

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil 3: Großbrandversuche 2

**64**

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

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

Forschungsbericht Nr. 64

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,  
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.  
Teil 3: Großbrandversuche 2

von

Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
März 1988

FA.Nr. 109 (3/85)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. VERSUCHSPROGRAMM, VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	3
3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN	5
4. MESSERGEBNISSE - Abbrandmasse und Wärmefreisetzung	7
5. ZUSAMMENFASSUNG	12
6. FORMELZEICHEN	14
7. LITERATURVERZEICHNIS	15
8. TABELLE UND BILDER	16

## 1. EINLEITUNG

Das Brandausbreitungsrisiko in Lägern hat in der Vergangenheit allgemein stark zugenommen, da die Wertekonzentrationen erhöht wurden, sich das Lagergut und dessen Verpackung verändert haben, zum Teil in Richtung höherer Feuergefährlichkeit, und aus einer ganzen Reihe von Ursachen die Lagergebäude flächen- und/oder höhenmäßig eine größere Ausdehnung erfahren haben.

Die Schadenerfahrungen der Sachversicherer im In- und Ausland zeigen, daß über 50 % aller Brände in Lägern entstehen. Die wirtschaftliche Bedeutung des Brandschutzes insbesondere im Lagerbereich wird deutlich, wenn man die wesentlichen Zahlen für die Bundesrepublik Deutschland aus den Statistiken der Sachversicherer zugrundelegt. Nach Hinrichs /1/ betrug die Schadenhöhe bei ca. 30 000 Industriebränden im Jahre 1985 2,3 Milliarden DM, wobei 70 % dieser Schadenssumme durch insgesamt etwa 300 Brände mit jeweils mehr als 1 Mio. DM Schaden verursacht wurde, d.h. 1% der Anzahl der Brände führten zu 70 % des Gesamtschadens.

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Brandes sind viele Parameter maßgebend. Hierzu zählen stoffliche und geometrische Einflußgrößen sowie die Zündquelle. Einige der Parameter sind in der Anfangsphase mehr von Bedeutung, wie die Größe und die Lage der Zündquelle. Die örtliche Verteilung des Lagergutes und dessen Entflammungseigenschaften sowie die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung aus den bereits gezündeten Brandstoffen beeinflussen die Brandweiterleitung nach erfolgter Zündung der Gegenstände in unmittelbarer Nähe der Zündquelle.

Eine Abschätzung der zu erwartenden Brandausbreitung ist zum Beispiel in der Planungsphase einer ortsfesten Löschanlage wünschenswert. Die quantitativen Auswirkungen einer Veränderung einzelner dieser Parameter sind jedoch bis heute erst für zu wenige Einzelfälle untersucht worden, um vorausberechnen zu können, wie rasch sich ein Brand bei Vorhandensein beliebiger

Lagerstoffe in beliebiger geometrischer Anordnung ausbreiten wird. Deshalb werden heutzutage in Zweifelsfällen reale Brandversuche mit dem Ziel durchgeführt, vorbeugende und abwehrende Brandschutzmaßnahmen für eine bestimmte Lageranordnung zu optimieren.

Das bis heute über die Ausbreitung von Bränden im Lagerbereich angesammelte Wissen reicht also zu einer Vorausberechnung der Brandausbreitungsvorgänge bei in üblichen Lageranordnungen gestapelten verschiedenen Gütern noch nicht aus. Aus diesem Grund wurde damit begonnen, die Brandausbreitungsvorgänge systematisch zu untersuchen. Die bisher bekanntgewordenen Untersuchungen zum Abbrandverhalten von gelagerten Stoffen, insbesondere solchen in Regalstapelanordnung, wurden vom Verfasser in einer Literaturübersicht /2/ zusammengefaßt.

Unter Berücksichtigung der hohen Kosten für realitätsnahe Brandversuche ist es erforderlich geworden, die Brandausbreitungsvorgänge mittels physikalischer Modelle berechenbar zu machen. Diese Simulation muß auf im Labor meßbare Stoffwerte Bezug nehmen können. Die Arbeiten hierzu sind allerdings international noch wenig entwickelt, auch stehen nur vergleichsweise wenige Daten zur Überprüfung von Modellrechnungen zur Verfügung. Um den Einfluß einiger der vorgenannten Parameter auf die Brandausbreitung zu ermitteln, sind somit derzeit noch weiterhin Vergleichsuntersuchungen im realen Maßstab notwendig. An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde damit im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsvorhabens, das in enger Zusammenarbeit mit dem Vorhaben "Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen" durchgeführt wird, bereits begonnen. Die ersten Ergebnisse dieser Versuche, bei denen die Art des Lagergutes und dessen geometrische Anordnung variiert wurden, sind vom Verfasser in /3/ dargestellt worden. Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse von weiterführenden Versuchen, bei denen im gleichen Versuchsstand wie bei /3/ zusätzlich die Position der Zündquelle bezüglich der Lagergutanordnung verändert wurde.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM, VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, stellen die hier durchgeführten Versuche eine direkte Fortsetzung der in /3/ beschriebenen dar, mit dem Unterschied, daß zusätzlich eine weitere Position der Zündquelle verwendet wurde. Diese ist im Bild 1 als 'Z2' bezeichnet. Die Versuchsanordnung ist ausführlich in /3/ beschrieben. Es handelt sich dabei um eine Lagerung von Wellpappkartons, wobei das Füllmaterial und die Abstände der Kartons untereinander variiert werden. Als Stützkonstruktion werden Gitterboxen verwendet, wie im Bild 1 dargestellt ist.

Stellvertretend für mittelformatige nichtbrennbare Lagergüter wurden leere, quaderförmige Stahlblechkanister verwendet, die von einlagigen Wellpappkartons umhüllt wurden. Der zwischen dem Stahlblechkanister und der Kartoninnenseite verbleibende Zwischenraum von 3 cm bis 5 cm wurde in einem Teil der Versuche mit Holzwolle, in einem anderen Teil mit schwerentflammaren Polystyrolschaumwürfeln ausgefüllt, um die Auswirkungen des unterschiedlichen Brandverhaltens zweier der am häufigsten verwendeten Stoßschutzmittel auf den Brandausbreitungsvorgang zu beurteilen.

