temperatur wieder ab, da sich die Meßstelle dem direkten Einflußbereich der Flamme entzieht. Diese hier getroffene Aussage ist jedoch von der volumetrischen Ausdehnung der Flamme abhängig, da die Ausdehnung bei größerer Brandlast

zunimmt.

Hieraus ergibt sich die Erkenntnis, daß die erhaltenen Meßwerte nur bedingt zur Ermittlung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit herangezogen werden können, da auf der einen Seite die Schwankungsbreite der Meßwerte, auf der anderen Seite die Schwankungsbreite der Sollwertvorgabe aus der Literatur keine exakte Bestimmung des Zündzeitpunktes zuläßt. Wäre dieses möglich, könnte, da die Höhe der Temperaturmeßstelle bekannt ist (siehe Bild 1) die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

In den Versuchen wurde daher die Brandausbreitungsgeschwindigkeit v in der Weise bestimmt, daß der Zeitpunkt t , bei dem die Flammenwurzel eine bestimmte Höhe z (siehe Höhenmarkierungen in Bild 1) erreicht hat, an Hand der Video-Aufnahmen visuell erfaßt wurde.

Bild 5 zeigt den Verlauf der Höhe, den die Flammenwurzel an der gezündeten Wellpappe als Funktion der Versuchszeit erreichte bei verschiedenen Abständen zwischen den Lagerattrappen. Dargestellt sind die Mittelwerte aus sämtlichen Versuchen (unterschiedliche Zündpositionen) beim jeweils gleichen Abstand.

Die Meßwertpaare Höhe der Flammenwurzel und Versuchszeit wurden rechnerisch mittels Regression an eine Exponentialfunktion der Form

$$z = a_I \cdot e^{b_I \cdot t} \quad (1)$$

angepaßt, da sich gezeigt hat, daß diese die Meßwerte am genauesten wiedergibt. Eine Ungenauigkeit zeigt sich im Bereich zwischen $z = 0$ und $0,5$ m, da die ermittelten Funktionen den Nullpunkt mehr oder weniger genau wiedergeben. Die Kurven wurden daher graphisch durch den Nullpunkt extrapoliert.

Angaben zur Kurvenanpassung werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit v ergibt sich durch Differentiation zu

$$v = dz / dt = a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t} \quad (2)$$

Die "Verdoppelungszeit t_v ", siehe Brein /1/, innerhalb derer eine Meßgröße auf das Doppelte ihres Wertes zu einem Zeitpunkt t_2 anwächst, ergibt sich aus Gleichung (2) wie folgt:

$$v_1 = a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t_1} \quad (3)$$

$$v_2 = a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t_2} = 2 \cdot v_1 \quad (4)$$

$$a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t_2} = 2 \cdot a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t_1} \quad (5)$$

Aus Gleichung (5) ergibt sich

$$t_v = t_2 - t_1 = (\ln 2 / b_I) \cdot 60 \quad (6)$$

Bild 6 zeigt die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei einlagiger Wellpappe als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen zwischen den Lagerattrappen.

Man erkennt aus Bild 5 und Bild 6 die Tendenz, daß sich der Brand bei größerem Abstand langsamer ausbreitet.

Hierbei überlagern sich unterschiedliche Faktoren. Ein geringerer Abstand bewirkt höhere Strömungswiderstände, die die Brandausbreitung behindern. Die Ansaugung der Verbrennungsluft durch die natürliche Zugwirkung des Kanals bzw. der Austausch Abgas/Luft wird erschwert. Gleichzeitig wird jedoch der konvektive Wärmeaustausch zwischen den Lagerattrappen erhöht und der Wärmeaustausch mit der Umgebung vermindert. Dieses hat eine stärkere Vorwärmung der noch nicht entzündeten Brandlast zur Folge, wodurch sich der Brand schneller ausbreitet. Ein größerer Abstand erhöht den Kamineffekt bzw. die thermische Auftriebsströmung und verbessert die Verbrennungsluftzufuhr, wobei aber die Wärmeverluste an die

Umgebung zunehmen. Von den beiden Anteilen Konvektion und Strahlung verliert ersterer immer mehr an Bedeutung. Nach den bisher vorliegenden Versuchsergebnissen spielt der intensivere Wärmeaustausch zwischen den Wellpappeoberflächen die dominierende Rolle für die schnellere Brandausbreitung bei abnehmenden Abständen.

Die Unterschiede in der in Bild 5 und Bild 6 teilweise unregelmäßigen Reihenfolge der Abstände ergibt sich dadurch, daß sich die Steigung der Tangenten in Bild 5 auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in Bild 6 auswirkt. Anomalien sind auch dadurch zu erklären, daß sich unterschiedliche Umgebungsbedingungen in der Versuchshalle auf die Brandausbreitung auswirken (z.B. 0,25 m). Hier spielen besonders die Faktoren Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit und konvektive Luftströmungen eine Rolle. Eine Klimakammer würde hier Abhilfe verschaffen, jedoch wären diese Versuchsbedingungen für einen praxisnahen Lagerbrand unrealistisch.

Ein Maß für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist die bereits erwähnte Verdoppelungszeit, die in Bild 7 dargestellt ist. Diese nimmt mit steigendem Abstand zu, da die Brandausbreitungsgeschwindigkeit abnimmt.

Die Bilder 8,9,10 und 11 zeigen den Verlauf der Höhe die die Flammenwurzel erreichte bzw. den Verlauf der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit bei einigen ausgewählten Abständen unter Variation der Position der Zündquelle. Die verschiedenen Positionen sind dabei der Prinzipskizze in Bild 1 zu entnehmen. In Verbindung mit Tabelle 3 ist zu erkennen, daß bezüglich der Brandausbreitungsgeschwindigkeit kein eindeutiger Einfluß der Position der Zündquelle zu erkennen ist. Es liegt eine Tendenz vor, daß bei Zündung HL die größte, bei Zündung ML die kleinste Brandausbreitungsgeschwindigkeit erreicht wird. Die auftretenden Unterschiede sind aber mit größerer Wahrscheinlichkeit auf wechselnde Luftströmungen in der Versuchshalle als auf unterschiedliche Zündbedingungen bezüglich der Position an der

Brandlast zurückzuführen.

In Bild 12 ist die Versuchszeit dargestellt, bei der die gegenüberliegende Lagerattrappe durch Wärmeaustausch zündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle. Es ist zu erkennen, daß mit wachsendem Abstand die Zündung der parallelen Wellpappe zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Infolge der langsameren Brandausbreitung bei größeren Abständen, welches gleichzusetzen ist mit einer langsameren Flächenausdehnung auf der Wellpappe, kommt es zu einer geringeren Wärmefreisetzung. Dies hat zur Folge, daß die zur Freisetzung von Zersetzungsgasen und zur Zündung erforderliche Energie in geringerem Maße aufgebracht wird. Ein weiterer Punkt ist, daß mit zunehmendem Abstand die Wärmeübertragung hauptsächlich durch Wärmestrahlung erfolgt, wogegen die konvektive Wärmeübertragung an Bedeutung verliert. Mit zunehmendem Abstand wird damit die auf die benachbarte Attrappe übertragene Energie immer geringer, so daß die Entzündung des Zersetzungsgas/Luftgemisches verzögert wird. Ab einem Grenzabstand reicht diese Energie nicht mehr dazu aus, die erforderliche Zündenergie aufzubringen. Der Grenzabstand, bei dem einlagige Wellpappe noch gezündet wurde, betrug 0,25 m. Dieser Abstand ist abhängig von der Größe und Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung, die wiederum ihre Ursachen in der stofflichen Zusammensetzung der Brandlast und der Größe der Zündquelle hat.

Ein eindeutiger Einfluß der Position der Zündquelle war, erkennbar an der Streuung der Meßpunkte in Bild 12, nicht festzustellen.

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

Bild 13 zeigt die Höhe z_g , bei der die gegenüberstehende Lager-

attrappe durch Wärmeaustausch zündet. Analog zur Zündzeit ist auch hierbei ein Anstieg mit wachsendem Abstand zu erkennen, wobei die Meßwerte mehr oder weniger stark streuen. Dies ist dadurch zu erklären, daß, wie bereits erläutert, die Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand abnimmt. Bei geringem Abstand kommt es schon nach kurzer Zeit zu einer relativ hohen Wärmefreisetzung, die ausreicht, die gegenüberstehende Platte im unteren Bereich zu zünden. Bei größerem Abstand muß die Wellpappe erst durch heiße aufsteigende Rauchgase vorgewärmt werden, damit die durch den Brand freigesetzte Energie ausreicht, das Zersetzungsgas/Luftgemisch zu entzünden. Auch hierbei ist kein eindeutiger Einfluß der Position der Zündquelle zu erkennen.

Bei der maximalen Temperatur, die während des Brandes entsteht, ist nach Bild 14 eine abnehmende Tendenz mit größerem Abstand festzustellen. Dies ist auf die bereits diskutierte, langsamere Wärmefreisetzung und die erhöhte Luftzufuhr zurückzuführen.

Bild 15 zeigt die Temperaturen sowie die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der durch die Zündquelle gezündeten Wellpappe im Zeitpunkt der Brandausbreitung auf die benachbarte Wellpappe in Zündhöhe. Der Wärmedurchgang durch die Wellpappe hat einen mittleren Temperaturgradienten von ca. 170 K zur Folge. Eine eindeutige Abhängigkeit vom Abstand ist dabei nicht zu erkennen.

Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, wurde auf die Bestimmung des zeitlichen Massenverlustes der Brandlast verzichtet, da diese im Bereich der Meßgenauigkeit der vorhandenen Abbrandwaage liegt. Diese wäre jedoch notwendig, um den zeitlichen Verlauf der freigesetzten Energie unter Berücksichtigung des unteren Heizwertes zu bestimmen. Bei einlagiger Wellpappe besteht allerdings eine weitere Möglichkeit, die beim Brand freigesetzte Energie näherungsweise zu bestimmen. Da in erster Näherung der Abbrand der Wellpappe in Folge der geringen volumetrischen Ausdehnung mit dem Abbrand der gesamten Brandlast gleichzusetzen ist, wobei hier vernachlässigt wird, daß sich der Brand zunächst auf der Außen-

lage ausbreitet und anschließend auf die gewellte Innenlage übergreift, könnte die freigesetzte Wärme dadurch bestimmt werden, daß über die Ermittlung der brennenden Fläche bei bekanntem Flächengewicht der zeitliche Verlauf des Massenverlustes der Brandlast bestimmt wird. Es besteht jedoch die Schwierigkeit, diese Fläche zu bestimmen, da an Hand der Videoaufnahmen nur relativ ungenaue quantitative Aussagen über die horizontale Brandausbreitung möglich sind. Daher wäre vermutlich eine Zündung auf der gesamten Breite der Wellpappenattrappe von Vorteil gewesen, da sich hierdurch im Gegensatz zur relativ kleinen Zündquelle ein ähnliches Brandbild auf der gesamten Breite ausgebildet hätte, das mit einer die geometrische Fläche beschreibenden Funktion unter Berücksichtigung der Höhe der Brandausbreitung hätte erfaßt werden können.

Bild 16 zeigt den Verlauf der Höhe, die die Flammenwurzel als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen erreichte (Versuchsserie Teil II). Hierbei hat sich durch Vergleich der Determinationskoeffizienten R^2 gezeigt, daß sich die Wertepaare Höhe der Flammenwurzel und Versuchszeit bei diesen Versuchen genauer durch eine Potenzfunktion der Form

$$z = a_{II} \cdot t^{b_{II}} \quad (7)$$

darstellen lassen.

Angaben zu Kurvenanpassung werden in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit v ergibt sich durch Differentiation zu

$$v = a_{II} \cdot b_{II} \cdot t^{b_{II} - 1} \quad (8)$$

Hieraus läßt sich die Verdoppelungszeit t_v wie folgt ableiten

$$v_1 = a_{II} \cdot b_{II} \cdot t_1^{b_{II} - 1} \quad (9)$$

$$v_2 = a_{II} \cdot b_{II} \cdot t_2^{b_{II}} - 1 = 2 \cdot v_1 \quad (10)$$

Einsetzen von Gleichung (9) in (10) ergibt

$$a_{II} \cdot b_{II} \cdot t_2^{b_{II}} - 1 = 2 \cdot a_{II} \cdot b_{II} \cdot t_1^{b_{II}} - 1 \quad (11)$$

Hieraus ergibt sich

$$t_2 = t_1 \cdot \left(\frac{b_{II} - 1}{\sqrt{2}} \right) \quad (12)$$

bzw.

$$t_v = t_2 - t_1 = t_1 \cdot \left(\left(\frac{b_{II} - 1}{\sqrt{2}} \right) - 1 \right) \cdot 60 \quad (13)$$

Mit

$$B_{II} = \left(\left(\frac{b_{II} - 1}{\sqrt{2}} \right) - 1 \right) \cdot 60 \quad (14)$$

ergibt sich

$$t_v = B_{II} \cdot t_1 \quad (15)$$

Die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit ist in Bild 17 als Funktion der Versuchszeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß auch bei diesem Versuchsaufbau mit vergrößerter Brandlast die Tendenz zu erkennen ist, daß mit zunehmendem Abstand zwischen den Lagergütern die Brandausbreitungsgeschwindigkeit analog den Versuchen mit einlagiger Wellpappe abnimmt. Anomalien in der Reihenfolge sind, wie bereits erwähnt, auf unterschiedliche Umgebungsbedingungen in der Versuchshalle zurückzuführen.

