

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil 2: Großbrandversuche 1

58

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

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

Forschungsbericht Nr. 58

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 2: Großbrandversuche 1

von
Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
November 1986

FA.Nr. 105(4/84)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. VERSUCHSPROGRAMM	2
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	5
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN	7
5. MESSERGEBNISSE - Abbrandmasse und Wärmefreisetzung	10
6. ZUSAMMENFASSUNG	22
7. FORMELZEICHEN	24
8. LITERATURVERZEICHNIS	26
9. TABELLEN UND BILDER	28

1. EINLEITUNG

Das Brandausbreitungsrisiko in Lägern hat in der Vergangenheit allgemein stark zugenommen, da die Wertekonzentrationen erhöht wurden und allgemein 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.

Für die Ausbreitung eines Brandes sind viele Parameter maßgebend, deren wesentliche in der Tabelle 1 zusammengestellt sind. 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, andere, wie die gesamte zur Verfügung stehende Masse oder die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung aus den bereits gezündeten Brandstoffen beeinflussen die Brandweiterleitung nach erfolgter Zündung der ersten Gegenstände.

Die quantitativen Auswirkungen einer Veränderung einzelner dieser Parameter sind bis heute noch 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, wenn, auf diesen Grundlagen basierend, zum Beispiel eine ortsfeste Löschanlage konzipiert werden soll. Deshalb werden 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 an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) damit begonnen, die Brandausbreitungsvorgänge, auch

in ihrer Auswirkung auf ortsfeste Brandmelde- und Löschanlagen, systematisch zu untersuchen. Die bisher bekanntgewordenen, besonders bei Forschungsinstituten im Ausland durchgeführten Untersuchungen zum Abbrandverhalten von gelagerten Stoffen in Regalstapellageranordnung wurden vom Verfasser in einer Literaturübersicht /1/ zusammengefaßt.

Betrachtet man die hohen Kosten, mit denen realitätsnahe Brandversuche verbunden sind, dann wird deutlich, daß man sich damit befassen muß, wie die Brandausbreitung berechenbar gemacht werden kann, wobei man eine Simulierung auf im Labor meßbare Stoffwerte gründen können muß. Die Arbeiten hierzu sind allerdings international noch wenig entwickelt, auch stehen nur vergleichsweise wenige Daten zur Überprüfung von zu entwickelnden Theorien zur Verfügung. Um den Einfluß einiger der in der Tabelle 1 dargestellten Parameter näher zu beleuchten, sind somit weiterhin Vergleichsuntersuchungen im realen Maßstab notwendig. Der folgende Bericht beschreibt Großbrandversuche, mit denen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsvorhabens, das in enger Zusammenarbeit mit dem Vorhaben "Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen" durchgeführt wird, begonnen wurde.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Bei der Definition des Versuchsprogramms waren zunächst einige grundsätzliche Fragen zu klären. Diese betrafen die zu verwendende Umverpackung, das Lagergut, das Füllmaterial, die geometrische Anordnung der Gegenstände zueinander, die Lage und Größe der Zündquelle sowie die Aussagen, die aus der Messung von Größen, wie dem zeitlichen Temperaturverlauf an verschiedenen Stellen in der Brandlast oder dem zeitlichen Verlauf des Massenverlustes durch Abbrand beim Brandversuch, hergeleitet werden können. Schließlich war eine Wahl bezüglich der Lagerart dergestalt zu treffen, daß

einerseits eine an der Praxis gemessen häufig vorhandene Lagerart, andererseits aber auch eine bezüglich einer großen Variationsbreite für die geometrischen Parameter günstige Lagerart gefunden wurde. Hierfür bietet sich die Regallagerkonstruktion an, weil durch die mögliche Wahl der Abstände von einem Stapel zum darüberliegenden für den Versuchsbetrieb viele Zustände eingestellt werden können. Dies im Gegensatz etwa zum Blocklager, bei dem innerhalb der vorgegebenen Abmessungen des Versuchstandes nur Horizontalabstände und die Gesamthöhe, nicht aber Vertikalabstände veränderbar sind, sodaß Aussagen über die Brandausbreitung in alle Raumrichtungen nur eingeschränkt erfolgen können. Brandtechnisch gesehen wäre also das Blocklager ein Sonderfall des Regallagers. Auch wegen der Meßtechnik sprachen einige Gründe für die Wahl eines Regallageraufbaus. Dies ist in erster Linie die Tatsache, daß bei entsprechender Konstruktion kaum mit einem Zusammenfallen des gelagerten Gutes zu rechnen ist, daß also in die Regalanordnung eingebrachte Meßfühler über die Dauer des Brandversuches ihre Position beibehalten. Im Gegensatz hierzu steht das Blocklager, bei dem im fortgeschrittenen Stadium des Brandes mit einem Zusammenfallen der Stoffe gerechnet werden muß, sodaß die eingebauten Meßfühler gegebenenfalls ihre Relativposition zum Lagergut verändern und damit Meßergebnisse nicht weiter zur Auswertung herangezogen werden können.

Um bezüglich des Lagergutes eine zu große Variationsbreite für die erste Serie von 30 Versuchen zu vermeiden, wurden leere Stahlblechkanister mit einem Volumen von 30 l gewählt, die von einlagigen Wellpappkartons als Umverpackung umhüllt wurden. Die Abmessungen des einzelnen Wellpappkartons betragen 52 cm * 38 cm * 34 cm. Der zwischen den Stahlblechkanistern und der Kartoninnenseite verbleibende Zwischenraum von 3 cm bis 5 cm wurde in einem Teil der Versuche mit Holzwolle, in einem anderen Teil mit schwerentflammbaren Polystyrolschaumwürfeln ausgefüllt, um die Unterschiede des Brandverhaltens zweier der am häufigsten verwendeten Stoßschutzmittel zu beurteilen. Für die Zukunft sind Untersuchungen mit

einem weiteren inneren Stoßschutz geplant, nämlich schwerentflammbarem Polyurethan-Verpackungsschaum.