Bezüglich der lokalen Anhäufung der Wellpappkartons im Lager wurden zwei Varianten untersucht. Bei der einen Variante wurde ein großer Abstand von einer Kartonreihe zur in der nächsten Regalebene liegenden Reihe vorgesehen, bei der anderen Variante wurde der Abstand so klein wie möglich gehalten.

Die Größe der Zündquelle wurde so gewählt, daß die zur Verfügung gestellte Wärmeenergie bezogen auf die Größe der Lageranordnung gering war. Wegen der begrenzten Höhe des Versuchsraumes und der Lageranordnung war es notwendig, zunächst einen vom Boden ausgehenden Brand zu untersuchen.

Der Gitterboxenabstand betrug einheitlich 20 cm in beiden Richtungen, und zwar für alle bisher durchgeführten Versuche. Der Einfluß dieses Abstandes auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist bislang quantitativ noch nicht bekannt. Seine Untersuchung stellt daher eine weiterführende Aufgabe für dieses Forschungsvorhaben dar, ebenso die Frage, unter welchen Bedingungen und maximalen Abständen überhaupt noch eine Brandübertragung möglich ist. Auf die qualitativ bekannten Einflüsse eines unterschiedlich großen Abstandes auf die Geschwindigkeit der vertikalen Brandausbreitung durch die Einwirkungen von thermischem Auftrieb einerseits, der die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei großen Abständen beschleunigt, und von Strömungswiderständen bei engen Abständen andererseits, welche die Brandausbreitungsgeschwindigkeit verzögern, ist der Verfasser in /2/ näher eingegangen.

Die im Bild 1 eingezeichnete Dachfläche wurde zu dem Zweck installiert, um eine Staufläche oberhalb der Lagergutanordnung, praktischen Gegebenheiten entsprechend, zu berücksichtigen. Damit war die Absicht verbunden zu untersuchen, ob das Vorhandensein einer solchen Fläche auf die Brandausbreitung, insbesondere auf die horizontale Ausbreitung der Flammen auf der obersten Stapellage, von signifikantem Einfluß wäre. Bei der Dachfläche handelte es sich um Stahltrapezprofile mit oberseitiger nichtbrennbarer Wärmedämmschicht aus Steinwolle-Dachdämmplatten in 60 mm Dicke. Die Abmessungen des Daches, welches sich in einem Abstand von 60 cm oberhalb der Gitterboxenoberseite befand, waren 4,0 m x 5,1 m. Damit betrug die Dachfläche etwa das 6,5fache der Grundfläche der Versuchsbrandlast.

Die Zündquelle bestand jeweils aus einer Holzweichfaserplatte mit den Abmessungen 10 cm \* 20 cm \* 2 cm für den Zündort 'Z1' und aus 2 solchen Platten für den Zündort 'Z2'. Diese wurden mit je 100 ml Brennspritus getränkt.

Das Meßprogramm enthielt die Bestimmung des durch die Verbrennung bedingten zeitlichen Massenverlustes der Brandlast mittels einer

Abbrandwaage sowie die Messung zeitlicher Temperaturverläufe an zahlreichen Meßstellen, woraus auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Im Bild 2 ist die Verteilung der Thermoelemente für den Fall seitlicher Zündung (an der Stelle 'Z1') wiedergegeben.

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBSACHTUNGEN

Die Ausbreitung der Flammen über die Umverpackung und in die Füllstoffe nach Zündung der Zündquelle konnte solange beobachtet werden, bis das Auslöseelement des zentral oberhalb der Versuchsanordnung angebrachten Sprinklers ansprach. Dann wurde über ein Magnetventil der Löschwasserstrom freigegeben, um die Flammen zu unterdrücken und das Brandgut unter die Zündtemperatur abzukühlen.

Bezüglich der Abhängigkeit der Brandentwicklung von den variierten Parametern Kartonverteilung, Ort der Zündquelle und Art des eingesetzten Füllmaterials sind dieselben allgemeingültigen Angaben wie bei /3/ möglich. Allerdings bestätigte sich der in der oben genannten Literaturstelle vermutete Einfluß eines über dem Versuchsstand angebrachten Daches als Wärmestaufläche nicht. Es war dort die Vermutung ausgesprochen worden, daß nach der ersten vertikalen Ausbreitungsphase der Flammen die horizontale Ausbreitung in der obersten Stapellage rascher vor sich gehen würde als ohne Dach und daß das Auslöseelement infolge der Bildung einer gestauten warmen Rauchgasschicht unterhalb der Dachfläche ebenfalls rascher ansprechen würde. Die Ursache dafür, daß diese aufgrund theoretischer Überlegungen erwarteten Effekte nicht eintraten, ist vermutlich in der begrenzten horizontalen Ausdehnung des Versuchsaufbaus sowie der begrenzten Ausdehnung der verwendeten Dachfläche begründet.

Im folgenden werden die bereits beschriebenen Beobachtungen über den Einfluß der obengenannten Parameter in gekürzter Form wiedergegeben.

Unabhängig von der Lage der Zündquelle und der geometrischen Anordnung sowie dem gelagerten Material erfolgte die Brandausbreitung in vertikaler Richtung immer wesentlich rascher als in horizontaler Richtung.

Die Lage der Zündquelle an der Stelle 'Z1' hatte zur Folge, daß bei drei Kartons in jeder Gitterbox die horizontale Ausbreitung des Brandes bevorzugt in Richtung des hinter dem gezündeten Stapel stehenden Stapels erfolgte. Die horizontale Ausbreitung in Richtung des rechts der Zündquelle aufgebauten, dem gezündeten Stapel benachbarten Stapel erfolgte wesentlich langsamer.