Beim Vergleich mit einlagiger Wellpappe (siehe Bild 6) zeigt sich, daß infolge der höheren Brandlast bei Versuchsserie II wesentlich höhere Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten auftreten. Bei einem Abstand von 0,4 m liegt die Geschwindigkeit um das 8 fache ($v_{II}/v_I = 6,4 \text{ m/min} / 0,8 \text{ m/min}$) höher, bei einem Vergleich mit dem bei einlagiger Wellpappe minimal untersuchten Abstand von 0,05 m ist die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit immer noch

ungefähr doppelt so groß ($v_{II}/v_I = 6,4 \text{ m/min} / 3,3 \text{ m/min}$).

Wie aus Gleichung (13) zu erkennen ist, ergibt die Verdoppelungszeit bei Versuchsserie II keinen konstanten Wert über die gesamte Versuchszeit. In Bild 18 ist diese als Funktion des Abstandes für 2 verschiedene Zeitpunkte aufgetragen. Man erkennt, daß die Verdoppelungszeit wie in Versuchsserie I aus den bereits erwähnten Gründen mit vergrößertem Abstand zunimmt. Der Anstieg der Verdoppelungszeit mit der Zeit ist damit zu erklären, daß der Anstieg der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (siehe Bild 17) und damit die Beschleunigung der Brandausbreitung insbesondere bei größeren Abständen abnimmt (siehe auch Gleichung (13)). Bei einem vergleichbaren Abstand von 0,4 m liegt die Verdoppelungszeit von einlagiger Wellpappe wesentlich unter dem Wert von gefüllten Kartons.

Betrachtet man die maximal beim Brand entstehende Temperatur (Bild 19), so stellt man eine Abnahme mit steigendem Abstand ebenfalls analog zu einlagiger Wellpappe fest. Im Vergleich mit einlagiger Wellpappe (Bild 14) liegt das Temperaturniveau bei gefüllten Wellpappenkartons um ca. 200 °C höher. Die Ursache hierfür ist in der schnelleren Wärmefreisetzung und im höheren Heizwert der Brandlast zu sehen.

Der Temperaturgradient innerhalb des Lagergutes (siehe Bild 20) liegt mit einem mittleren Wert von ca. 500 K ebenfalls deutlich höher als bei einlagiger Wellpappe. Dies ist auf die geringe Wärmeleitfähigkeit von Polystyrol-Partikelschaum und Luft in Verbindung mit der größeren Schichtdicke zurückzuführen. Aus den Meßwerten ergibt sich keine eindeutige Abhängigkeit der Temperaturdifferenz vom Abstand. Abstände, bei denen sich der Nachbarstapel durch Zusammenfallen des gezündeten Stapels in Brand setzte, wurden nicht betrachtet.

Bei den Versuchen der Versuchsserie Teil II zeigte sich, daß noch eine Brandausbreitung auf den Nachbarstapel bei wesentlich größeren Abständen als bei Teil I erfolgte. Dieses ist ebenfalls

auf die schnellere und höhere Wärmefreisetzung zurückzuführen. Die Bestimmung des kritischen Abstandes, bei dem gerade noch eine Brandausbreitung auf den Nachbarstapel erfolgte, erwies sich bei diesen Versuchen als schwierig, da bei großen Abständen ab 0,7 m die Zündung der benachbarten Brandlast durch Umfallen infolge nachlassender Stabilität und damit direktem Kontakt mit brennendem Material erfolgte, bevor eine Zündung durch reine Wärmeübertragung erfolgen konnte. Die Versuchsserie wurde daher bei einem Abstand von 0,9 m abgebrochen. Der Nachbarstapel entflammte dabei in Bruchteilen von Sekunden, was ein Kennzeichen dafür war, daß auch bei großen Abständen die Zündtemperatur des Zersetzungsgas/Luftgemisches durch den vorherigen Aufheizvorgang in sehr kurzer Zeit erreicht wurde. Anhaltspunkte für die Versuchszeit und die Höhe bei der sich die der gegenüberstehende Stapel entzündete, sind Bild 21 und 22 zu entnehmen. Hierbei sind Tendenzen zu erkennen, daß diese Werte analog zu einlagiger Wellpappe aus den bereits aufgeführten Gründen mit zunehmendem Abstand zunehmen. Abstände, bei denen ein beidseitiger Brand durch Zusammenfallen des gezündeten Stapels zustande kam, wurden nicht betrachtet.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Als Fortsetzung der bisherigen Lagerbrandversuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde damit begonnen, den Einfluß unterschiedlicher Abstände zwischen gelagerten Gütern auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit qualitativ und quantitativ zu untersuchen.

Hierbei wird in verschiedenen Versuchsserien der Lageraufbau und die Brandlast stufenweise derart modifiziert, daß der Bereich zwischen Lagerattrappe und praxisnahem Lager abgedeckt wird.

Bei den bisherigen Versuchen hat sich gezeigt, daß sich die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei der Versuchsserie mit einlagiger Wellpappe durch eine Exponentialfunktion, bei als

Block gelagerter Brandlast durch eine Potenzfunktion darstellen läßt. Es hat sich herausgestellt, daß diese Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand zwischen den gelagerten Gütern abnimmt, wobei die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion, bei größeren Abständen insbesondere die Wärmestrahlung die entscheidende Rolle für die Brandausbreitung spielt und weniger die Strömungswiderstände, die hauptsächlich bei kleineren Abständen zum Tragen kommen.

Die schnellere Brandausbreitung bei kleineren Abständen zeigt sich jedoch nicht nur in einer erhöhten Geschwindigkeit, sondern auch in einer Zunahme der Brandtemperaturen infolge der schnelleren Wärmefreisetzung.

Versuche mit einlagiger Wellpappe ergaben einen kritischen Abstand von 0,25 m zwischen der Lageranordnung, bei dem die benachbarte Brandlast durch Wärmeübertragung gerade noch gezündet wurde. Bei den Blocklagerversuchen war es nicht möglich, einen kritischen Abstand zu ermitteln, da auch bei größeren Abständen der benachbarte Stapel durch Umfallen der brennenden Säule und damit durch direkten Flammenkontakt in Brand geriet.

Bei Erhöhung der Brandlast, besonders durch einen erhöhten Heizwert, ergibt sich eine bedeutende Zunahme der Brandausbreitungsgeschwindigkeit, da durch die größere Wärmefreisetzung schneller ein zündbares Zersetzungsgas/Luftgemisch entsteht. Dies ist auch die Ursache für die beim Brand entstehenden höheren Temperaturen bei gefüllten Kartons gegenüber einlagiger Wellpappe.

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 Feuerwehrange-
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 Feuerwehrange-
legenheiten.
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutz-
technik 1986.
- /3/ Feuerschutz-Katalog.
Düsseldorf: Promat - Gesellschaft für moderne
Werkstoffe mbH 1983.
- /4/ Schwartz,E.v.: Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr.
4. Auflage
München: Feuerschutzverlag Ph.L.Jung
1936.

Sonstige verwendete Literatur

- Dietz,G. Verpackungstechnik. 1. Auflage
Lippmann,R.: Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag 1985.

VDI - Wärmeatlas. 4. Auflage
Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.
Düsseldorf: VDI - Verlag 1984.

Wagner, W.: Thermische Apparate und Dampferzeuger.
1. Auflage
Würzburg: Vogel - Buchverlag 1985.

HP 41 C Statistik - Paket.
Meyrin 2: Hewlett - Packard SA Personal
Calculator Division.

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
H _u Propan	93	MJ/m ³ i.N.

Massen pro Karton:

Kanister aus Weißblech	1,706	kg
Karton	0,666	kg
EPS B1	0,25	kg

Masse Weichfaserstab: 0,09 kg

Tabelle 2 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Versuchsserie Teil I, Mittelwerte)

Abstand m	$z^2)$ m	$v^2)$ m/min	$t_v^2)$ s
	$a_I ; b_I$	R^2	$a_I \cdot b_I ; b_I$
0,05	0,1509;1,3075	0,92	0,1973;1,3075
0,10	0,1218;1,1402	0,98	0,1389;1,1402
0,15	0,1403;0,6898	0,99	0,0968;0,6898
0,20	0,2880;0,5288	1,00	0,1523;0,5288
0,25	0,3427;0,3134	0,90	0,1074;0,3134
0,30	0,2571;0,4383	0,99	0,1127;0,4383
0,40	0,2041;0,2841	0,93	0,0580;0,2841

Tabelle 3 : Einfluß der Zündposition auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Versuchsserie Teil I)

<u>Abstand in m</u>	<u>Flammenausbreitungsgeschwindigkeit</u>
0,05	$v_{MR} < v_{ML} < v_{HL}$
0,10	$v_{ML} < v_{MR} < v_{HL}$
0,15	$v_{ML} < v_{HL} < v_{MR}$
0,20	$v_{ML} < v_{HL} < v_{MR}$
0,25	$v_{ML} < v_{MR} < v_{HL}$

2) $z = a_I \cdot e^{b_I \cdot t}$
 $v = a_I \cdot b_I \cdot e^{b_I \cdot t}$
 $t_v = (\ln 2 / b_I) \cdot 60$

Tabelle 4 : Kurvenanpassung der Meßwerte (Versuchsserie Teil II)

Abstand m	z ³⁾ m		v ³⁾ m/min		t _v ³⁾ s
	a _{II} ; b _{II}	R ²	a _{II} ·b _{II} ; b _{II} -1	B _{II}	t ₁ = 0,5 ; 1 min
0,4	2,5221;2,3029	0,99	5,8082;1,3029	42,14	21; 42
0,5	1,4910;1,6765	0,99	2,4997;0,6765	107,16	54;107
0,6	1,4493;1,5841	0,99	2,2958;0,5841	136,57	68;137
0,7	1,1542;1,3755	0,99	1,5876;0,3755	320,04	160;320
0,8	1,2929;1,6747	0,99	2,1652;0,6747	107,62	54;108
0,9	1,1773;1,5817	0,99	1,8621;0,5817	137,54	69;138

3)
$$z = a_{II} \cdot t^{b_{II}}$$

$$v = a_{II} \cdot b_{II} \cdot t^{b_{II}-1}$$

$$t_v = \left(\frac{b_{II}}{v} - 1 \right)^{\frac{1}{b_{II}-1}} \cdot 60 \cdot t_1 = B_{II} \cdot t_1$$

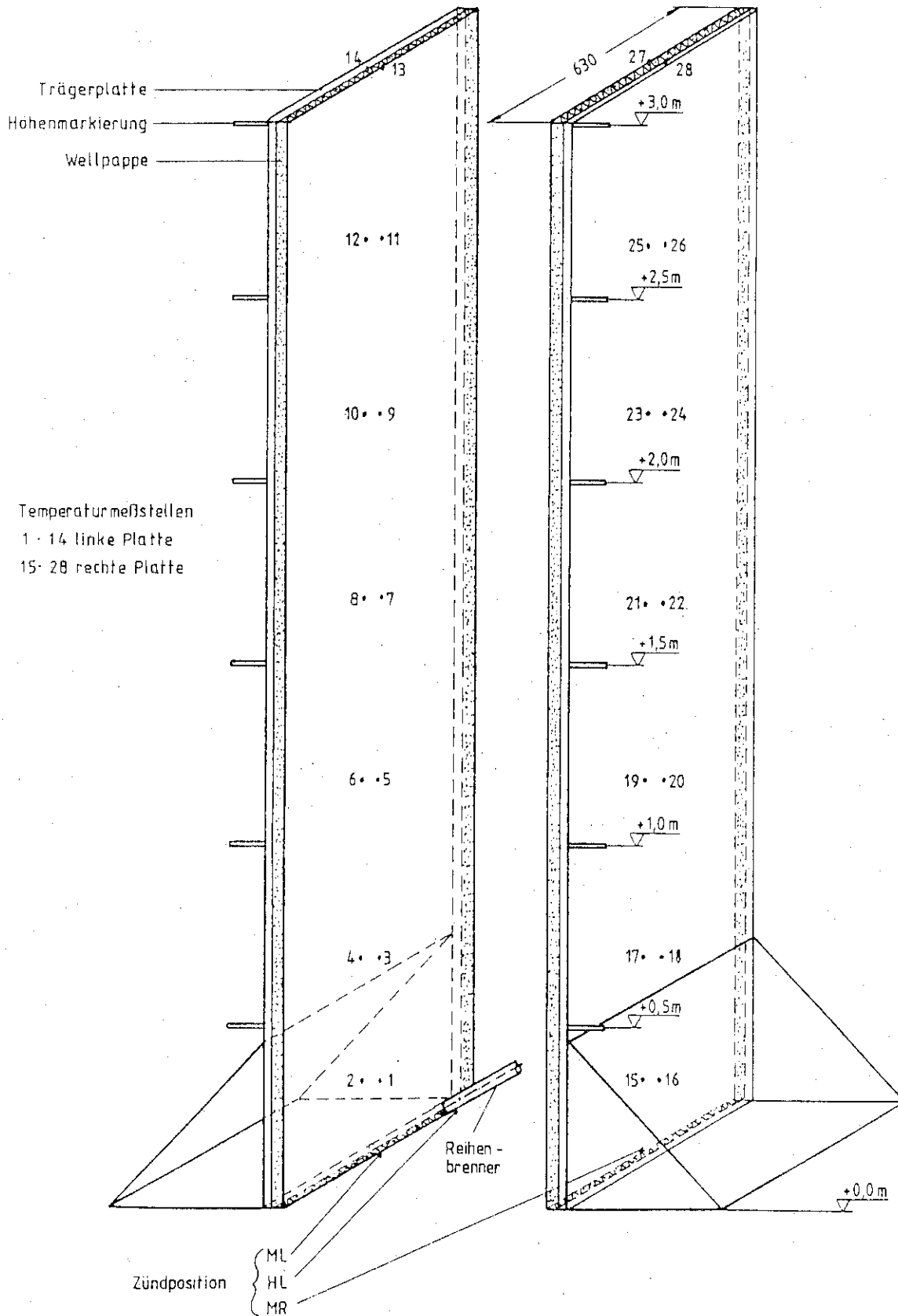


Bild 1 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus (Versuchsserie Teil I) mit 2 Lagerattrappen unter Angabe der Temperaturmeßstellen