Bezüglich der Anordnung der Wellpappkartons im Lager wurden zwei Varianten untersucht. Bei der einen Variante wurde ein großer Abstand von einer Kartonlage zur in der nächsten Regalebene liegenden vorgesehen, bei der anderen Variante wurde der Abstand so klein wie möglich gewählt. Maßangaben hierzu können dem folgenden Abschnitt entnommen werden.

Eine weitere Entscheidung betraf die Auswahl der geeigneten Zündquelle, und zwar einerseits in Bezug auf die zur Verfügung gestellte Wärmeenergie und andererseits in Bezug auf den Ort innerhalb der Lageranordnung. Wegen der begrenzten Höhe des Versuchsraumes und der Lageranordnung war es notwendig, zunächst einen vom Boden ausgehenden Brand zu untersuchen. Deshalb wurde die Zündquelle auch am Boden angeordnet. Außerdem schien es nicht sinnvoll zu sein, die Größe der Zündquelle relativ zum Lagergut zu groß zu wählen, um nicht das Brandverhalten des Lagergutes in der Entstehungsphase zu sehr vom Brandverhalten der Zündquelle überlagern zu lassen. Um den Einfluß der Position der Zündquelle innerhalb der Lageranordnung auf den Ansprechzeitpunkt von oberhalb der Lagerung vorhandenen ortsfesten Brandmelde- und Löscheinrichtungen zu untersuchen, wurde eine Entscheidung für zwei verschiedene Positionen der Zündquelle getroffen. Diese Stellen sind im Bild 1 wiedergegeben und dort mit 'Z1' bzw. 'Z2' bezeichnet.

3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Für die Durchführung der Brandversuche im Realmaßstab wurde ein Versuchsstand in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik errichtet, der im Detail bei Schatz /2/ beschrieben ist. Wie in der Einleitung erwähnt wurde, werden die Versuche zusammen mit den Arbeiten zur Untersuchung des Löscheinsatzes an gelagerten Stoffen durchgeführt. Daher ist der Versuchsstand mit einer ortsfesten Löschanlage ausgestattet, die im Bild 2 in die Skizze des Versuchsstandes eingezeichnet ist. Weiterhin ist die Abbrandwaage mit den Grundflächenabmessungen 4 m * 4 m erkennbar, auf welche, nach Wegnahme der eingezeichneten Auffangwannen und Stellen dieser Wannen unter den aus einem Gitterrost bestehenden Waagenboden zum Aufsammeln des Löschwassers, die Regalanordnung nach Bild 1 gestellt wird.

Aus Gründen eines leicht variierbaren Aufbaus wurden für die Errichtung der Regalanordnung Gitterboxen verwendet, die zu je vier in der Fläche und vier übereinander aufgestellt wurden. Im Bild 1 ist die Versuchsanordnung des Regalaufbaus im Grund- und Aufriß dargestellt. In diese Gitterboxen werden die Wellpappkartons eingesetzt. Im Bild 1 ist ebenfalls die Anordnung dieser Kartons in der Box wiedergegeben, und zwar in der linken Bildhälfte für den Fall der großen Luftzwischenräume, in der rechten Bildhälfte für den Fall der geringen Luftzwischenräume. 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. Die Untersuchung dieses Einflusses stellt daher eine weiterführende Aufgabe für dieses Forschungsvorhaben dar. 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 /1/ näher eingegangen.

Die gewählte Zündquelle bestand aus 50 g Holzwolle, die mit 100 ml Brennspritus getränkt wurde. Das Ganze befand sich in einer kleinen Stahlblechwanne mit den Abmessungen 15 cm * 10 cm * 1 cm (Länge * Breite * Höhe).

Zusätzlich wurde gegenüber der Rückseite der Regalanordnung im Abstand von 50 cm zu dieser eine Wellpappattrappe aufgestellt, um die Brandübertragung auf benachbarte Stapel zu untersuchen.

Oberhalb der Regalanordnung befanden sich außer den Bauteilen der Löschanlage verschiedene Brandmeldertypen, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die Meßtechnik umfaßt die Messung des Massenverlustes der Brandlast infolge der Verbrennung mit der obengenannten Abbrandwaage und die Messung zeitlicher Temperaturverläufe an zahlreichen Meßstellen im Lagerbereich mittels Mantelthermoelementen, aus denen auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Im Bild 3 ist die Verteilung der Thermoelemente für den Fall seitlicher Zündung (an der Stelle 'Z1') wiedergegeben. Die von den Thermoelementen abgegebene Meßspannung wird zusammen mit dem Meßsignal der Waage und anderen Meßgrößen, wie der Spannung aus den in die Attrappe eingebrachten Gesamtwärme-flußaufnehmern oder den Signalen aus den oberhalb der Versuchsanordnung angebrachten Brandmeldern und der Rauchdichtemeßstrecke von einer Personalcomputer-gesteuerten Datenerfassungsanlage registriert. Mit Hilfe dieses Rechners werden die Daten nach dem Versuch ausgewertet.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSBEOBACHTUNGEN

Die Ausbreitung der Flammen über die Umverpackung und in die Füllstoffe nach Zündung der Zündquelle war solange möglich, 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 des Brandablaufes sind einige allgemeingültige Angaben über das Eintreten einzelner Ereignisse vor dem Ansprechen des eingebauten Sprinklers möglich. Diese Ereignisse waren abhängig von den variierten Parametern Kartonverteilung, Ort der Zündquelle und Art des eingesetzten Füllmaterials. Bei den folgenden Angaben ist zu bedenken, daß die Brandgase frei nach oben abströmen konnten, weil sich direkt oberhalb des Sprinklers keine Decke oder ein Dach befand, bei dem sich eine Staupunktströmung hätte ausbilden können, um einen zusätzlichen Einfluß auf die Brandausbreitung und vor allem auf den Zeitpunkt des Ansprechens des Auslöseelements auszuüben. Über die Beeinflussung der Brandausbreitung durch ein Dach ist anzunehmen, daß nach der ersten vertikalen Ausbreitungsphase vermutlich die horizontale Ausbreitung in der obersten Stapellage rascher vor sich gegangen wäre als ohne Decke und daß das Auslöseelement infolge der Bildung einer gestauten warmen Rauchgasschicht unterhalb der Dachfläche ebenfalls rascher angesprochen hätte.

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', also "vorne links", hatte zur Folge, daß bei der Anordnung mit drei Kartons in jeder Gitterbox die horizontale Ausbreitung des Brandes bevorzugt in

Richtung des hinter dem gezündeten Stapel stehenden Stapels erfolgte. In einigen Fällen wurde auch die hinter diesem Stapel angeordnete Attrappe aus Wellpappe durch Wärmestrahlung großflächig gezündet, bevor der Sprinkler ansprach. Die horizontale Ausbreitung in Richtung des rechts der Zündquelle aufgebauten, dem gezündeten Stapel benachbarten Stapel erfolgte vergleichsweise langsam. Bei vorhandenen fünf Kartons pro Gitterbox lief die Brandausbreitung in horizontaler Richtung so langsam ab, daß es vor dem Ansprechen des Sprinklers zu keiner Zündung der Attrappe kam.

Bei Lage der Zündquelle an der Stelle 'Z2', also "vorne Mitte", wurde ein symmetrisch gleichmäßiges Anbrennen und verständlicherweise 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 nur sehr langsam. Bei dieser Art der Zündung sprach der Sprinkler stets vor der Zündung der Attrappe an.

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 kann vermutlich seine Ursache in dem Rückstandsgerüst haben, das die Holzwolle bildet und eine 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. In der Anfangsphase kam es allerdings auch vor, daß die dem Füllstoff zugeführte Wärme so gering war, daß ein Teil des geschmolzenen Materials ohne zu brennen abtropfte.

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 nach Zündung an der Stelle 'Z1' brannte, ließ die Rauchentwicklung sichtbar nach und die Flammen hatten ein heller leuchtendes Erscheinungsbild als bei der Verwendung von Holzwolle als Füllstoff.

Bezüglich der Löscheigenschaften zeigte sich, daß bei der Verwendung von Holzwolle die tiefsitzende Glut innerhalb der Holzwoollereste, die sich zwischen noch nicht verbranntem Karton und Behälter befanden, nachteilig auf den Löscherfolg auswirkte, da vom noch intakten Karton das Löschwasser abgehalten wurde. Dennoch war noch freier Luftzutritt möglich, sodaß sich die mit Holzwolle gefüllten Kartons verschiedentlich partiell wieder entzündeten. Ebenso entstand durch diesen Vorgang mehr Wasserdampf als bei der Verwendung des anderen Füllstoffes, bei dem Glimmvorgänge nicht auftreten.

5. MESSERGERBNISSSE - Abbrandmasse und Wärmefreisetzung

Während der Verbrennung des Lagergutes nimmt dessen Masse ab. Die zeitliche Änderung dieser Masse wird mit der Abbrandwaage bestimmt und der zugehörige Meßwert mit der Datenerfassungsanlage kontinuierlich registriert. Dabei ist die Abbrandmasse ΔM als die Differenz zwischen der Anfangsmasse M_a und der Masse M des Lagergutes zum Zeitpunkt t definiert, also

$$\Delta M = M_a - M(t) \quad . \quad (1)$$

Der zeitliche Massenverlust, auch als Abbrandgeschwindigkeit bezeichnet und nicht mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront zu verwechseln, ist demnach

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = - \frac{dM}{dt} = - \dot{M} \quad . \quad (2)$$

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

Im Rahmen dieser Untersuchungen hat die Bestimmung des zeitlichen Massenverlustes zwei Gründe, die durch die Aufgabenstellung vorgegeben sind. 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 Wärmefreisetzung sein kann, die abhängig 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 zeitliche Verlauf der Abbrandmasse soll an einem beliebig aus den hier durchgeführten Versuchen herausgegriffenen Kurvenverlauf erläutert werden. Im Bild 4 ist die gesamte bis zum Zeitpunkt t_1 verbrannte Masse über der Versuchszeit t aufgetragen. Man erkennt, daß die Abbrandmasse ΔM als Folge der Flammenausbreitung mit der Zeit langsam ansteigt. Die Flammen breiten sich dabei in der unmittelbar an die Zündung anschließenden Phase über die Kartonoberflächen aus, bis der Karton nach innen durchgebrannt ist und damit auch der Inhalt zu brennen beginnt. Hierbei sind nach kurzer Zeit die Ausbreitung über die Kartonoberfläche und die Einbeziehung des eigentlichen Lagergutes bezüglich ihres Einflusses auf den Verlauf der Meßkurve nicht mehr zu trennen. Eine Trennung beider Vorgänge wäre nur möglich, wenn eine Versuchsreihe mit Kartons mit nichtbrennbarer Füllung als Nullversuch durchgeführt würde, sodaß man, einige zusätzliche vereinfachende Annahmen vorausgesetzt, durch die Subtraktion beider Meßkurven den Einfluß des jeweiligen Inhalts für eine bestimmte Art der Umverpackung ermitteln könnte. Vergleicht man also zwei Versuche mit identischer geometrischer Anordnung und gleicher Größe und Position der Zündquelle, aber unterschiedlichen Kartoninhalten, dann kann das Ergebnis nur die Unterschiede im Brandverhalten der jeweiligen Gesamtheit wiedergeben. Im Bild 4 ist an einer mit 'A' bezeichneten Stelle der Zeitpunkt markiert, an dem das Auslöseelement des oberhalb der Lageranordnung installierten Sprinklers, ein Glasfäßchen mit einer Nennauslösetemperatur von 68°C , angesprochen hat.