Bei Lage der Zündquelle an der Stelle 'Z2' wurde ein symmetrisch gleichmäßiges Anbrennen und eine ebenso symmetrische Brandausbreitung bezüglich der Lage der Flammenfront in Form eines nach oben sich erweiternden Trichters mit engem Öffnungswinkel beobachtet, sofern wie im oben genannten Beispiel drei Kartons pro Gitterbox verwendet wurden. Dabei erfolgte, wie oben angemerkt, die vertikale Brandausbreitung wesentlich rascher als die horizontale. Bei fünf Kartons pro Box breiteten sich die Flammen fast nur in vertikaler Richtung entlang der Vorderflächen und entlang des mittleren Spaltes in Richtung auf die Lagermitte aus. Die Ausbreitung in den horizontalen Zwischenräumen erfolgte aufgrund der engen Abstände bei beiden Positionen der Zündquelle nur sehr langsam.

Von weiterem Einfluß waren die verwendeten Füllstoffe, wobei sich bestimmte Eigenschaften dieser Füllstoffe bereits in einem frühen Brandstadium, auch bedingt durch die geringe Wärmeenergie der Zündquelle, auf das gesamte Brandverhalten auswirkten.

Die Brandausbreitung war bei Verwendung der Holzwollefüllung insgesamt langsamer, unabhängig davon, ob jeweils die Anordnung

mit drei oder fünf Kartons pro Gitterbox betrachtet wird. Dies könnte seine Ursache auch in dem Rückstandsgerüst haben, welches die Holzwolle bildet und somit die Brandausbreitung zwischen Karton und Kanister behindert. Damit wird die Stabilität des gesamten Kartons etwas länger beibehalten als bei der Polystyrolfüllung, die, sobald sie geschmolzen ist und sofern die dem Füllmaterial zugeführte Wärmeenergie zum Verdampfen der Schmelze ausreicht, mit dem glutbildenden Wellpappkarton mitverbrennt.

Weiterhin war bei Verwendung von Polystyrol-Füllstoff die Bildung schwarzen Rauches im Anfangsstadium des Brandes infolge der Zusätze für die Schwerentflammbarkeit auffallend. Bei weiterer Erfassung des Lagergutes durch die Flammen, d.h., wenn ein kompletter Stapel brannte, ließ die Rauchentwicklung sichtbar nach und die Flammen hatten ein heller leuchtendes Erscheinungsbild als bei der Verwendung von Holzwolle als Füllstoff, woraus auf ein insgesamt höheres Temperaturniveau geschlossen werden kann.

#### 4. MESSERGEBNISSE - Abbrandmasse und Temperaturen

Während der Verbrennung des Lagergutes nimmt dessen Masse ab. Die zeitliche Änderung dieser Masse wird mit der Abbrandwaage bestimmt und der zugehörige Meßwert kontinuierlich registriert.

Die Bestimmung des zeitlichen Massenverlustes hat zwei Gründe. Zum einen ist zu ermitteln, welchen Einfluß Geometrie und verwendete Stoffe auf die Geschwindigkeit der Brandausbreitung haben und wie dies die Zunahme der Abbrandmasse während des Versuchsablaufes bestimmt. Zum anderen soll ermittelt werden, in welchem Brandstadium ein Auslöseelement einer ortsfesten Löschanlage anspricht, wobei dieser Zeitpunkt ab Versuchsbeginn ein Maß für die Wärme freisetzung sein kann, die in Abhängigkeit von der Position des Auslöseelementes bezüglich der Brandausbruchsstelle für das Ansprechen dieses Elementes kritisch ist. Sowohl die eigentliche Entwicklungsphase des Brandes als auch der Ansprechzeitpunkt des

Auslöseelementes bei den verschiedenen Versuchen lassen schließlich eine Beurteilung des Brandausbreitungsrisikos in Abhängigkeit von den obengenannten Parametern, d.h. der gewählten Geometrie und den verwendeten Stoffen, zu, wobei der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse eine wesentliche Hilfsgröße für die Beurteilung darstellt.

Der Auslösezeitpunkt, die bis zu diesem Zeitpunkt verbrannte Masse, deren zeitlicher Verlauf und der zeitliche Anstieg der Abbrandmassenkurve sind Maße für die Geschwindigkeit der Brandausbreitung und damit für das Brandausbreitungsrisiko vergleichbarer Objekte sowie für die freigesetzten Wärmeströme, durch welche die weitere Brandausbreitung unterstützt und wodurch Bauteile brandbelastet werden.

Bisher wurden noch keine Angaben über den tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse gemacht. Die Form der Meßkurven der im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens durchgeführten Abbrandversuche legt für den Zeitbereich der Brandentwicklungsphase die Approximation durch eine Exponentialfunktion nahe. Diese hat die Form (vgl./3/)

$$\Delta M = M_0 e^{\frac{f}{Be} (t - t_0)} \quad (1)$$

und kann bis zum Zeitpunkt des Ansprechens des Auslöseelementes  $t_1$ , vgl. Bild 3, verwendet werden. Freie Abbrände über diesen Zeitpunkt hinaus (im Bild 3 nicht wiedergegeben) lassen einen Übergang zu einer linearen Abhängigkeit der Abbrandmasse von der Zeit erkennen, zumindest bei den hier untersuchten Stoffen und Zündanordnungen. Bei großflächigen Ausdehnungen des Lagergutes ist

mit einer quadratischen Abhängigkeit zu rechnen, solange der Feuerübersprung im Raum noch nicht erfolgt ist.

In der Gleichung (1) bedeutet  $M_0$  eine Anfangsmasse - die Exponentialfunktion beginnt in dem untersuchten Bereich nicht bei dem Wert 0 -, die klein gewählt werden kann, z.B. 1 kg. Dieser Anfangsmasse ist eine Anfangszeit  $t_0$  zugeordnet. Bei  $t = t_0$  ist also  $\Delta M = M_0$ . Durch Regression der Abbrandkurve erhält man den Faktor  $f_{Be}$  als Brandentwicklungsbeiwert. In dieser Größe sind die Einflüsse der Variablen Brandstoff, Geometrie und Zündanordnung enthalten.