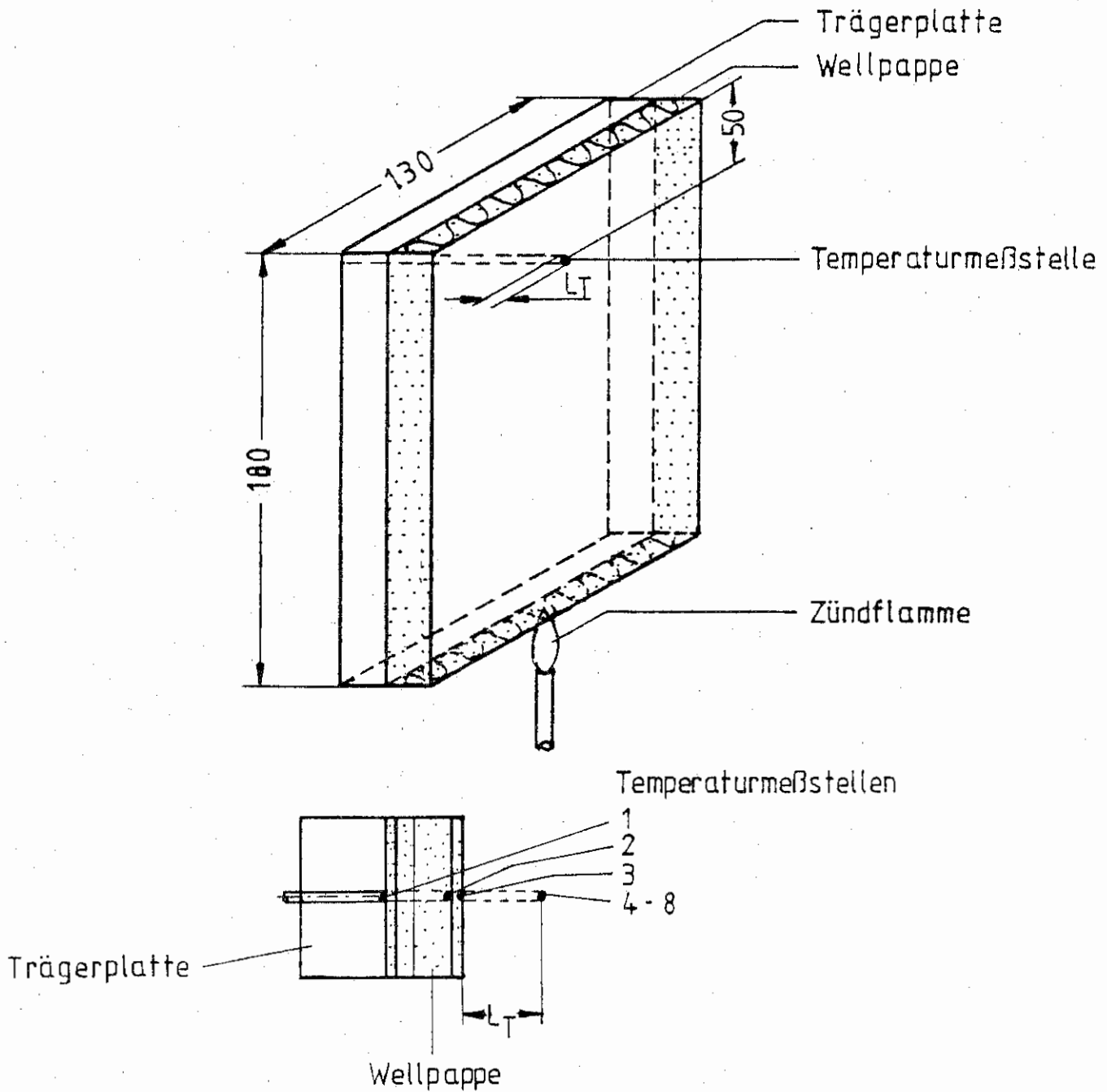


Bild 2 Prinzipskizze des Laborversuchsstandes zur Ermittlung des Einflusses der Position der Temperaturmeßstelle auf die Entzündungstemperatur von Wellpappe

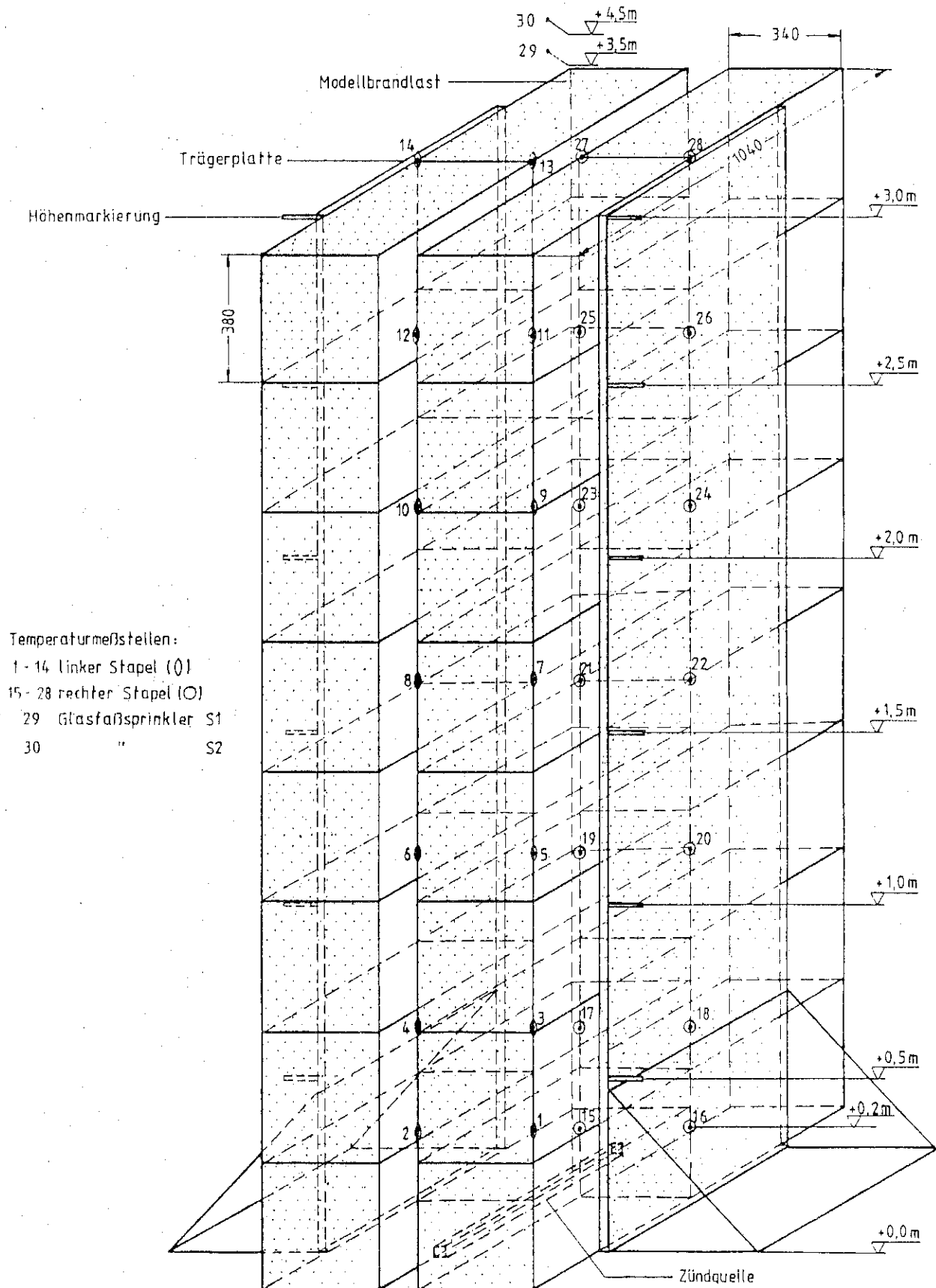


Bild 3 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus (Versuchsserie Teil II) mit 2 Lagersäulen unter Angabe der Temperaturmessstellen

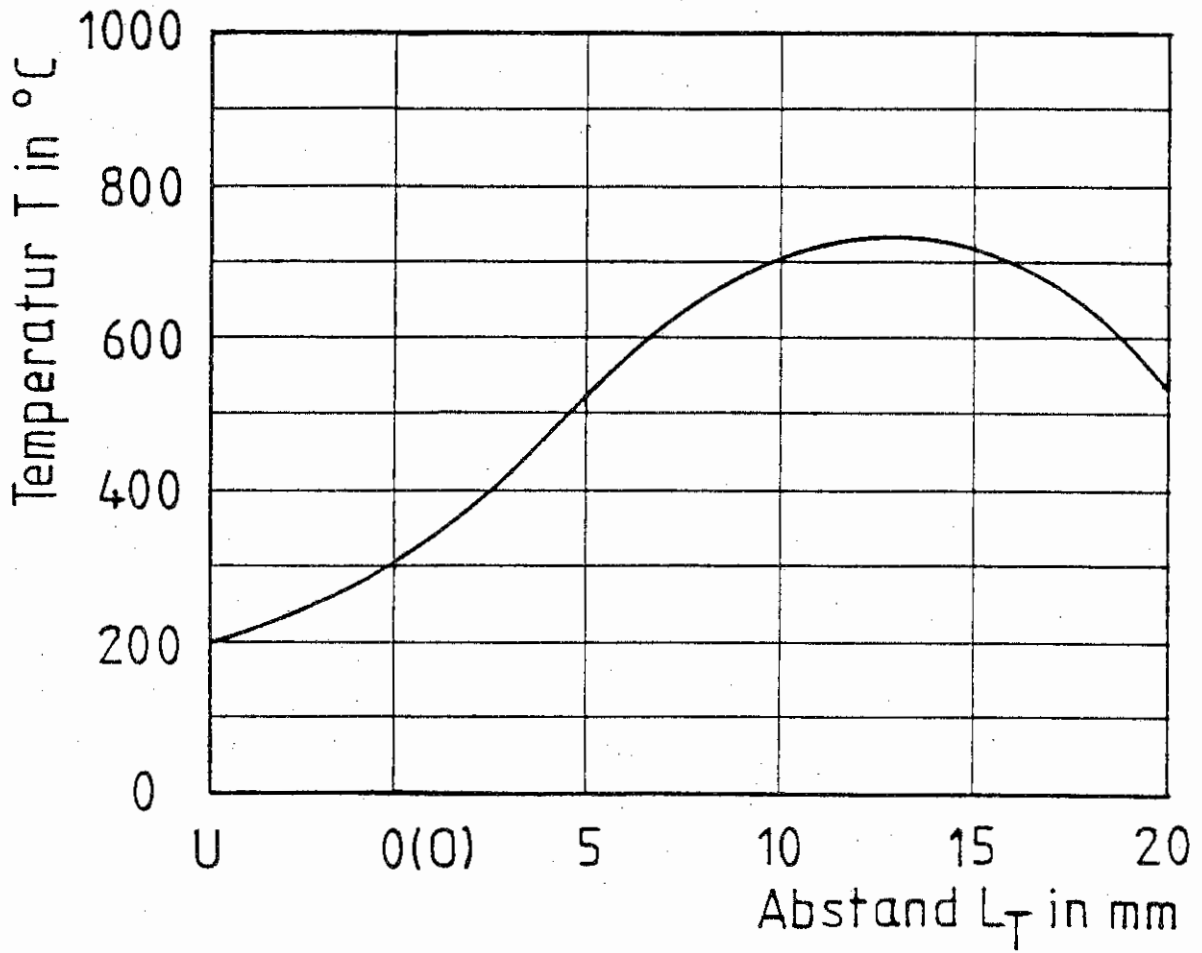


Bild 4 Verlauf der gemessenen Entzündungstemperatur von einlagiger Wellpappe als Funktion des Abstandes zwischen Temperaturmeßstelle und Wellpappeoberfläche (U (Meßstelle 1) = Rückseite, O (Meßstelle 3) = Vorderseite)