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 Bauteile belastet werden. Die Berechnung des Wärmestroms aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse bereitet jedoch bei zusammengesetzten Brandlasten der vorliegenden Art Schwierigkeiten, wie im folgenden begründet wird.

Der Zusammenhang zwischen der in der Zeiteinheit freigesetzten Wärmemenge, d.h. dem Wärmestrom \dot{Q} und dem zeitlichen Massenverlust $-\dot{M}$ lautet für einen homogenen Stoff bei vollständiger, also stöchiometrisch oder unter Luftüberschuß ablaufender Verbrennung, d.h. bei Ausnutzung des gesamten zur Verfügung stehenden Heizwertes H_u ,

$$\dot{Q} = -\dot{M} H_u \quad (3)$$

Wenn mehrere Stoffe gleichzeitig beteiligt sind, erhält man den Wärmestrom \dot{Q} zu:

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i = - \sum_{i=1}^n \dot{M}_i H_{u,i} \quad (4)$$

also aus der Summe der von jedem Stoff alleine freigesetzten Wärmeströme.

Das erste, bereits genannte Problem ist dabei die Bestimmung des jeweiligen Massenstroms \dot{M}_i , das zweite, wie weiter unten aufgeführt, der Heizwert $H_{u,i}$. Zwar ist in der Anfangsphase des Brandes einer aus 2 Stoffen bestehenden Brandlast, als Beispiel Wellpappkarton (Stoff 1) und Stoßschutzmaterial (Stoff 2), zunächst nur der Karton entsprechend den oben gemachten Angaben in das Brandgeschehen einbezogen, also

$$\dot{Q} = -\dot{M}_1 H_{u,1} \quad (5)$$

da $\dot{M}_2 = 0$. Bei weiterem Andauern des Brandes aber erhält \dot{M}_2 einen endlichen Wert. Da mittels der Abbrandwaage aber nur die Summe aus \dot{M}_1 und \dot{M}_2 , d.h. \dot{M} , bestimmt werden kann, ist es erforderlich, einen Schätzwert für H_u anzugeben, der für den gesamten

Brandablauf Gültigkeit besitzt. Man kann einen solchen Schätzwert unter Verwendung eines gewichteten Heizwertes \bar{H}_u angeben. Die Bestimmungsgleichung lautet für den allgemeinen Fall von n Stoffen

$$\dot{Q} = - \dot{M} \bar{H}_u \quad , \quad (6)$$

wobei der gewichtete Heizwert \bar{H}_u in dem entsprechenden, vom Brand betroffenen Lagerabschnitt wie folgt zu bestimmen ist:

$$\bar{H}_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i H_{u,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n P_i H_{u,i} \quad . \quad (7)$$

Die in physikalisch-chemischen Tabellenwerken angegebenen $H_{u,i}$ -Werte sind allerdings von der Prüfapparatur abhängig, in der sie ermittelt wurden, wobei für die Verbrennung eines Probekörpers im Gegensatz zum Brandfall nur reiner Sauerstoff verwendet wird. In der Praxis werden diese Tabellenwerte nicht realisiert, weil aus verschiedenen Gründen keine vollständige Verbrennung abläuft. Die Gründe sind im einzelnen: Rußbildung, Einfluß flammhemmender Zusätze auf die Verbrennung, Sauerstoffmangel und nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe. Somit ergibt sich eine geringere freigesetzte Wärmemenge Q_{eff} und damit ein geringer Wärmestrom \dot{Q}_{eff} :

$$\dot{Q}_{\text{eff}} = - \dot{M} \bar{H}_{u,\text{eff}} \quad , \quad (8)$$

mit $\bar{H}_{u,\text{eff}}$ als dem effektiv umgesetzten Heizwert. Dieser effektive Heizwert $\bar{H}_{u,\text{eff}}$ ist somit um einen nachstehend benannten Faktor k_f , der ein Maß für die Vollständigkeit der Verbrennung ist, kleiner als der theoretische Heizwert \bar{H}_u :

$$k_f = \bar{H}_{u,\text{eff}} / \bar{H}_u \quad (9)$$

Der Korrekturfaktor k_f ist dabei eine zeitlich veränderliche Größe, insbesondere in der Brandentstehungs- und frühen Ausbreitungsphase. Sobald der Brand in eine quasi-stationäre Phase eingetreten ist, verändert sich dieser Wert in weit geringerem Maße als in der Brandentstehungsphase. Hinweise darauf sind bei You und Kung /3/ zu finden. Für die Phase des stationären Abbrandes gibt de Ris /4/ für Brände von verschiedenen Kunststoffen in waagrecht aufgestellten Wannen für eine dem hier verwendeten Faktor k_f entsprechende Größe Werte von 57 % bis 100 % an, je nach Material, wobei Werte kleiner als 100 % im wesentlichen mit der Rußbildung zusammenhängen. Wenn auch die Brandstoffe bezüglich Material und Anordnung mit dem hier verwendeten Versuchsmaterial und -aufbau nicht vergleichbar sind, so läßt sich doch abschätzen, in welchem Rahmen \bar{H}_u abzumindern ist.