In der Tabelle wurden die Ergebnisse der Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Abbrandmasse zusammengestellt. Hierbei wurden Brandlasten aus 3 bzw. 5 Kartons pro Gitterbox verwendet. Es wurden drei oder vier Gitterboxebenen befüllt. Das Stoßschutzmaterial war entweder Holzwolle ('HW') oder schwerentflammbar ausgerüstete Polystyrolchips ('PS').

Aus der Regression des zeitlichen Verlaufs der Abbrandmasse erhält man den oben angegebenen Brandentwicklungsbeiwert  $f_{Be}$ . Aus diesem wird nach der Beziehung  $t_v = 0,693/f_{Be}$  die Verdoppelungszeit der Abbrandmasse (vgl. /3/) berechnet, d.h. der Wert, welcher angibt, nach welcher Zeit die Abbrandmasse sich jeweils verdoppelt hat. Die arithmetischen Mittelwerte aus den jeweiligen Verdoppelungszeiten gleichartiger Versuchsaufbauten, zueinander ins Verhältnis gesetzt, ergeben im Rahmen der Meßgenauigkeit folgende Aussagen:

Bezüglich der verwendeten Stoßschutzmaterialien verhalten sich die Verdoppelungszeiten, bei jeweils gleicher geometrischer Anordnung, wie folgt:

$$t_v('HW') : t_v('PS') = 1,57 : 1 \quad \text{bei 5 Kartons}$$

und

$$t_v('HW') : t_v('PS') = 1,35 : 1 \quad \text{bei 3 Kartons,}$$

der Brand mit Holzwolle breitet sich also langsamer als der mit Polystyrol als Stoßschutzmittel aus.

Bezüglich der verwendeten geometrischen Anordnungen verhalten sich die Verdoppelungszeiten, bei jeweils gleichem Stoßschutzmaterial, wie folgt:

$$t_v('5') : t_v('3') = 1,23 : 1 \quad \text{bei Holzwolle}$$

und

$$t_v('5') : t_v('3') = 1,05 : 1 \quad \text{bei Polystyrol.}$$

Die lokale Brandstoffkonzentration wirkt sich also in der Weise aus, daß die Brandentwicklung bei 5 Kartons langsamer als bei drei Kartons abläuft. Im Vergleich zu dem Materialeinfluß ist dieser Einfluß allerdings geringer.

Bezüglich der Anzahl der befüllten Stapelreihen (3 oder 4 Gitterboxen) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede beim Brandentwicklungsbeiwert, der dort innerhalb der Streubreite der Meßergebnisse lag.

Bezüglich des Einflusses des Zündortes stellte sich als Mittelwert aus den Vergleichen der links und in der Mitte gezündeten Anordnungen gleichwertig sowohl für Holzwolle als auch für Polystyrol als Stoßschutzmaterial ein Verhältnis

$$t_v('Z1') : t_v('Z2') = 1,06 : 1 \quad \text{ein.}$$

Dies bedeutet, daß bei Zündung links seitlich die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei sonst jeweils konstant gehaltenen Parametern geringfügig geringer als bei Zündung in der Mitte war. Dieser Einzeleinfluß war bei den hier durchgeführten Versuchen also jeweils am geringsten.

Die Auswertung zeigt im Vergleich mit den in /3/ wiedergegebenen Ergebnissen, daß die dort aufgestellte Hypothese, der Brandent-

wicklungsbeiwert könne sich in einen geometrieabhängigen und einen materialabhängigen Beiwert aufspalten lassen, nur bedingt zutrifft. Dies zeigen die für das Verhältnis  $t_v(\text{HW})/t_v(\text{PS})$  für jeweils 5 und 3 Kartons verschiedenen Werte deutlich. Dasselbe gilt für die Verhältnisse  $t_v(5)/t_v(3)$ . Hier ist Raum für weitergehende Untersuchungen.

Im Bereich der Temperaturen 18 bis 20 wurden sowohl der zeitliche Anstieg der Temperaturen als auch die jeweiligen Maximalwerte untersucht. Aufgrund des zeitlichen Abstandes  $\Delta t_a$  zwischen dem Temperaturanstieg an zwei übereinanderliegenden Temperaturmessstellen und des örtlichen Abstandes  $\Delta s$  beider Messstellen voneinander läßt sich die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront in diesem Meßabschnitt zu  $\bar{v} = \Delta s / \Delta t_a$  bestimmen. Die Ermittlung von  $\Delta t_a$  geschieht in der im Bild 4 skizzierten Weise. Es ist zunächst zu vermuten, daß aufgrund der Kaminwirkung im senkrechten Spalt zwischen zwei Stapeln eine sich nach oben beschleunigende Flammenfront einstellt. Dieses war jedoch aus den durchgeführten Auswertungen nicht zu erkennen. Hierzu sind offenbar getrennte Untersuchungen erforderlich. Die in der Aufstellung unten wiedergegebenen Werte betreffen die aus den jeweiligen Versuchen gemittelten Maximalgeschwindigkeiten der Flammenausbreitung, welche die aus den Abbrandmessungen vorgefundene Tendenz bestätigen. Demnach war  $v_{\text{max}}$  für

PS 3	2,2 m/s
PS 5	1,9 m/s
HW 3	1,6 m/s
HW 5	1,3 m/s.

Die gemessenen Geschwindigkeiten der Flammenausbreitung geben also die mit den Abbrandmessungen gefundene Staffelung wieder.

Die zugehörigen Maximaltemperaturen innerhalb des Spaltes spiegeln die Verbrennungsintensität in der Flamme wieder. Sie ergaben sich gemittelt aus den Versuchen mit jeweils gleichem Aufbau zu

PS 3	570 °C
PS 5	780 °C
HW 3	610 °C
HW 5	720 °C.