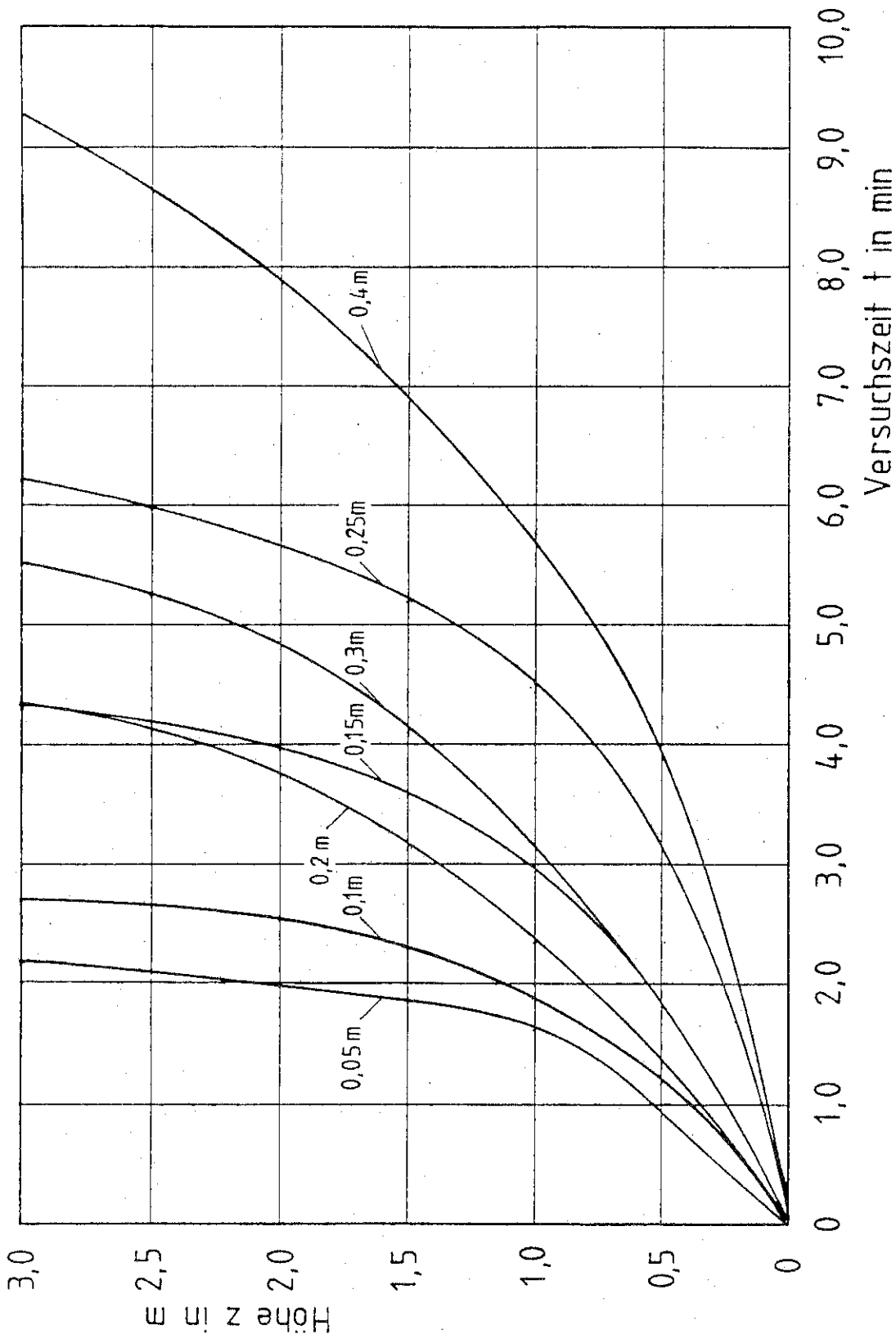


Bild 5 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen (Versuchsserie Teil I, Meßwerte)

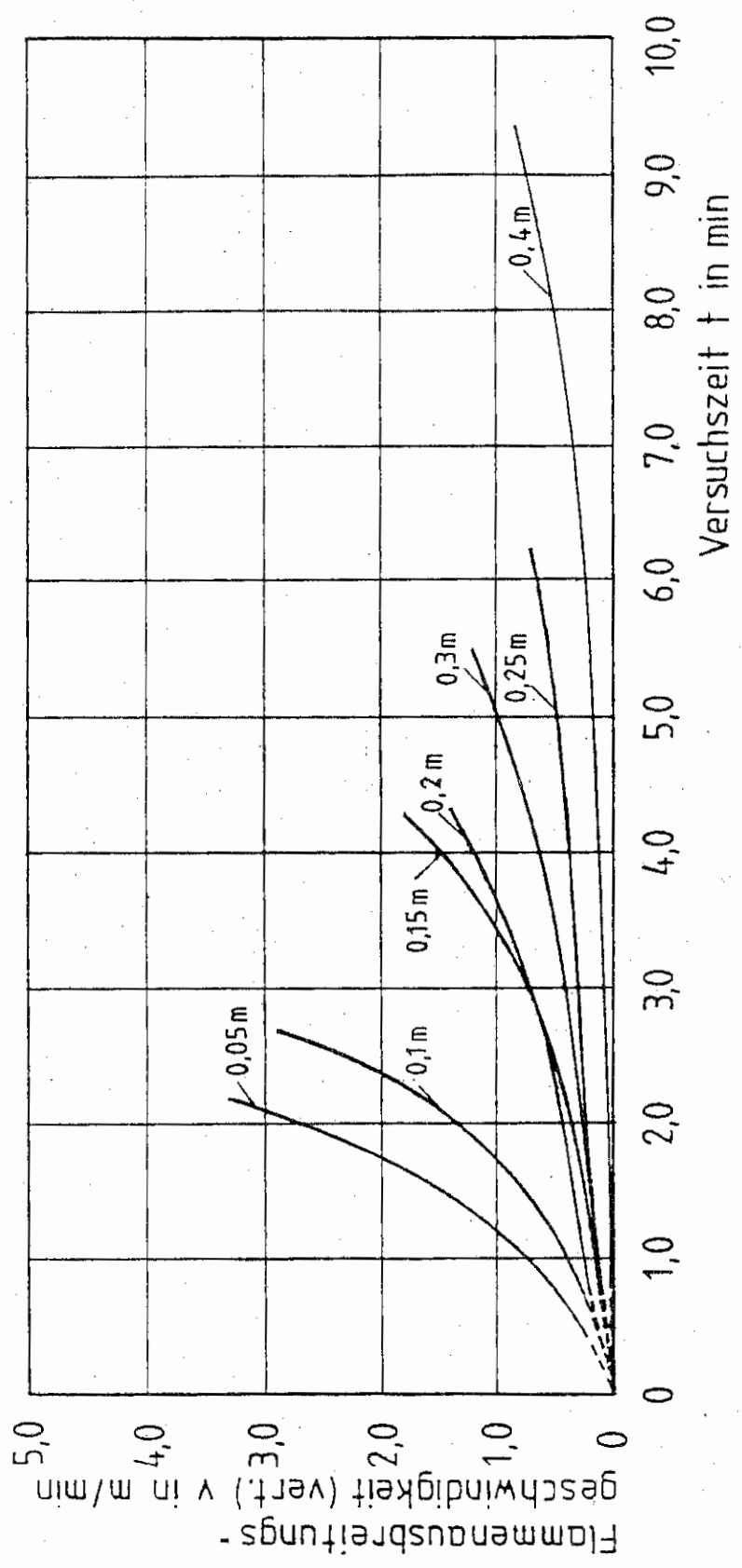


Bild 6 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen (Versuchsserie Teil I)

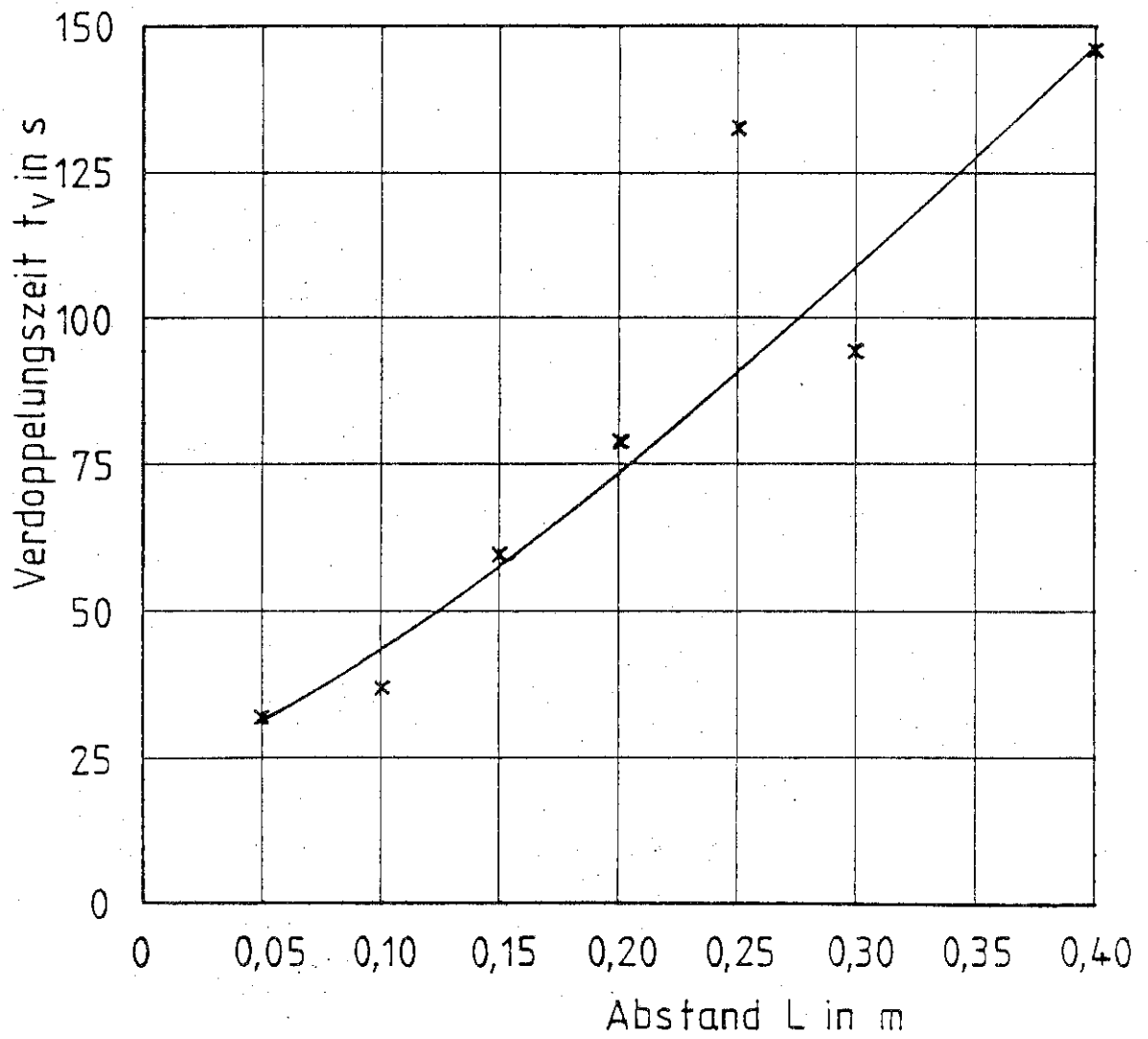


Bild 7 Verdoppelungszeit als Funktion des Abstandes (Versuchsserie Teil I)

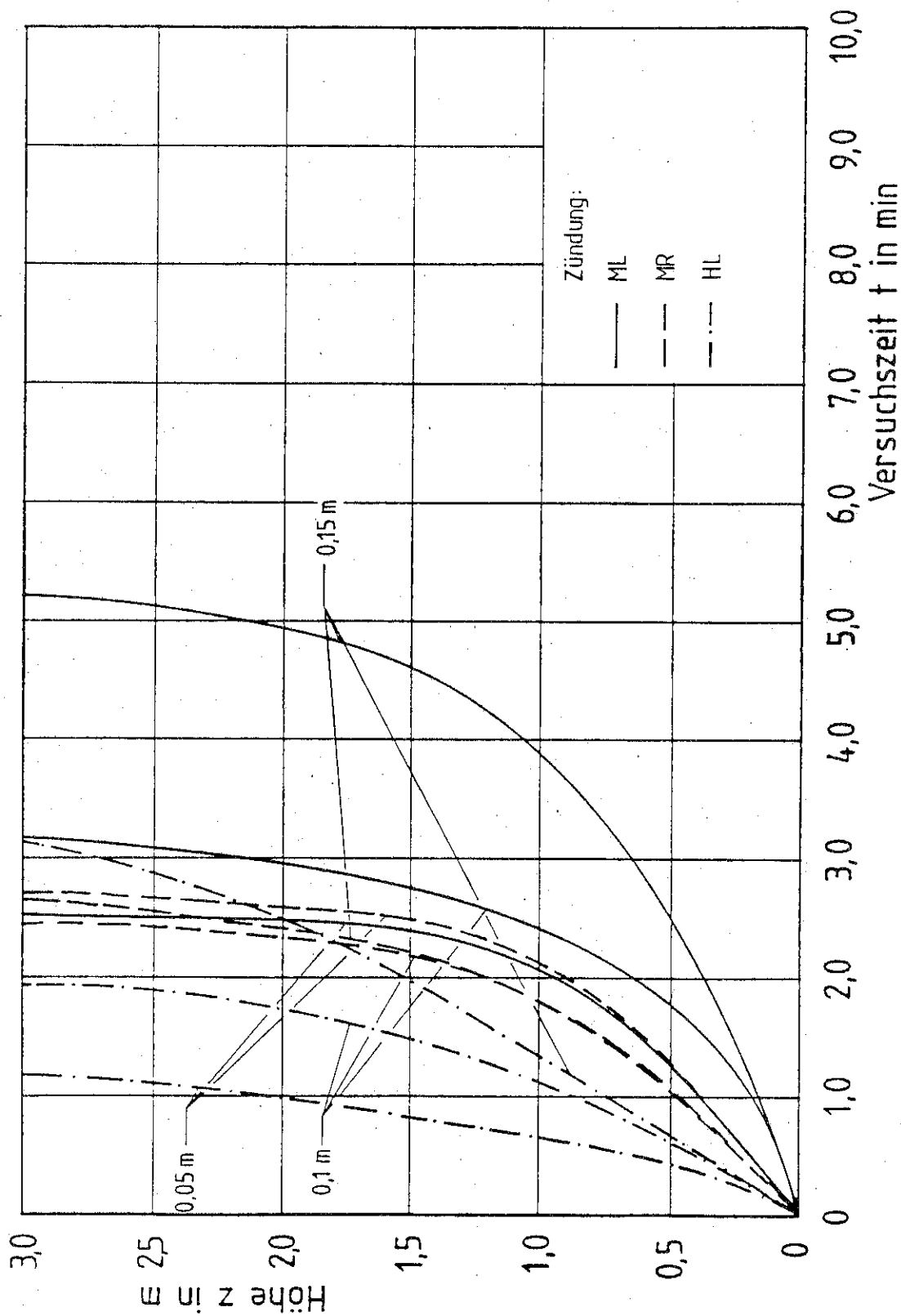


Bild 8 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen unter Variation der Position Zündquelle (Versuchsserie Teil I, Meßwerte)