Der freigesetzte Wärmestrom \dot{Q}_{eff} steht aufgrund seiner Aufspaltung in Anteile, die durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion aus der Flamme an das bereits brennende Brandgut, durch Strahlung an die Umgebung und durch infolge freier Konvektion entgegen dem Schwerefeld abströmende Wärme abgegeben werden, nur zum Teil für die Aufheizung der in der Nähe der bereits brennenden Partien befindlichen, noch nicht gezündeten Bereiche des Lagergutes zur Verfügung, wie aus der Gesamtwärmebilanz folgt.

Allerdings ist die Aufteilung des Wärmestroms in die genannten Anteile für den hier vorliegenden Fall meßtechnisch noch nicht vollständig untersucht worden. Teilansätze hierzu sind bei Lee /5/ und bei You und Kung /3/ beschrieben. Bei dem Meßverfahren von Lee /5/ werden die aufsteigenden Brandgase in einem oberhalb des Versuchsstandes befindlichen, großen, umgestülpten "Trichter" gesammelt und einer Meßstrecke zugeführt, in der die Temperatur des Rauchgasstromes, seine Geschwindigkeit und die Gaszusammensetzung bestimmt werden. Aus der Beziehung

$$\dot{Q}_f = \rho c_p \bar{u} F (T - T_\infty) \quad (10)$$

kann der oberhalb der Stapel auftretende, fühlbare Wärmestrom \dot{Q}_f bestimmt werden. Die in der Gl. (10) angegebenen Werte ρ , c_p , \bar{u} und T sind die entsprechenden Werte des Rauchgases. Diese Vorgehensweise setzt voraus, daß keine offenen Flammen an der Meßstelle in der Rauchgassammelleitung vorhanden sind und auch weitere Wärmestrahlungseinflüsse auf die Temperaturmessung ausgeschlossen werden können. Die zusätzliche Messung der Gaskonzentrationen ermöglicht die Bestimmung desjenigen Anteils der Zersetzungsgase, der vollständig verbrannt ist, wieder unter der oben getroffenen Annahme, daß an der Meßstelle keine Reaktion mehr stattfindet. Dann ist \dot{Q}_f auch gleich dem durch Verbrennung freigesetzten Wärmestrom \dot{Q}_{eff} abzüglich der obengenannten Verluste.

Aus der Gesamtwärmebilanz ergibt sich, daß bei der Aufteilung des durch die Verbrennung von Zersetzungsgasen freiwerdenden Wärmestroms \dot{Q}_{eff} in die obengenannten Anteile der Wärmestrom Q_z zu berücksichtigen ist,

$$\dot{Q}_{eff} = \dot{Q}_{str} + \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_z + \dot{Q}_f \quad , \quad (11)$$

der dem Material zugeführt werden muß, damit durch Wärmeeinwirkung brennbare Zersetzungsgase entstehen können. Die Größe \dot{Q}_z ist dabei der Netto-Wärmestrom von der Flamme an das Brandgut und ist definiert als

$$\dot{Q}_z = - \dot{M} L \quad , \quad (12)$$

mit L als dem zur vollständigen Zersetzung vom jeweiligen Stoff abhängigen notwendigen Betrag der Verdampfungs- bzw. Zersetzungsenthalpie in J/g. Je nach der Geometrie und der Richtung der Flammenausbreitung sind in \dot{Q}_z Wärmeströme enthalten, die durch Leitung, Strahlung und Konvektion die zur Freisetzung des Zersetzungsgasmassenstromes \dot{M} nötige spezifische Wärme L an das Brandgut übertragen, abzüglich der von der Brandgutoberfläche abgegebenen Wärmestrahlung.

Die angegebenen Beziehungen machen deutlich, daß alleine über eine Abbrandmessung und die Angabe eines mittleren Heizwertes der in den Brand einbezogenen Stoffe (Gln. (6) und (7)) keine exakte Aussage über die beim Brand entstehende Wärmefreisetzung möglich ist. You und Kung /3/ geben aufgrund ihrer Messungen des fühlbaren Wärmestroms oberhalb brennender Lagerstapel an, daß je nach verwendetem Lagergut und geometrischer Anordnung, ca. 35 % bis 50 % des theoretischen Heizwertes zu \dot{Q}_f umgesetzt wurden.

Die Kenntnis der anzutreffenden Wärmeströme aber, die oberhalb des brennenden Lagergutes das Ansprechen von thermisch wirkenden Auslöseelementen einer Löschanlage bestimmen und die auf Decken oder Dächer von Lagergebäuden von unten einwirken, ist für Fragen der Auslegung dieser Elemente und der Bauteile wünschenswert.