Die jeweils geringeren Temperaturwerte bei 3 Kartons pro Box resultieren offenbar aus der höheren Abstrahlung der Flammen an die Umgebung.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Brände im Lagerbereich führen aufgrund der zunehmenden Wertekonzentration und der Verwendung von Stoffen mit erhöhtem Brandrisiko zu hohen Schäden, wenn Brandmeldung und -bekämpfung nicht in angemessener Schnelligkeit erfolgen können.

Eine quantitative Bewertung des Lagerrisikos bezüglich der Geschwindigkeit der Brandausbreitung nach erfolgter Zündung ist bislang noch kaum unternommen worden. Mit der vorliegenden Arbeit werden Großbrandversuche beschrieben, mit denen die Untersuchung von Brandausbreitungsvorgängen bei in Gitterboxen gestapelten Wellpappkartons mit unterschiedlichen Füllungen weitergeführt wird. Die aus den Beobachtungen des Versuchsablaufes und aus umfangreichen Messungen gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß bezüglich der Geschwindigkeit der Brandausbreitung die Füllung der Wellpappkartons bereits in der Anfangsphase des Brandes eine entscheidende Rolle spielt, ebenso geometrische Bedingungen der lokalen Lagergutkonzentration und der Position der Zündquelle von Einfluß sind.

Der zeitliche Massenverlust läßt sich in der Brandentwicklungsphase mathematisch durch eine Exponentialfunktion beschreiben. Dabei ist bei den durchgeführten Versuchen eine eindeutige Zuordnung des Stoffeinflusses einerseits und des Geometrieinflusses andererseits auf den Abbrandverlauf möglich. Nach den bisherigen Feststellungen ist der Geometrieinfluß auf die Brandausbreitung

geringer als der Stoffeinfluß, wie im vorliegenden Bericht durch Zahlenwerte belegt wird. Ebenso macht sich der Einfluß der geometrischen Lage der Zündquelle in Bezug auf die Verteilung des Lagergutes bemerkbar, ist allerdings von geringerem Einfluß als die obengenannten Parameter.

Bezüglich der Temperatúrauswertung wurden die Versuchsbeobachtungen bestätigt. Eine eindeutige Zunahme der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit im senkrechten Spalt zwischen zwei Stapeln in Abhängigkeit von der Höhe, wie aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu erwarten, konnte mit den Messungen nicht nachvollzogen werden. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

## 6. FORMELZEICHEN

$\Delta M$	Abbrandmasse in g
$M_0$	Masse zum Zeitpunkt $t_0$
$f_{Be}$	Beiwert für die Brandentwicklung in $\text{min}^{-1}$
$\bar{f}_{Be}$	Arithmetisches Mittel des Beiwertes für die Brandentwicklung aus mehreren Versuchen in $\text{min}^{-1}$
$\Delta s$	vertikaler Abstand zwischen zwei Thermoelementpositionen in m
$t$	Zeit in s
$\Delta t_a$	Zeitdifferenz bezüglich des Temperaturanstiegs zweier Meßkurven in s
$t_1$	Ansprechzeitpunkt des Auslöseelementes des Sprinklers, Zeitpunkt des Beginns des Löscheinsatzes in s
$t_v$	Verdoppelungszeit in s
$\bar{t}_v$	$60 \times 0,693 / \bar{f}_{Be}$ ; mittlere Verdoppelungszeit in s
$t_0$	Zeitpunkt, bei dem $\Delta M = M_0 = 1 \text{ kg}$
$v_{\max}$	Maximale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in m/s
$\bar{v}$	Mittlere Flammenausbreitungsgeschwindigkeit zwischen zwei Thermoelementen in m/s

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Hinrichs, H.G.: Versicherung von Lägern.  
Vortrag am 27.3.1987 bei der Technischen Akademie Esslingen im Rahmen des Lehrgangs "Baulicher Brandschutz".
- /2/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 1: Literaturlauswertung.  
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /3/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 2: Großbrandversuche 1.  
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986)

Tabelle: Abbranddaten von Brandversuchen

Geometrie	HW3						PS3									
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Zündort Z1	x															
Zündort Z2					x									x		
Anzahl Stapel 4																
Anzahl Stapel 3	x															
Versuch Nr.	48	50	14	20	24	34	35	38	47	49	10	25	29	33	36	39
$f_{Be}$ in $min^{-1}$	0,51	0,33	0,42	0,54	0,31	0,42	0,51	0,46	0,64	0,57	0,69	0,44	0,74	0,55	0,57	0,54
$t_v$ in s	82	126	99	77	134	99	81	90	65	73	60	95	56	76	73	77
$\bar{f}_{Be}$ in $min^{-1}$			0,422				0,463			0,585				0,600		
$t_v$ in s			99				90			71				69		

Geometrie	HW5						PS5									
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Zündort Z1	x															
Zündort Z2						x										x
Anzahl Stapel 4																
Anzahl Stapel 3	x															
Versuch Nr.	54	44	8	15	18	30	32	53	45	16	20		28	37	52	
$f_{Be}$ in $min^{-1}$	0,37	0,36	0,30	0,33	0,41	0,32	0,40	0,37	0,59	0,65	0,36		0,60	0,57	0,60	
$t_v$ in s	112	116	139	126	101	130	104	112	70	64	116		69	73	69	
$\bar{f}_{Be}$ in $min^{-1}$			0,354				0,363			0,53				0,59		
$t_v$ in s			117				115			78				70		