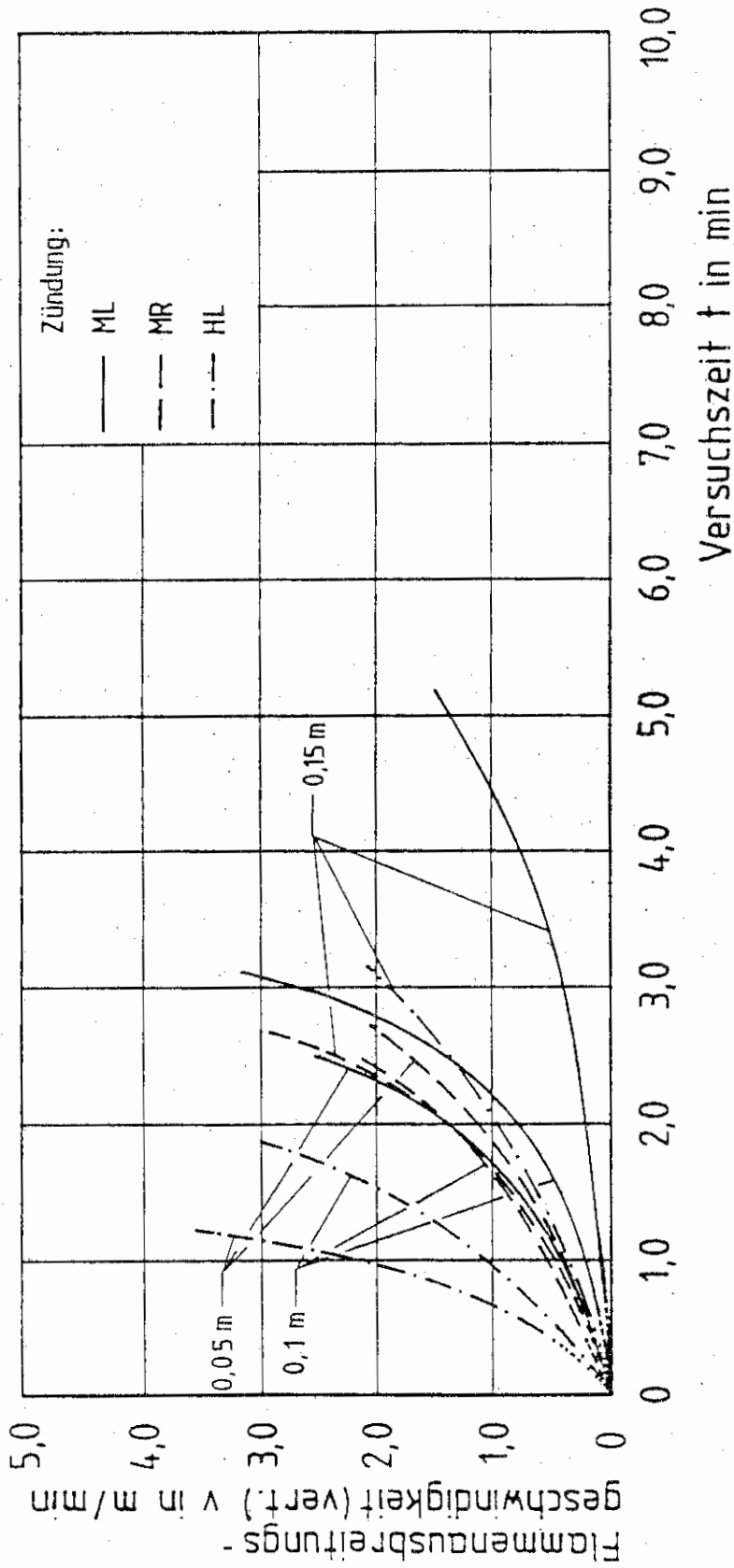


Bild 9 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I)

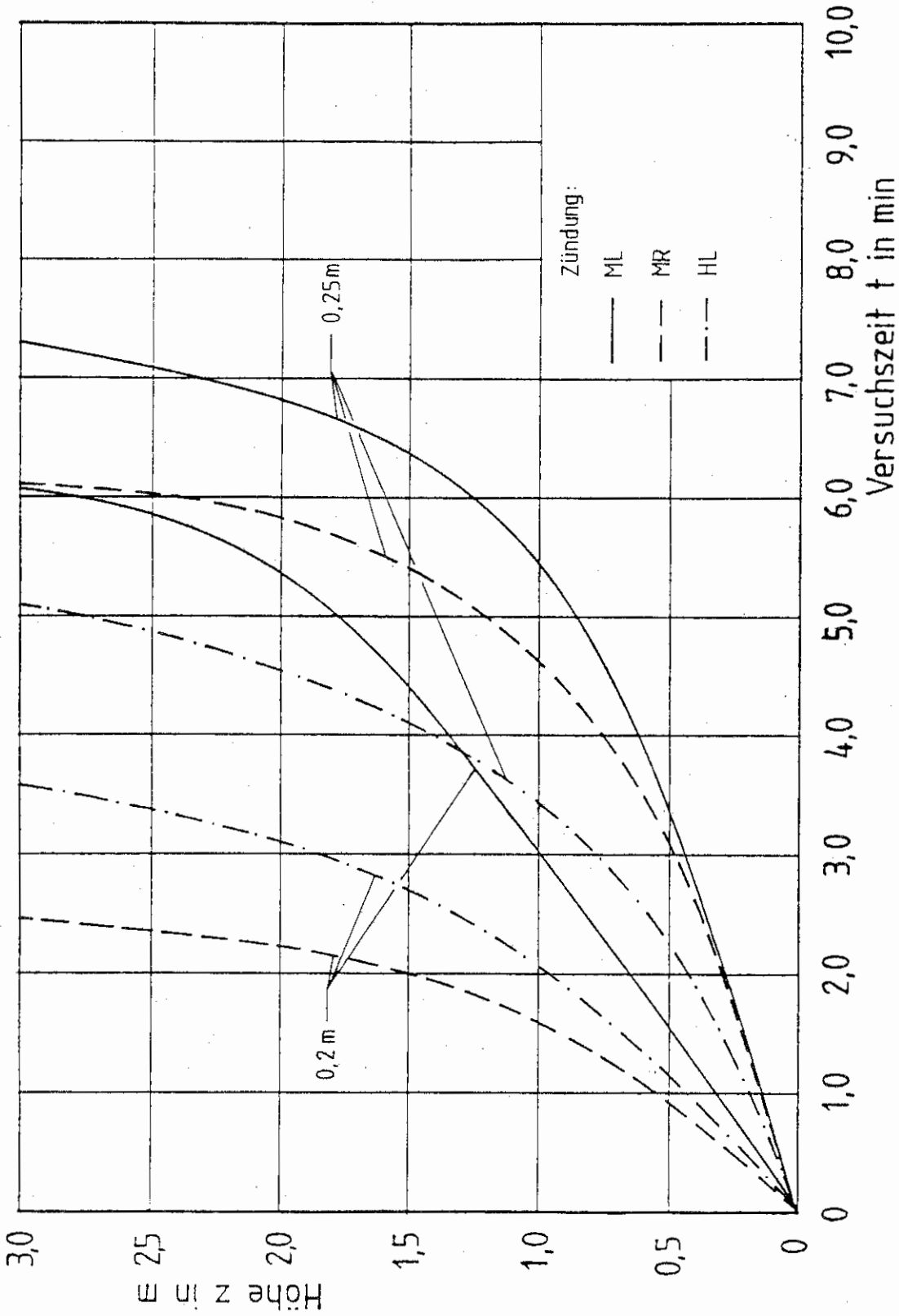


Bild 10 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I, Meßwerte)

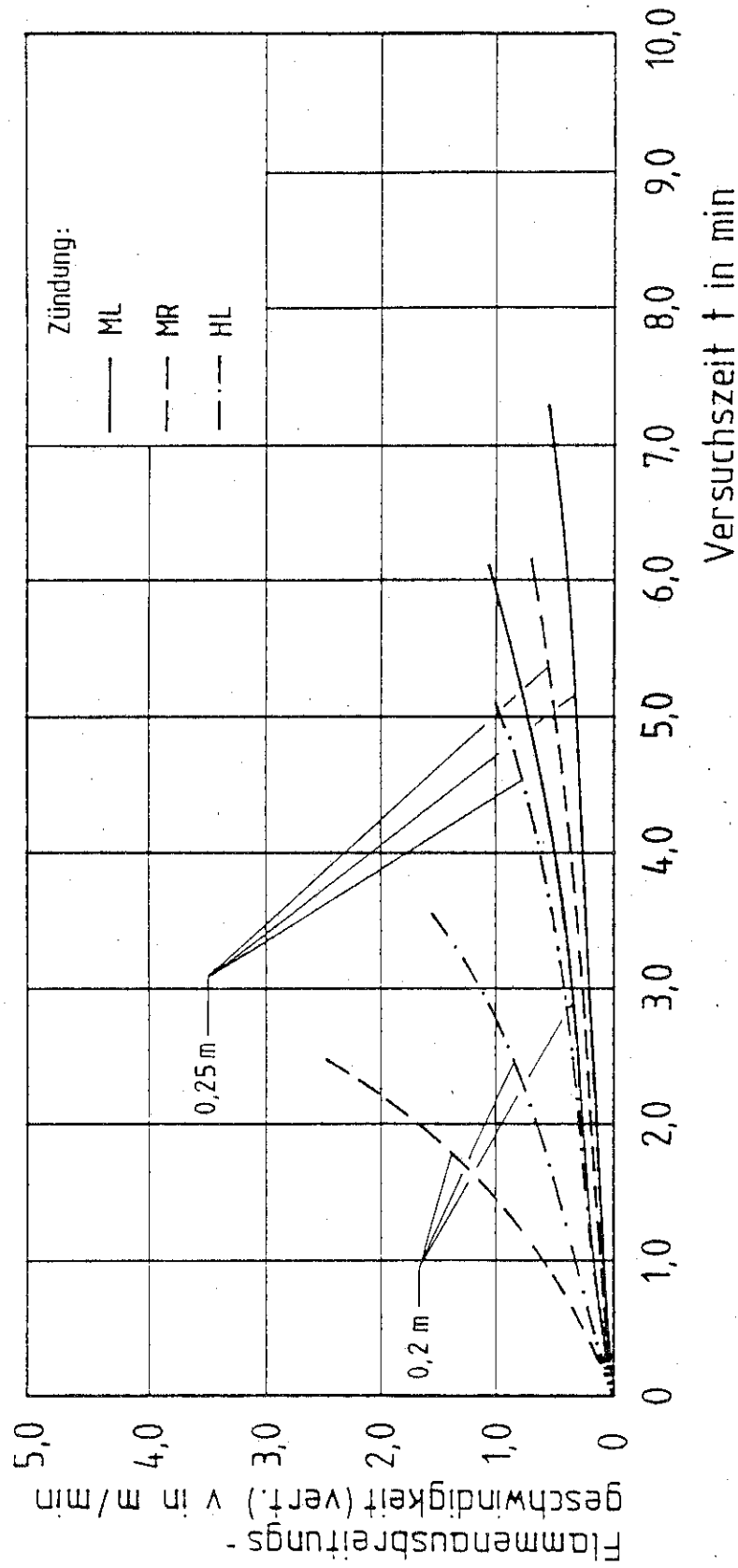


Bild 11 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I)

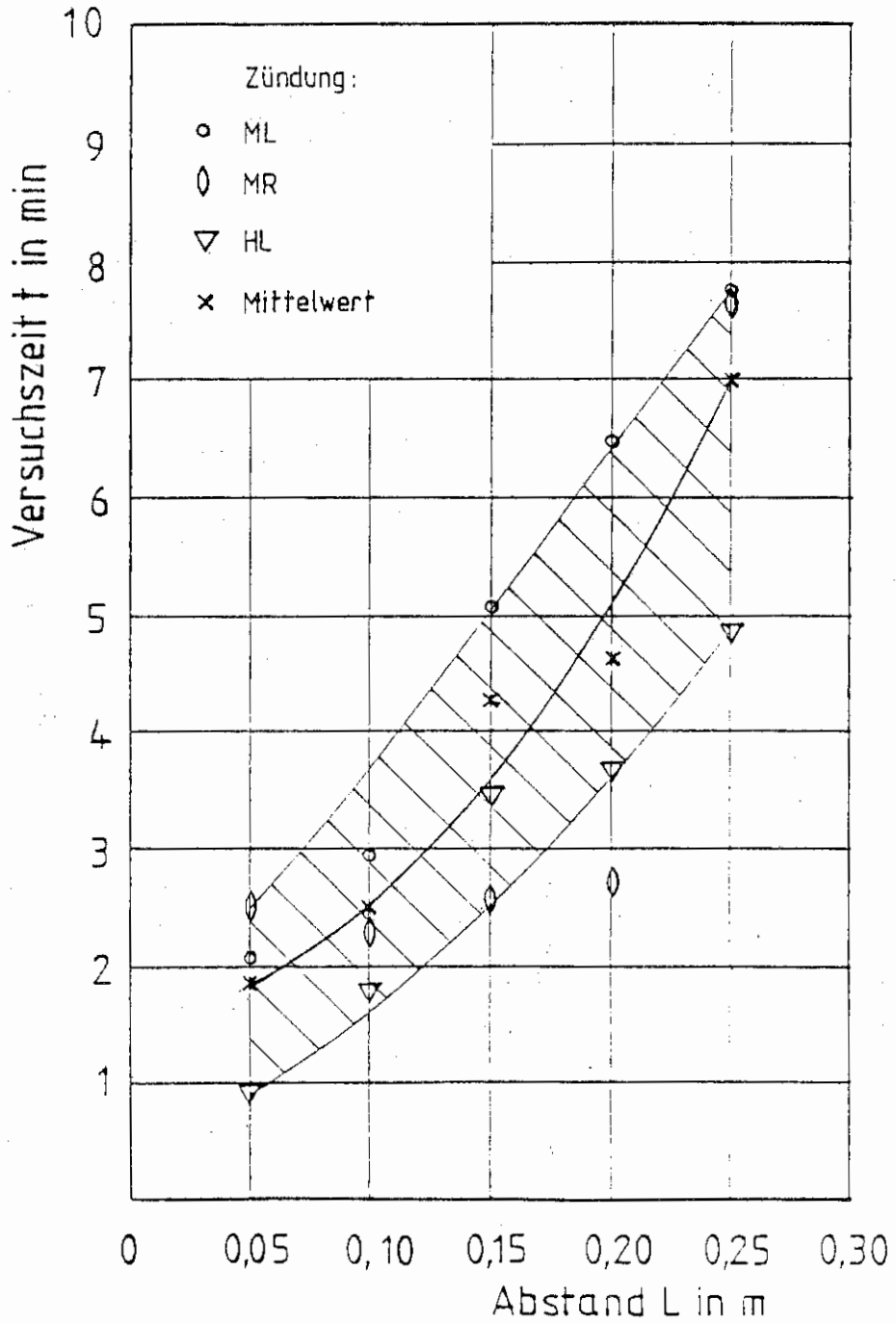


Bild 12 Versuchszeit, bei der sich die gegenüberstehende Lagerattrappe durch Wärmeaustausch entzündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I)