Für eine erste grobe Abschätzung werden deshalb mit Vorbehalt und im Bewußtsein der obengenannten Einschränkungen in der Folge neben dem gemessenen Massenstrom Wärmeströme angegeben. Hierzu werden zunächst die bei den Brandversuchen bisher verwendeten Stoffe und deren Heizwerte sowie die Gewichtsanteile beim Versuchsaufbau der Tabelle 2 entnommen. Setzt man die Zahlenwerte der Tabelle 2 in die Gleichung (7) ein, so erhält man für den Versuchsaufbau Karton mit Holzwolle einen Wert $\bar{H}_u = 15,3 \text{ MJ/kg}$, für den Versuchsaufbau Karton mit Polystyrolchips einen Wert $\bar{H}_u = 21,9 \text{ MJ/kg}$. Wie aus der Tabelle 2 ersichtlich ist, liegen die Heizwerte der für die erstgenannte Brandlast verwendeten Stoffe nahe beieinander, sodaß bereits ab der ersten Brandphase, wo nur der Karton brannte, die Verwendung von \bar{H}_u gerechtfertigt erscheint. Bei der zweitgenannten Brandlast wird hingegen in der Anfangsphase, wenn man durchgehend \bar{H}_u zur Berechnung der Wärmefreisetzung verwenden will, die genannte freigesetzte Wärme einen höheren Wert ergeben, als es der Realität entspricht. Dort ist im Grunde die Verwendung des obengenannten Wertes für \bar{H}_u erst in einer späteren Phase der Brandausbreitung zulässig.

Um die erforderlichen Abminderungen bei der Berechnung der Wärmefreisetzung nach Gl. (6) zu berücksichtigen, wird aufgrund der vorgenannten Angaben in der Literatur bei You und Kung /3/ und de Ris /4/ angenommen, daß ca. 50 % des theoretischen Wärmestroms das Lagergut verlassen. Für die Versuche mit Kartons und Holzwolle als Brandgut wird also gesetzt:

$$\dot{Q}_f = - \dot{M} \cdot 0,5 \cdot 15,3 \cdot 10^3, \quad Q_f \text{ in W} \quad (13)$$

und für die Versuche mit Kartons und Polystyrolchips als Brandlast:

$$\dot{Q}_f = - \dot{M} \cdot 0,5 \cdot 21,9 \cdot 10^3, \quad Q_f \text{ in W} \quad (14)$$

mit \dot{M} in g/s.

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 die Approximation durch eine Exponentialfunktion nahe. Diese hat die Form

$$\Delta M = M_0 e^{f_{Be} (t - t_0)} \quad (15)$$

und kann bis zum Zeitpunkt des Ansprechens des Auslöseelementes t_1 , vgl. Bild 4, verwendet werden. Freie Abbrände über diesen Zeitpunkt hinaus lassen einen Übergang zu einer linearen Abhängigkeit der Abbrandmasse von der Zeit erkennen, zumindest bei den hier untersuchten Stoffen und Zündanordnungen.

In der Gleichung (15) 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 Stoff, Geometrie und Zündanordnung enthalten.

Von Friedman /6/ wurde ein formaler Zusammenhang für die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung entsprechend Gleichung (15) angegeben. Dabei ist nach /6/ $0,693/f_{Be}$ die "Verdoppelungszeit", innerhalb derer eine Meßgröße auf das Doppelte ihres Wertes zu einem Zeitpunkt t_1 anwächst, wie vom Verfasser in der Literaturstelle /1/ erläutert wurde.

Der Vergleich der Verdoppelungszeiten von unterschiedlichen Versuchsanordnungen läßt eine Beurteilung des jeweiligen Brandausbreitungsrisikos zu. Eine Beschreibung dieses Brandausbreitungsrisikos durch eine dimensionslose Maßzahl, z.B. durch Normierung der jeweiligen Verdoppelungszeit mit derjenigen einer "Standardbrandlast", könnte in einem fortgeschritteneren Stadium dieser Untersuchungen sinnvoll sein. Allein die Definition einer solchen Standardbrandlast wäre willkürlich, sodaß es dem Verfasser im gegenwärtigen Zeitpunkt zweckmäßig erscheint, den bereits in Normen und Richtlinien vorliegenden Klasseneinteilungen Verpackungsklasse, Lagergutklasse und Brandgefahrenklasse keine weitere Klassifizierung hinzuzufügen.

In der Tabelle 3 wurden die Ergebnisse der Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Abbrandmasse für den Fall seitlicher Zündung an der Stelle 'Z1' im Bild 1 zusammengestellt. Bei den Versuchen handelte es sich dabei um solche mit Brandlasten aus 3 bzw. 5 Kartons pro Gitterbox, in vier Ebenen angeordnet, wie im Abschnitt 3 beschrieben. Das Stoßschutzmaterial war entweder Holzwolle ('HW') oder schwerentflammbar ausgerüstete Polystyrolchips ('PS').

Aus der Regression des zeitlichen Verlaufs der Abbrandmasse erhält man, wie oben angegeben, den Brandentwicklungsbeiwert f_{Be} . Aus diesem wird nach der Beziehung $t_v = 0,693/f_{Be}$ die Verdoppelungszeit der Abbrandmasse berechnet. 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:

$$t_v('HW') : t_v('PS') = 1,34 : 1 \quad (16)$$

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

$$t_v('5') : t_v('3') = 1,17 : 1 \quad (17)$$

Die dazu verwendeten Mittelwerte des Brandentwicklungsbeiwertes f_{Be} und der Verdoppelungszeit t_v betragen dabei im einzelnen:

$$\begin{aligned} f_{Be}('HW3') &= 0,40 \text{ min}^{-1} & , & \quad t_v('HW3') = 103 \text{ s} \\ f_{Be}('HW5') &= 0,34 \text{ min}^{-1} & , & \quad t_v('HW5') = 122 \text{ s} \\ f_{Be}('PS3') &= 0,53 \text{ min}^{-1} & , & \quad t_v('PS3') = 78 \text{ s} \\ f_{Be}('PS5') &= 0,46 \text{ min}^{-1} & , & \quad t_v('PS5') = 90 \text{ s} \end{aligned}$$