Maße in cm

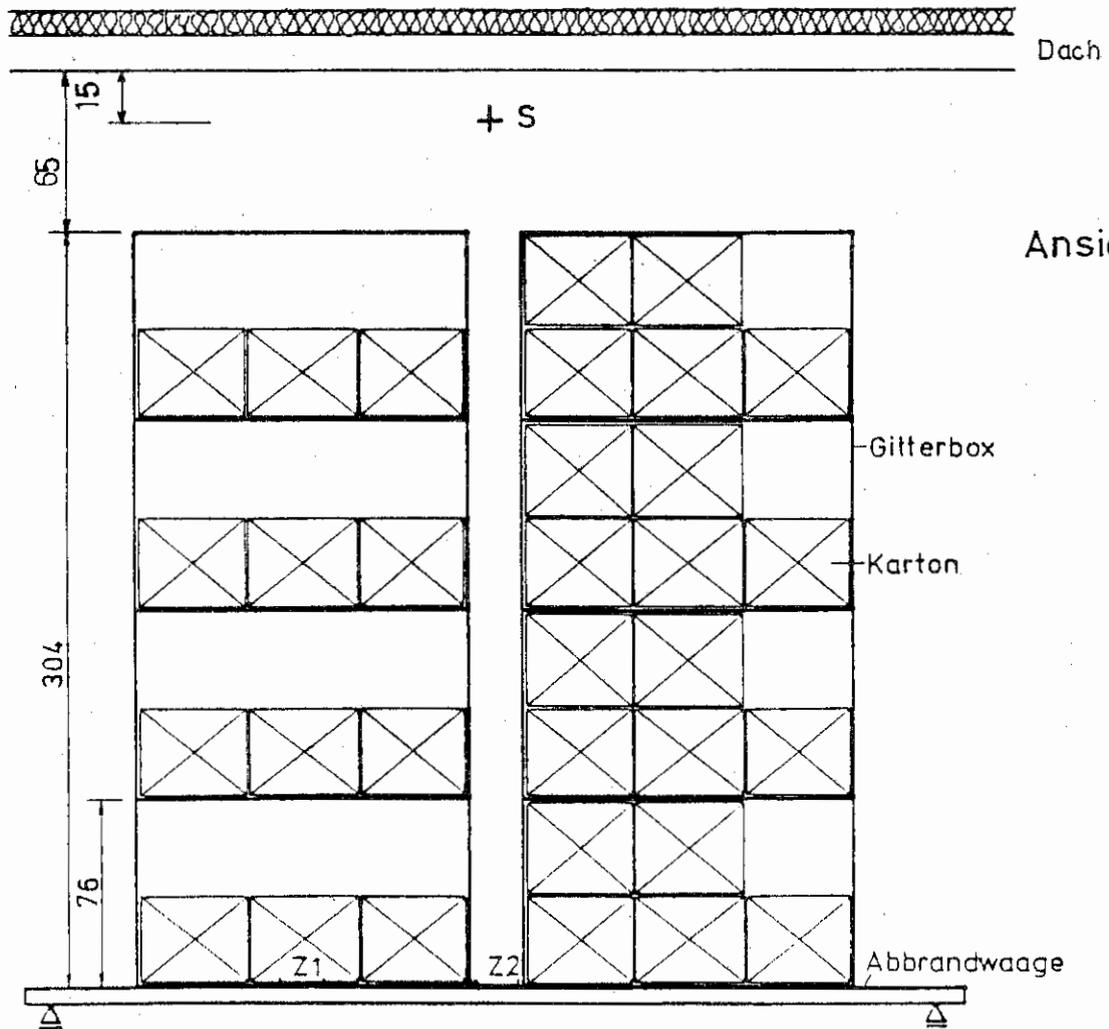
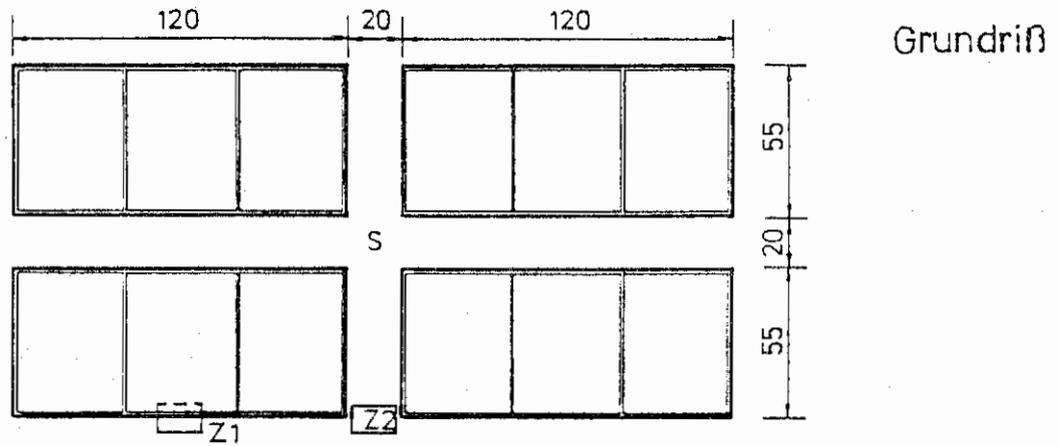


Bild 1 Grundriß und Ansicht des Versuchsaufbaus für 3 Kartons (links) bzw. 5 Kartons (rechts) pro Gitterbox.