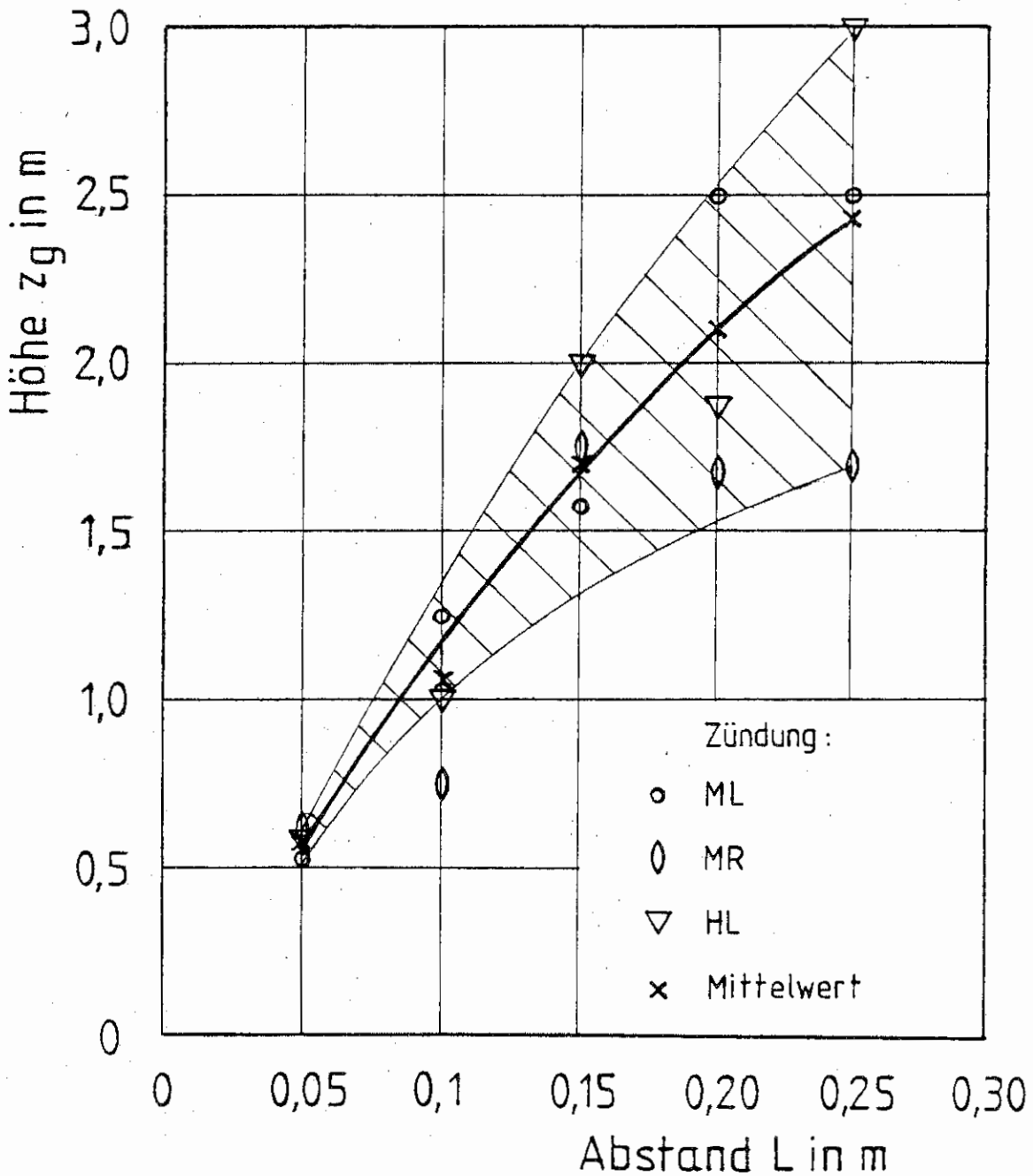


Bild 13 Höhe, bei der sich die gegenüberstehende Lageratrappe durch Wärmeaustausch entzündet als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I, Meßwerte)

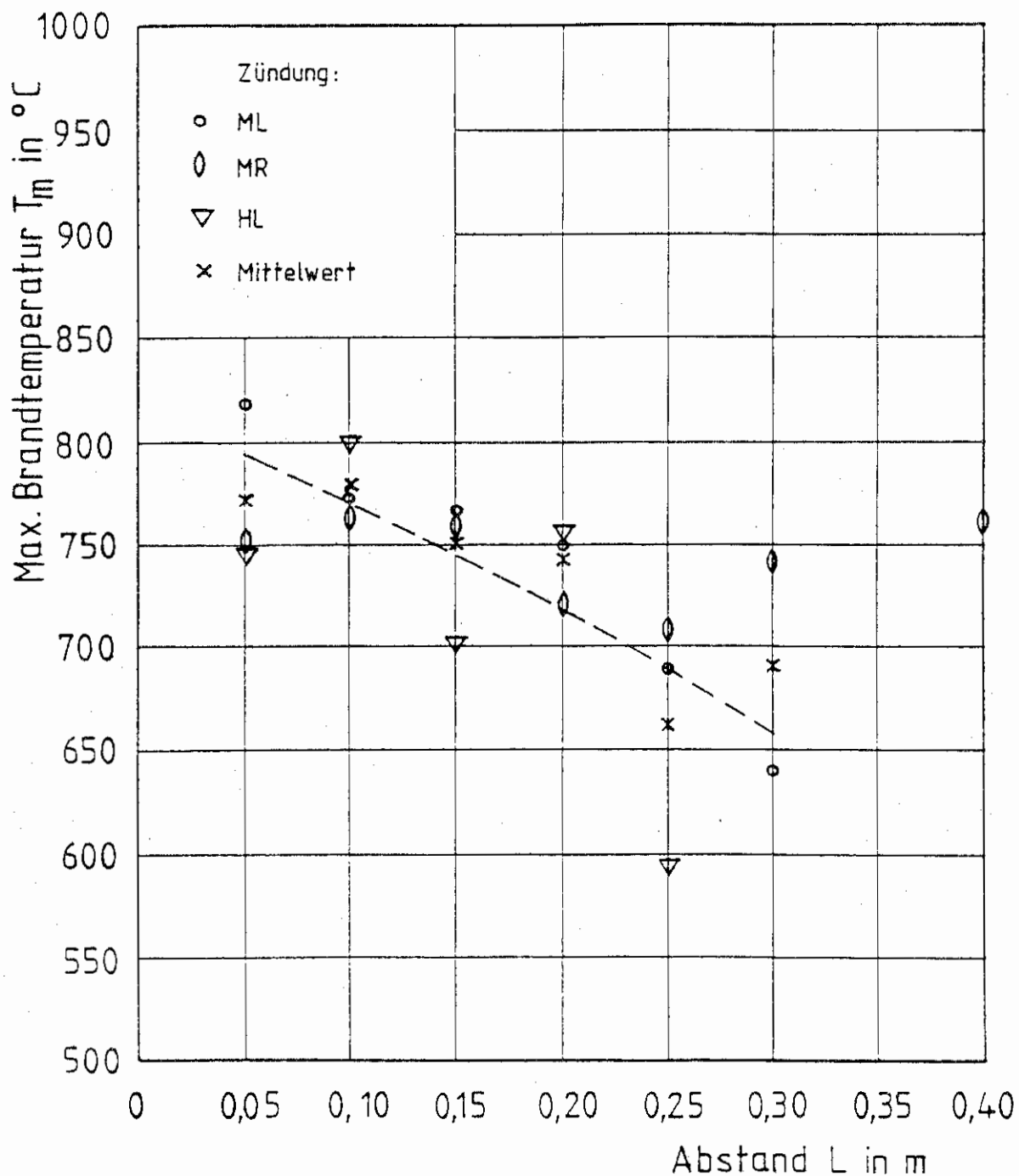


Bild 14 Maximale Brandtemperatur als Funktion des Abstandes unter Variation der Position der Zündquelle (Versuchsserie Teil I)

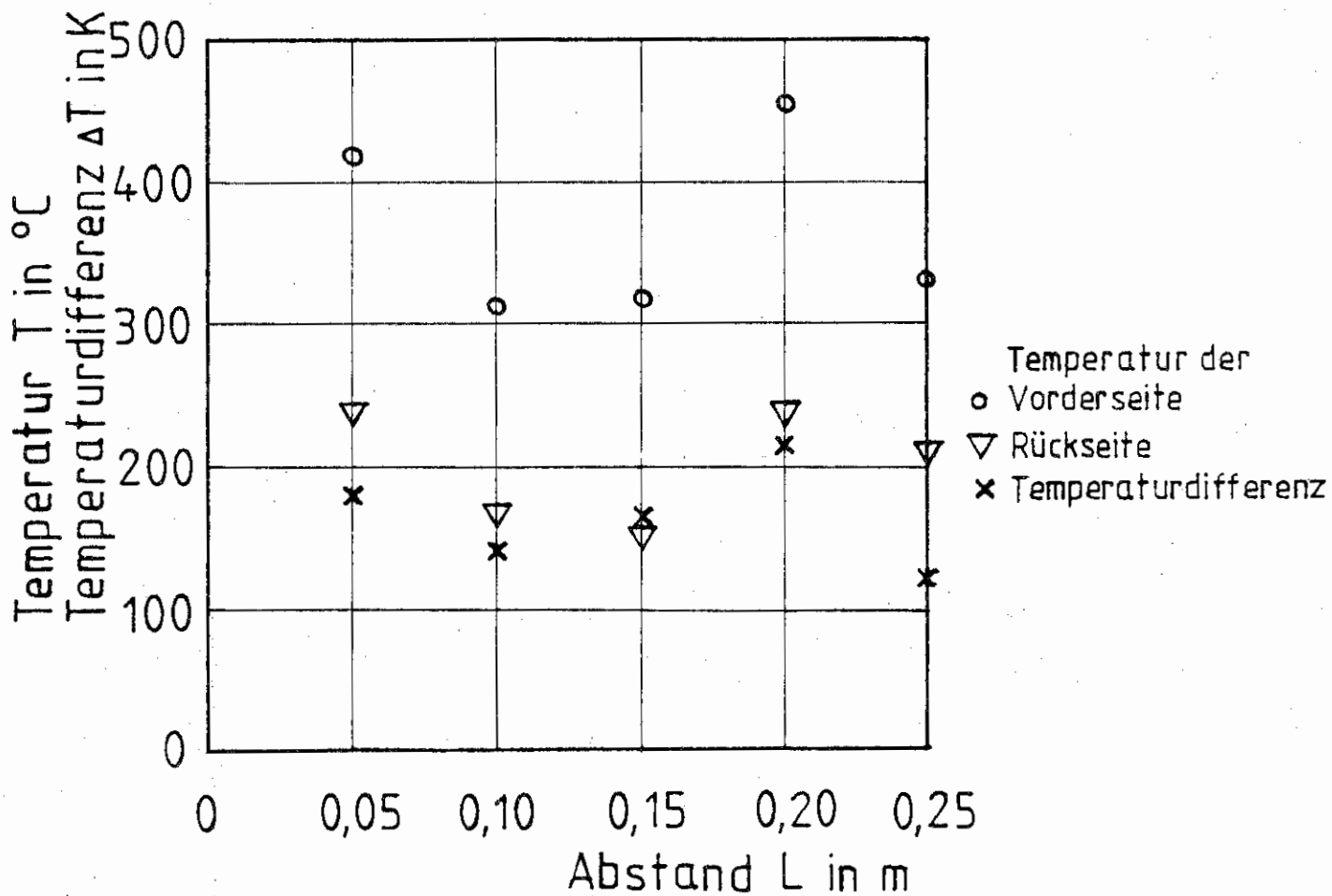


Bild 15 Temperaturmeßwerte zwischen Vorder- und Rückseite der durch die Zündquelle gezündeten Wellpappe im Zeitpunkt der Brandausbreitung auf die benachbarte Wellpappe (Temperaturmeßstellen in Zündhöhe, Versuchsserie Teil I)