Die mit diesen Mittelwerten gebildeten zeitlichen Verläufe der Abbrandmasse nach Gleichung (15) und des freigesetzten Wärmestroms \dot{Q}_f nach Gleichung (13) für Holzwolle als Stoßschutzmaterial bzw. nach Gleichung (14) für schwerentflammbare Polystyrolchips als Stoßschutzmaterial, mit

$$\dot{M} = M_0 f_{Be} e^{f_{Be} (t - t_0)} \quad (18)$$

als Funktion des zeitlichen Massenverlustes durch Differenzieren der Gleichung (15), wurde über der Zeit $(t - t_0)$ in den Bildern 5 und 6 aufgetragen. Man sieht aus der Darstellung der Zunahme der jeweiligen Größen über der Zeit, daß bei dem gewählten Versuchs-

aufbau die Anordnung 'PS3' die rascheste, die Anordnung 'HW5' die langsamste Brandausbreitung aufweist. In den jeweiligen Diagrammen enden die Geraden beim Mittelwert der Zeit $(t_1 - t_0)$, die sich, wie man sieht, in gleicher Richtung wie t_v bewegt. Eine kleine Verdoppelungszeit bedeutet also eine rasche Brandausbreitung und hat daher bei Verwendung des jeweils gleichen Detektors eine raschere Branderkennung zur Folge als bei einer großen Verdoppelungszeit. Die Mittelwerte der Zeit $(t_1 - t_0)$ werden hier zur Verdeutlichung nochmals den Werten t_v gegenübergestellt:

$$\begin{aligned} t_v('PS3') &= 78 \text{ s} , & (t_1 - t_0)('PS3') &= 288 \text{ s} \\ t_v('PS5') &= 90 \text{ s} , & (t_1 - t_0)('PS5') &= 378 \text{ s} \\ t_v('HW3') &= 103 \text{ s} , & (t_1 - t_0)('HW3') &= 414 \text{ s} \\ t_v('HW5') &= 122 \text{ s} , & (t_1 - t_0)('HW5') &= 468 \text{ s} \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß das Verhältnis $t_v('5') : t_v('3')$ konstant ist und damit ebenfalls das Verhältnis $f_{Be}('5') : f_{Be}('3')$, kann man den Beiwert f_{Be} als ein Produkt aus einem geometrieabhängigen Beiwert f_g und einem lagergutabhängigen Beiwert f_l darstellen:

$$f_{Be} = f_g f_l \quad (19)$$

Setzt man den Beiwert f_g der langsamsten Brandentwicklung gleich 1, also $f_g('5') = 1$, dann wird entsprechend der oben getroffenen Feststellung eines konstanten Verhältnisses der Beiwerte für gleiches Stoßschutzmaterial, aber unterschiedliche Geometrie, der Beiwert $f_g('3') = 1,17$, und die Beiwerte f_l nehmen die Werte der entsprechenden Beiwerte f_{Be} für die Versuche mit 5 Kartons pro Gitterbox an, also

$$\begin{aligned} f_l('HW') &= f_{Be}('HW5') = 0,34 \quad \text{und} \\ f_l('PS') &= f_{Be}('PS5') = 0,46 \quad . \end{aligned}$$

Die für zwei Geometrien angegebenen Werte stellen nur zwei Einzelergebnisse dar. Ein allgemeingültiger funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe des Beiwertes f_g und den Kartonabständen, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung, kann daraus nicht abgeleitet werden. Hierzu sind weitere Geometrievarianten zu untersuchen. Vorausgesetzt aber, diese Geometrieabhängigkeit ist einmal bekannt, so sollte man sich bei späteren Versuchsreihen zur Untersuchung des Abbrandverhaltens weiterer Stoffe im Prinzip darauf beschränken können, die Versuche jeweils nur mit einer bestimmten geometrischen Anordnung durchzuführen. Der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse könnte dann auch für andere Geometrien über den folgenden Zusammenhang bestimmt werden:

$$\Delta M = M_0 e^{f_g f_1 (t - t_0)} \quad , \quad (20)$$

welcher aus der Verknüpfung der Gl. (19) mit Gl. (15) folgt. Dabei ist also f_g für den jeweils untersuchten geometrischen Aufbau als bekannt vorauszusetzen und f_1 ergibt sich dann aus nur einer Messung. Die Überprüfung der Gültigkeit dieses aufgrund der bisherigen Arbeiten angenommenen Sachverhalts bleibt für die Fortführung des Forschungsvorhabens weiter zu untersuchen.

Schließlich soll noch auf die Auswirkungen der aus dem zeitlichen Verlauf der Abbrandmasse hergeleiteten Beiwerte f_g und f_1 auf die Wärmeströme \dot{Q}_f hingewiesen werden. Diese verhalten sich bei Anwendung der Gleichungen (13) und (14) in Verbindung mit Gleichung (16) bzw. der ersten zeitlichen Ableitung der Abbrandmasse nach Gleichung (18), für den Fall unterschiedlicher Stoßschutzmaterialien, aber jeweils gleicher geometrischer Anordnung, wie folgt:

$$\dot{Q}_f('PS') : \dot{Q}_f('HW') = 2,18 : 1$$

und für den Fall unterschiedlicher Geometrie, aber jeweils gleichen Stoßschutzmaterials, wie folgt:

$$\dot{Q}_f('3') : \dot{Q}_f('5') = 1,39 : 1 \quad .$$

Aus diesen Ergebnissen ist zu folgern, daß der Einfluß einer Änderung der geometrischen Abmessungen auf die freigesetzten Wärmeströme im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen insgesamt geringer ist als der Einfluß des Stoßschutzmaterials, obwohl dieses bezüglich der Masse lediglich 27,4 % der insgesamt brennbaren Masse für den Fall PS und 31 % der insgesamt brennbaren Masse für den Fall HW ausmachte, wie sich aus den Zahlenwerten der Tabelle 2 ergibt.