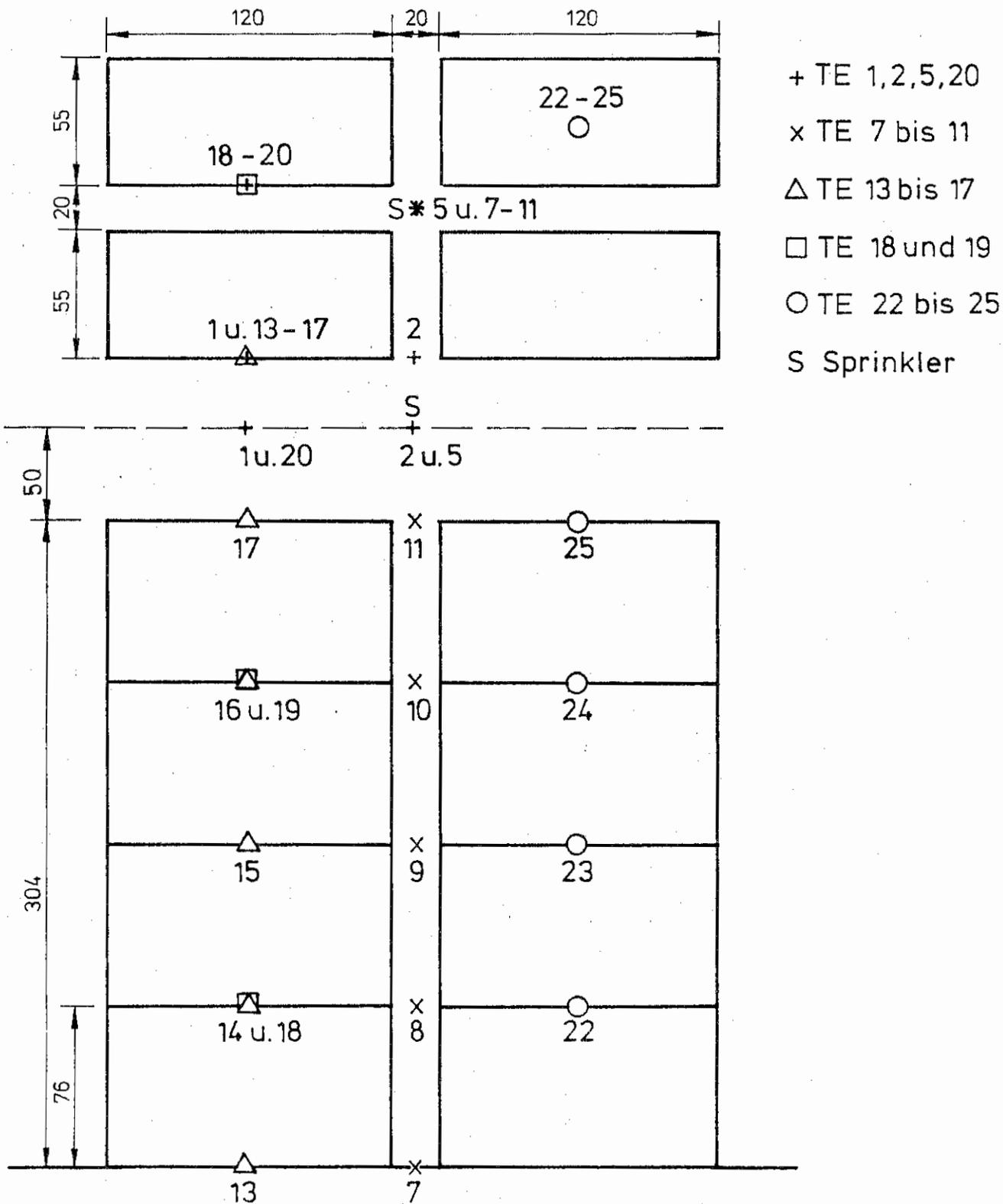


Bild 2 Verteilung der Temperaturmeßstellen bei Zündung der Brandlast an der Stelle Z1.

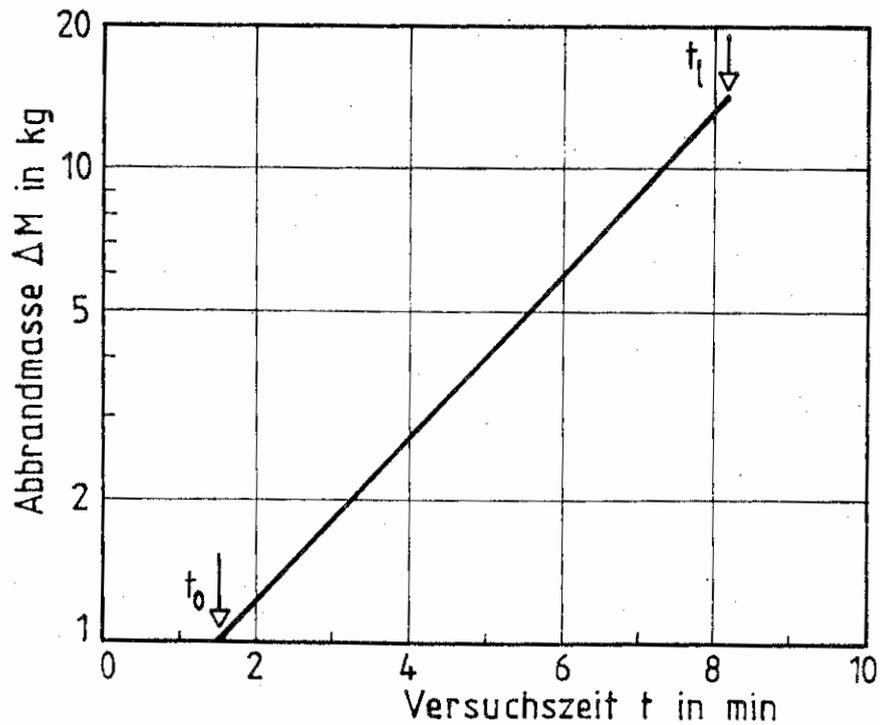
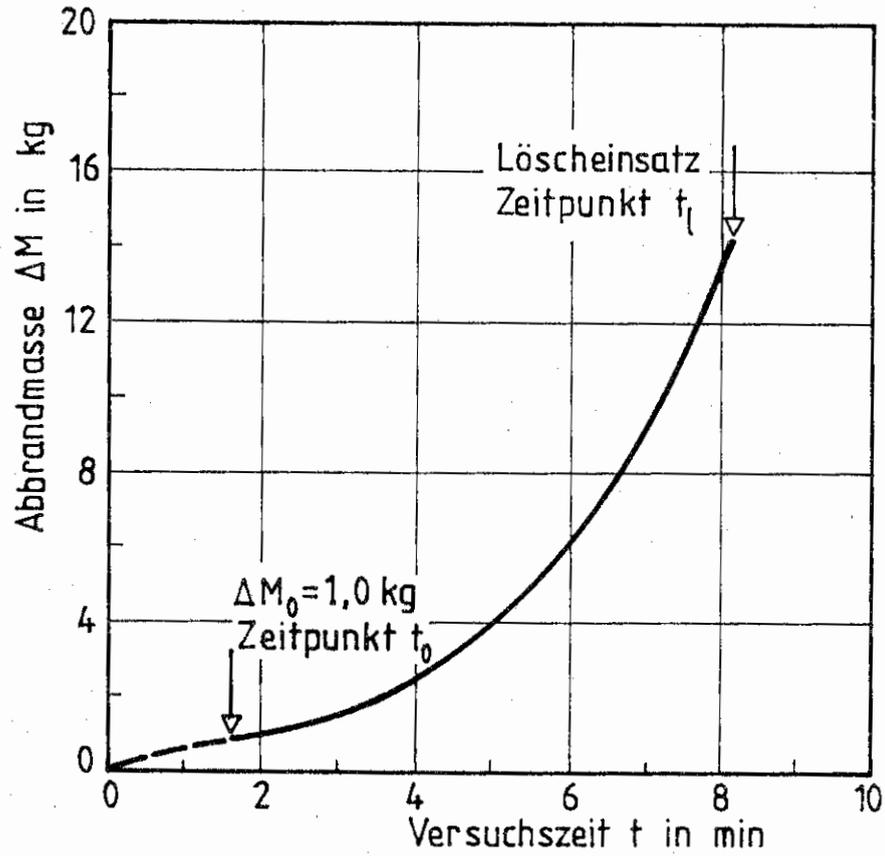