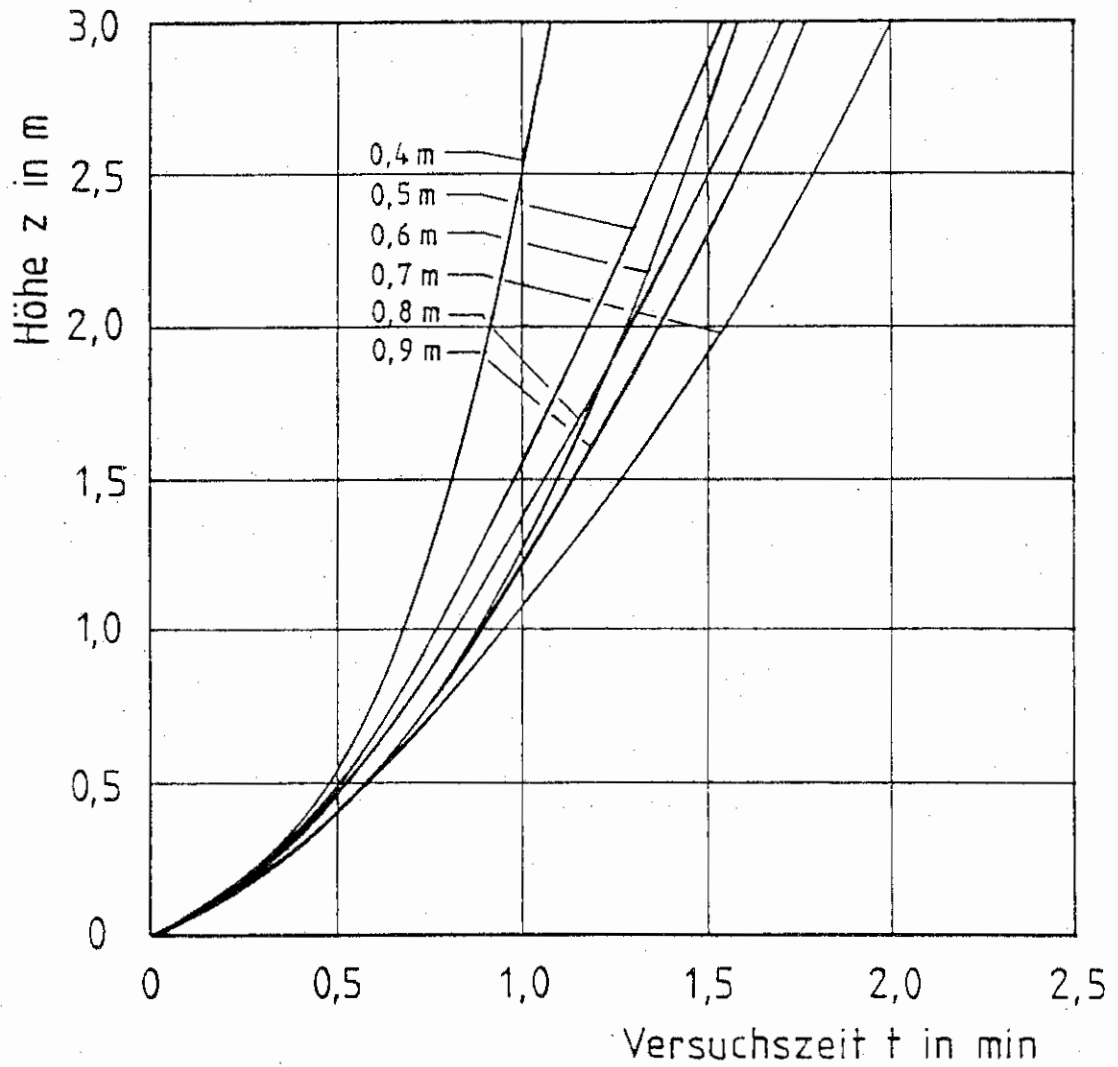


Bild 16 Höhe, die die Flammenwurzel erreicht hat als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen (Versuchsserie Teil II, Meßwerte)

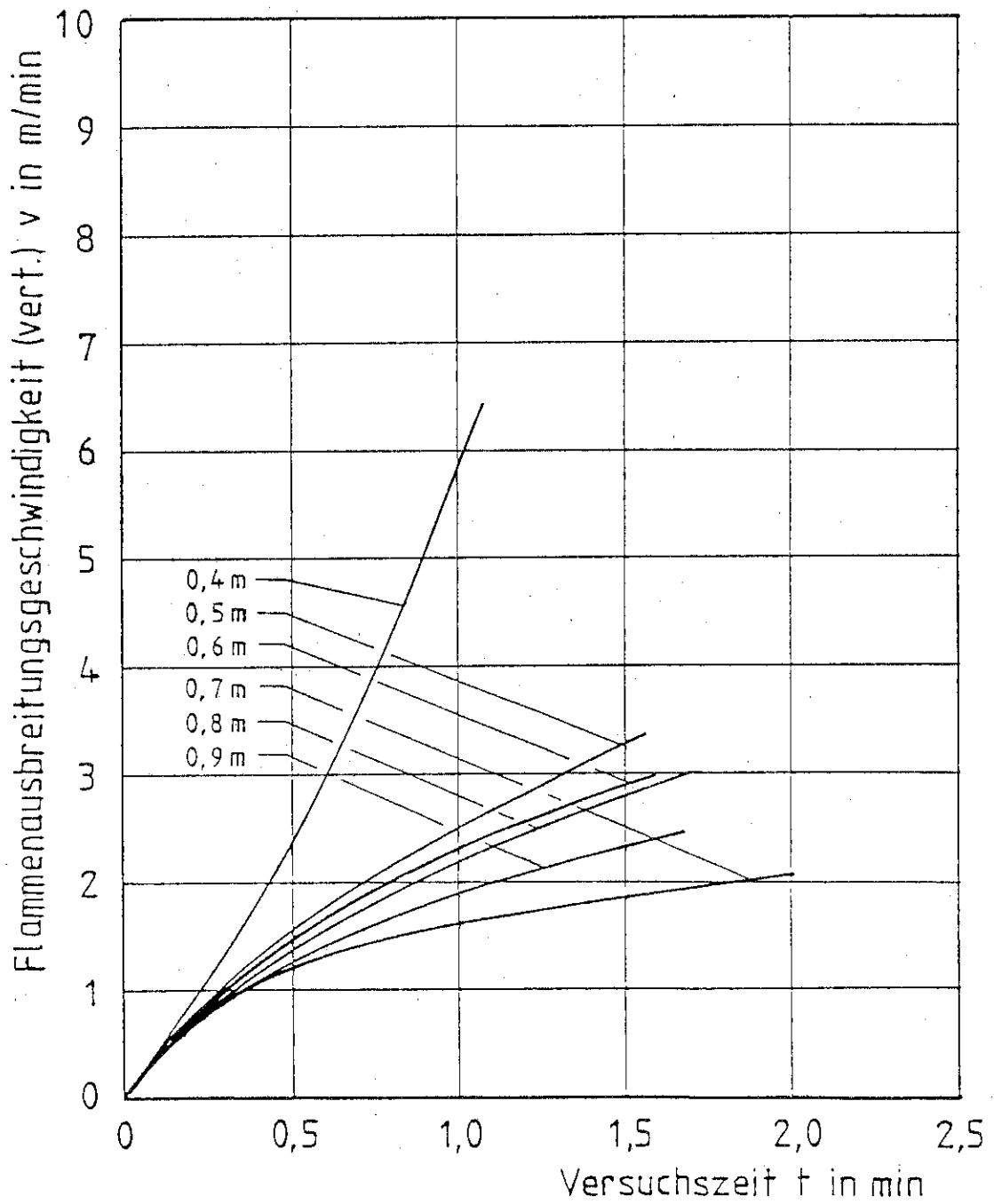


Bild 17 Vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Versuchszeit bei verschiedenen Abständen (Versuchsserie Teil II)

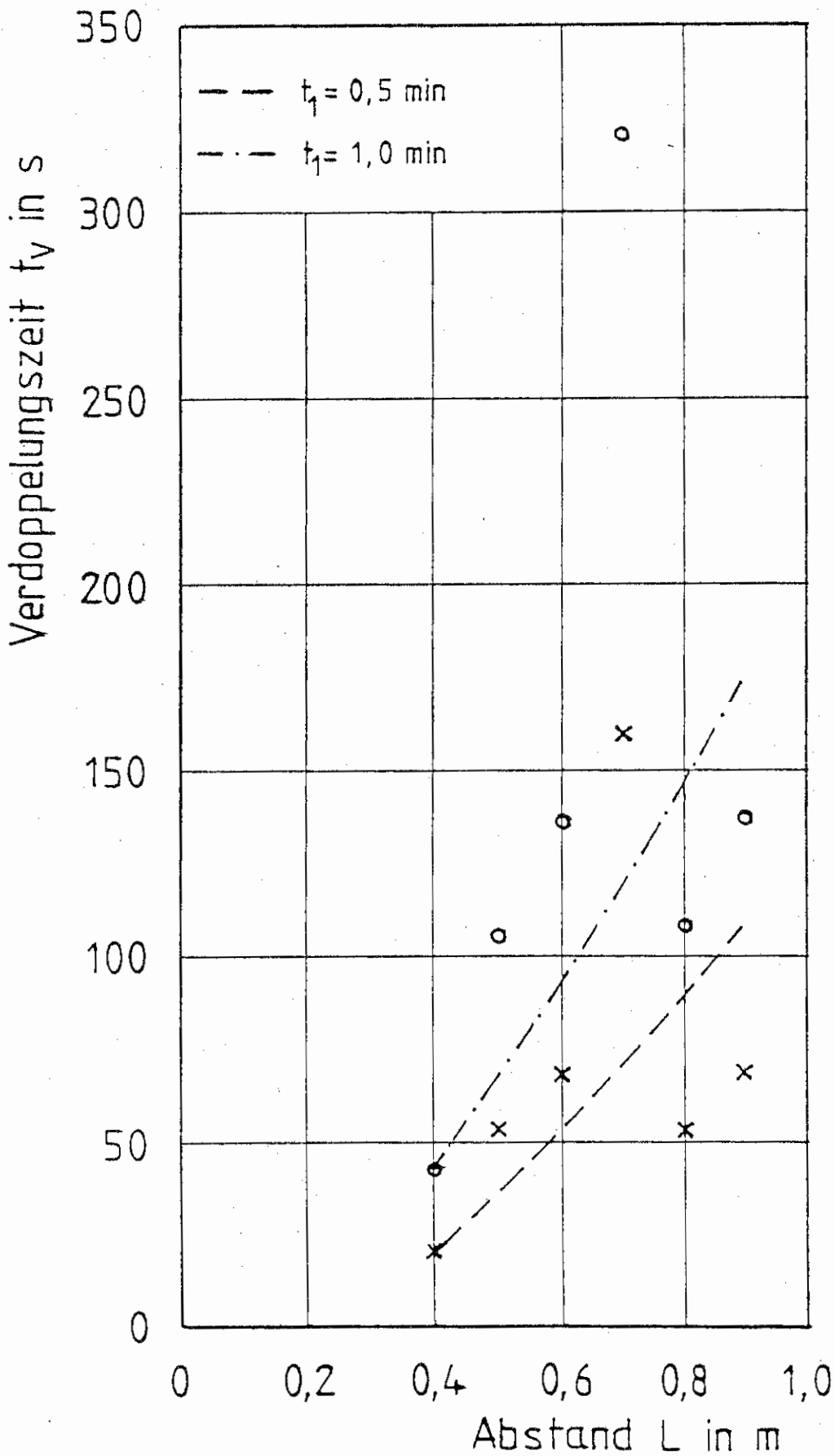


Bild 18 Verdoppelungszeit als Funktion des Abstandes (Versuchsserie Teil II)

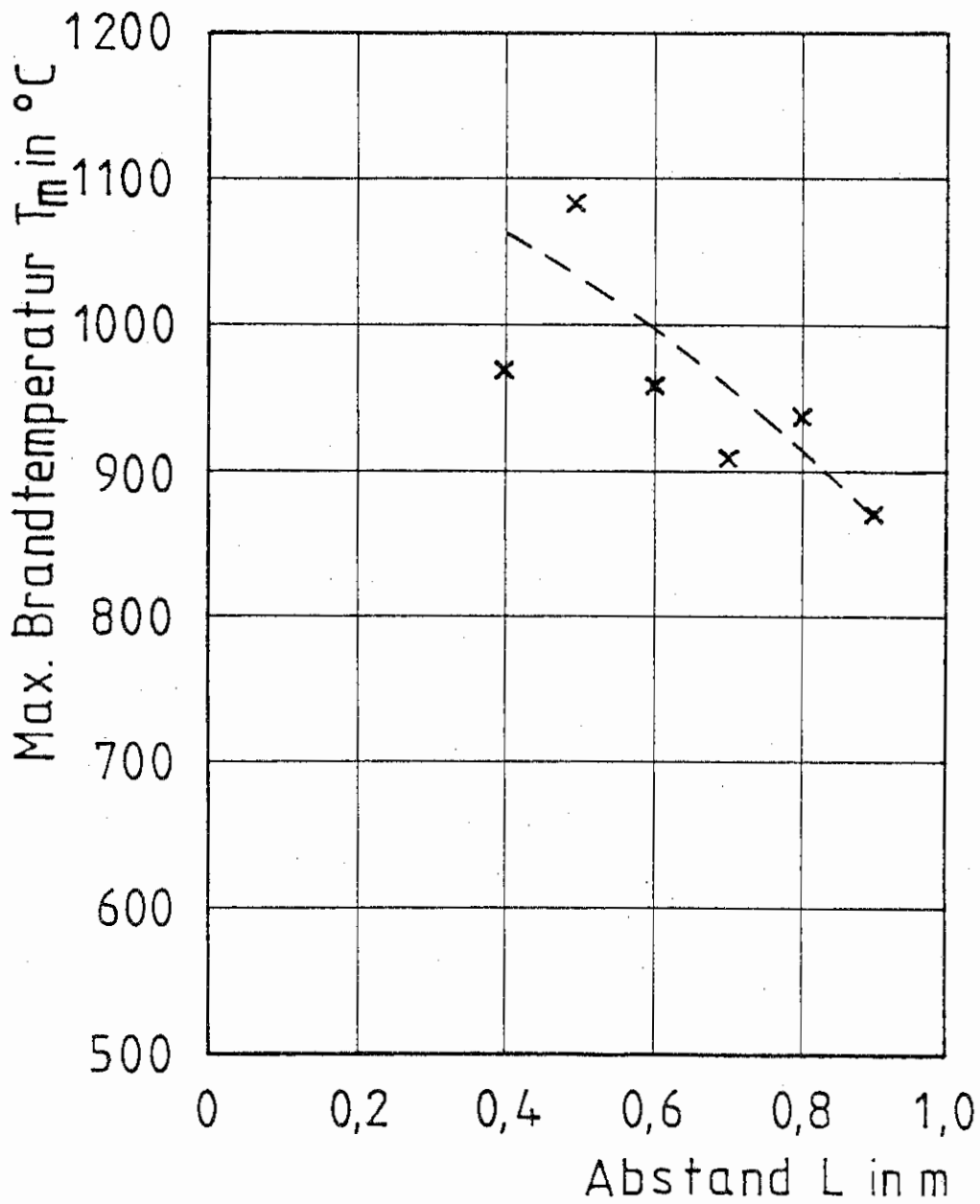


Bild 19 Maximale Brandtemperatur als Funktion des Abstandes
(Versuchsserie Teil II)

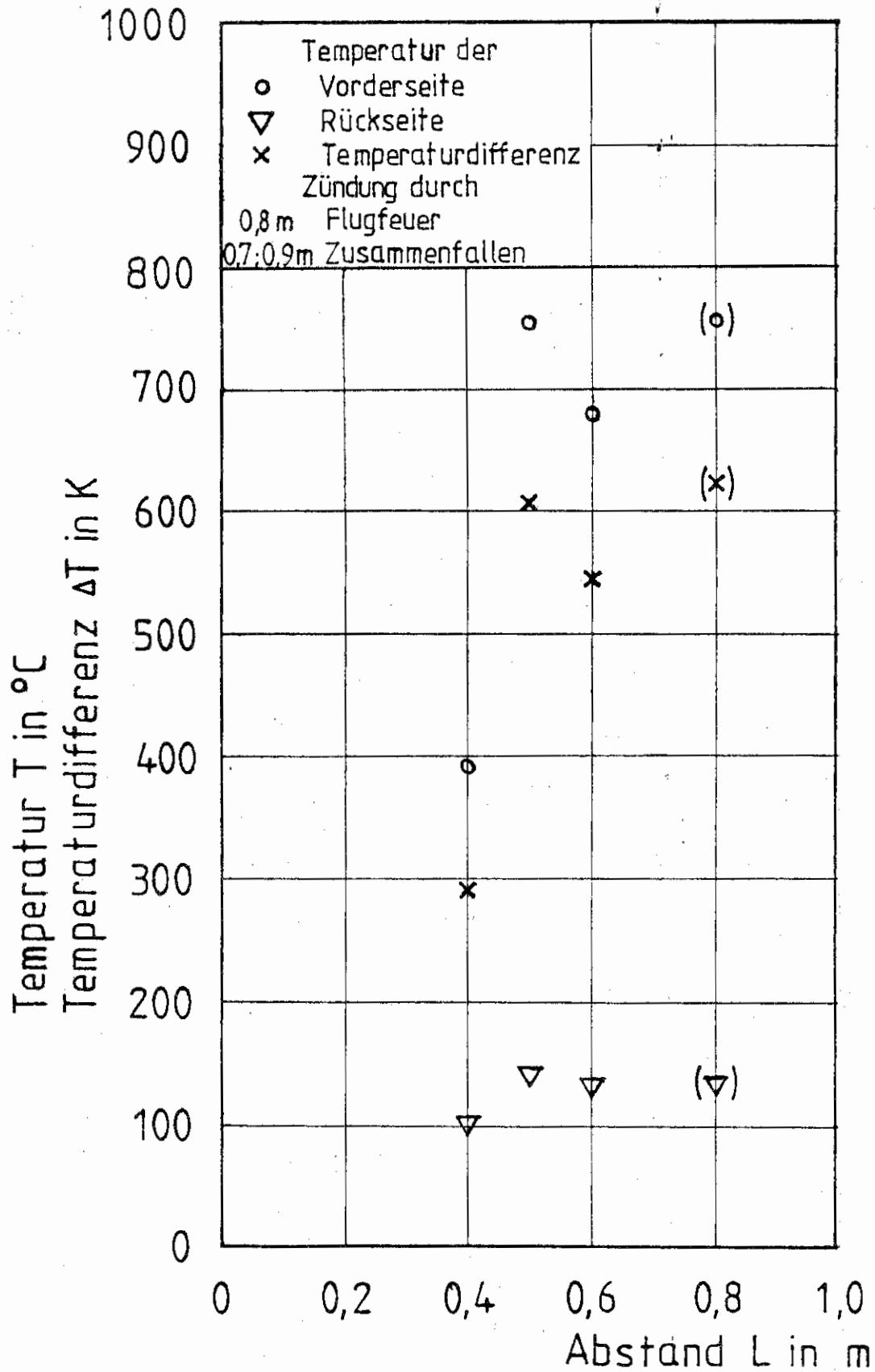


Bild 20 Temperaturen an Vorder- und Rückseite des Lagergutes des durch die Zündquelle gezündeten Stapels zum Zeitpunkt der Brandausbreitung auf den benachbarten Stapel (Temperaturmeßstellen in Zündhöhe, Versuchsserie Teil II)

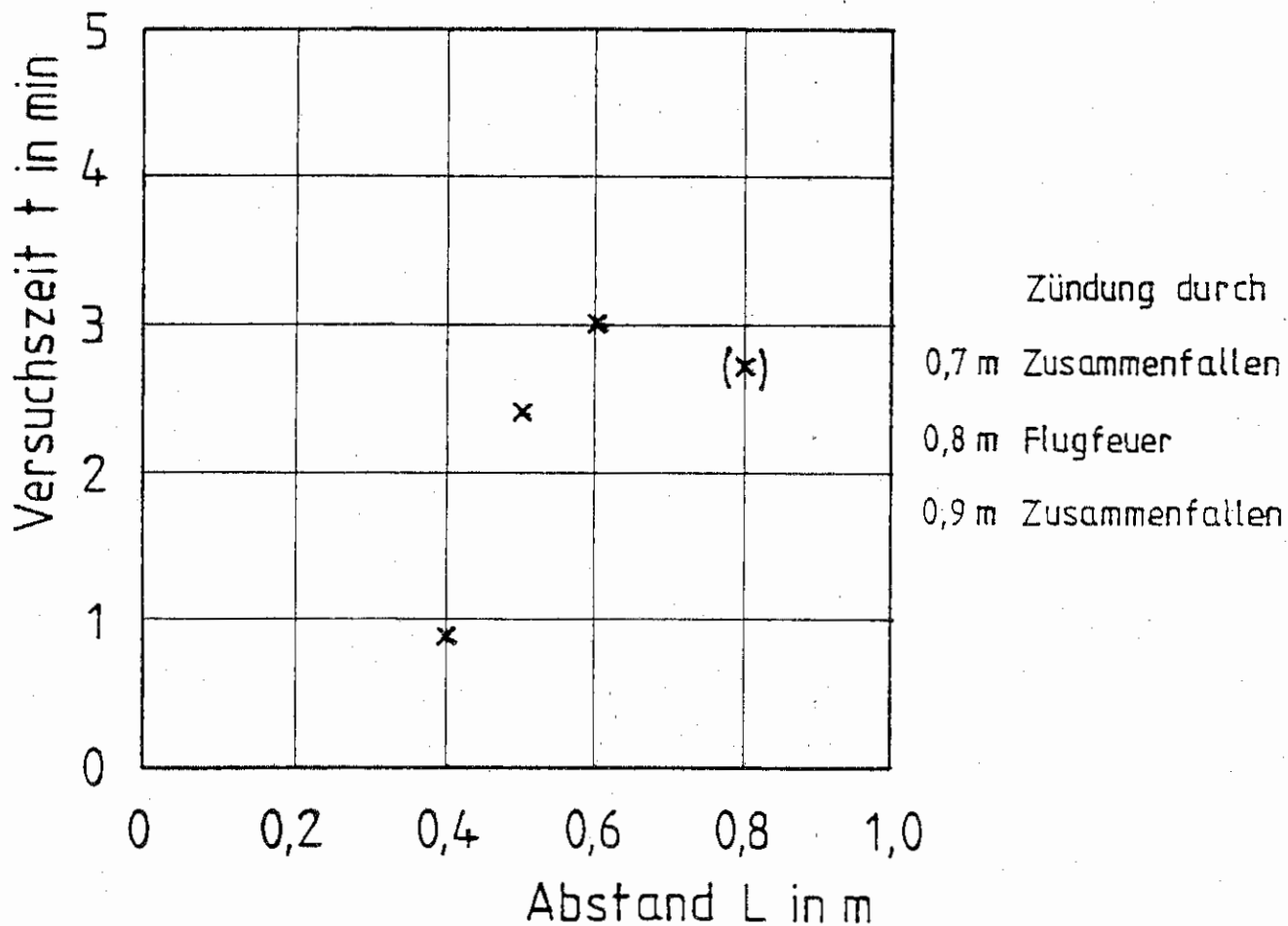


Bild 21 Versuchszeit, bei der sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeaustausch entzündet als Funktion des Abstandes (Versuchsserie Teil II)

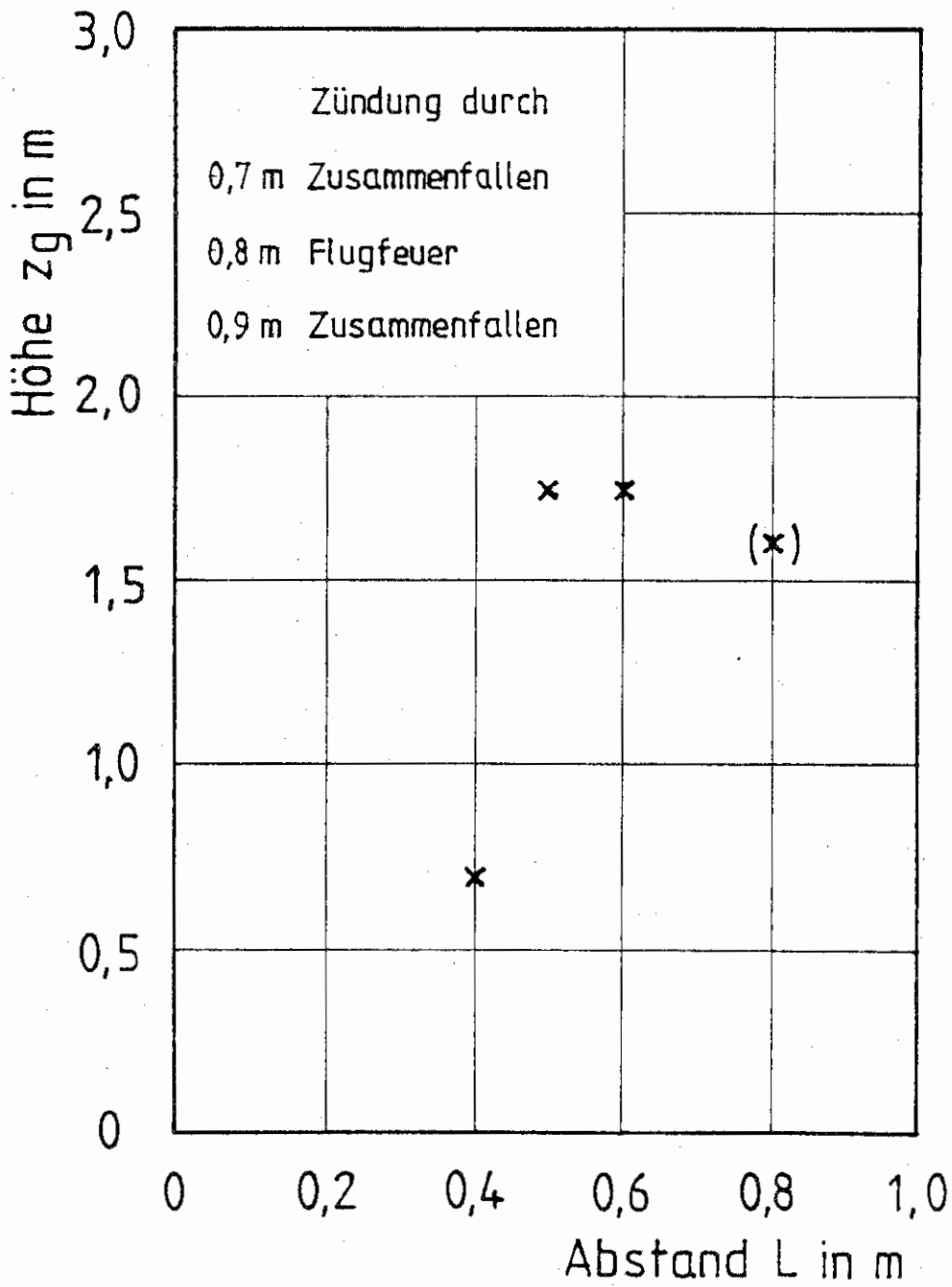


Bild 22 Höhe, bei sich der gegenüberstehende Lagerstapel durch Wärmeaustausch entzündet als Funktion des Abstandes (Versuchsserie Teil II)