Bild 3 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse in lin-lin-Darstellung (oberes Diagramm) und log-lin-Darstellung (unteres Diagramm). Beispiel: Versuch 18.

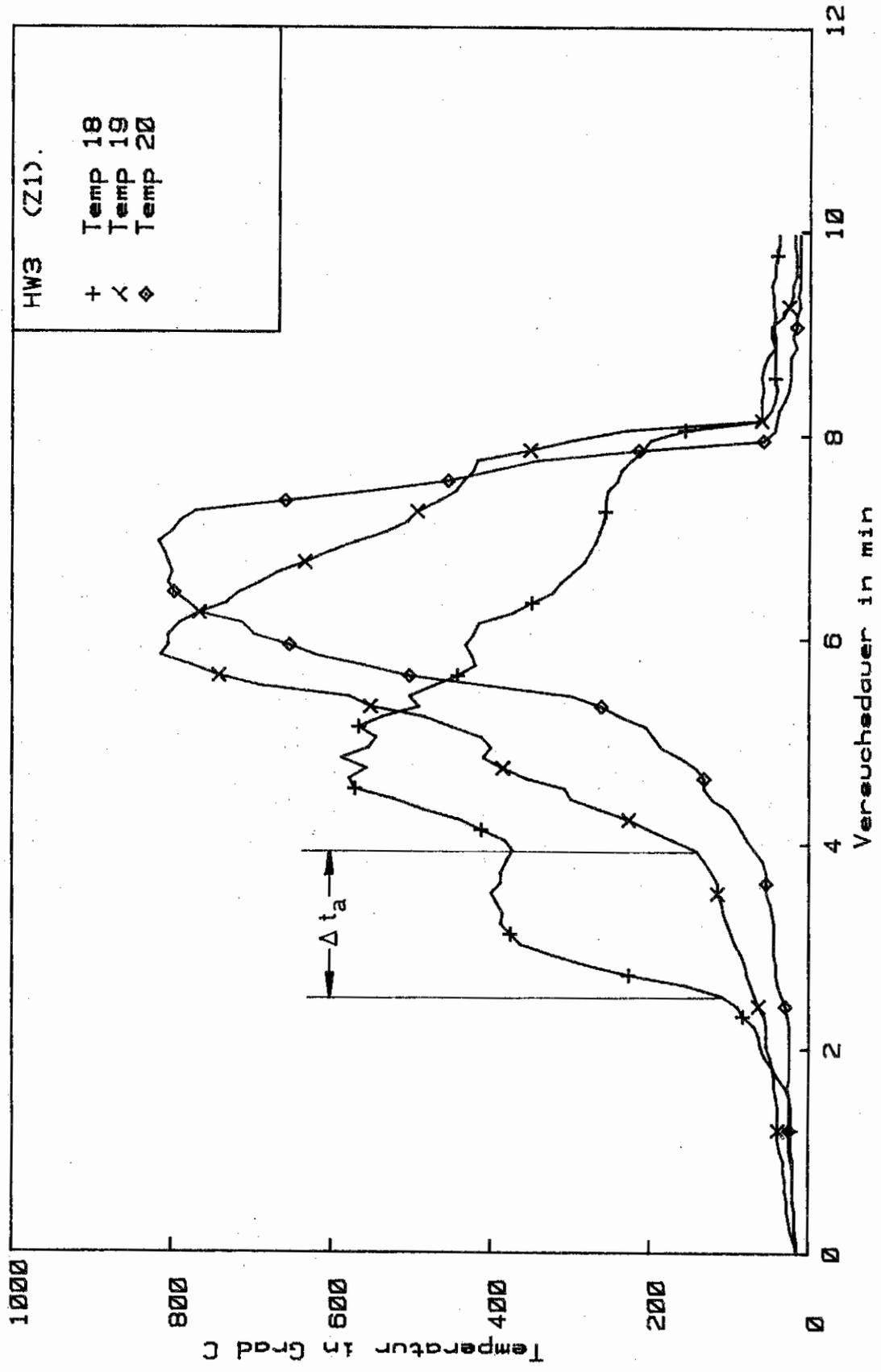


Bild 4 Beispiel des zeitlichen Temperaturverlaufes an den Meßstellen 18, 19 und 20 (Versuch 14).  
 Ermittlung des zeitlichen Abstandes  $\Delta t_a$ .