6. 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. Um hier Lücken im Wissensstand zu schließen, wurde an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) damit begonnen, in Großbrandversuchen die Brandausbreitungsvorgänge bei in Gitterboxen gestapelten Wellpappkartons mit unterschiedlichen Füllungen zu untersuchen. Der vorliegende Bericht beschreibt die erste Versuchsserie aus einem mehrjährigen Forschungsvorhaben und zeigt die weitere Vorgehensweise auf. Die aus den Beobachtungen des Versuchsablaufes und aus umfangreichen Messungen gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß bezüglich der Geschwindigkeit der Brandausbreitung und der dabei in der Zeiteinheit freigesetzten Wärme die

Füllung der Wellpappkartons bereits in der Anfangsphase des Brandes eine entscheidende Rolle spielt, ebenso geometrische Bedingungen von Einfluß sind, insbesondere bezüglich der Geschwindigkeit der horizontalen Brandausbreitung, also für die volumetrische Einbeziehung des Lagergutes durch die Flammen. Sehr enge Zwischenräume zwischen aufeinander liegenden Stapeln behindern diese volumetrische Einbeziehung und begrenzen die Brandausbreitung nahezu auf die oberhalb der Zündquelle gelegene vertikale Fläche, während bei großen Zwischenräumen der Brand rasch auf horizontal liegende Flächen übergreift.

Der zeitliche Massenverlust läßt sich in der Brandentwicklungsphase bis zum Löscheinsatz durch eine automatische Löschanlage 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.

7. FORMELZEICHEN

F	Querschnittsfläche in m^2
H_u	Heizwert in J/g
\bar{H}_u	gewichteter Heizwert in J/g
$\bar{H}_{u,eff}$	Effektiver Heizwert in J/g
L	Verdampfungsenthalpie, Zersetzungsenthalpie in J/g
M	Masse in g
$-\dot{M}$	zeitlicher Massenverlust in g/s
M_a	Anfangsmasse in g
ΔM	Abbrandmasse in g
M_1	Wert der Abbrandmasse in g zum Zeitpunkt t_1
M_0	Masse zum Zeitpunkt t_0 nach Gleichung 15
P	Teilmasse eines Stoffes im Brandgut in g
\dot{Q}	Wärmestrom in W
\dot{Q}_{eff}	Durch Verbrennung effektiv freigesetzter Wärmestrom in W
\dot{Q}_f	Fühlbarer Wärmestrom in W nach Gl. 10
\dot{Q}_{konv}	Konvektiver Wärmestrom in W
\dot{Q}_{str}	Strahlungswärmestrom in W
\dot{Q}_z	zur Zersetzung erforderlicher Wärmestrom in W nach Gl. 12
T	Temperatur in K
T_∞	Umgebungstemperatur in K
c_p	Spezifische Wärmekapazität in J/g K
f_{Be}	Beiwert für die Brandentwicklung in min^{-1}
f_g	Beiwert für Geometrieinfluß
f_l	Beiwert für Stoffeinfluß in min^{-1}
k_f	Faktor, Maß für die Vollständigkeit der Verbrennung
p	Massenanteil eines Stoffes im Brandgut

t	Zeit in s
t_1	Ansprechzeitpunkt des Auslöseelementes des Sprinklers, Zeitpunkt des Beginns des Löscheinsatzes in s
t_v	Verdoppelungszeit in s
t_0	Zeitpunkt, bei dem $\Delta M = M_0 = 1$ kg nach Gleichung 15
u	über einen Querschnitt gemittelte Gasgeschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte in g/m^3

8. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 1: Literaturlauswertung. Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /2/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen, Teil 1: Literaturlauswertung und Errichtung der Versuchsanlage. Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /3/ You, H.-Z.,
Kung, H.-C.: Strong Buoyant Plumes of Growing Rack Storage Fires. Twentieth Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, The Combustion Institute, 1984.
- /4/ de Ris, J.: Fire Radiation - A Review. Seventeenth Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, The Combustion Institute, 1978

- /5/ Lee, J.L.: Extinguishment of Rack Storage Fires of Corrugated Cartons using Water. Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium. Berlin, Springer Verlag, 1986.
- /6/ Friedman, R.: Quantification of Threat from a Rapidly Growing Fire in Terms of Relative Material Properties. Fire & Materials, Vol. 2, No. 1, 1978.

9. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1 Einflußgrößen auf die Brandausbreitung bei Verpackungen und Lagergut.

<u>Stoffliche</u> <u>Einflußgrößen</u>	<u>Geometrische</u> <u>Einflußgrößen</u>	<u>Zündquelle</u>
-verfügbare Masse	-Stapelabstände	-Lage
-Brennbarkeit	-Volumenanteil des brennbaren Materials	-Ausdehnung
-Heizwert	-Stapelhöhe	-Wärmefrei- setzung
-Mindestzündenergie	-Umfassungsbauteile	
-Zündverhalten	-Anordnung	
-Zündtemperatur	-thermische	
-thermische Stoffgrößen	Eigenschaften	
	-Verteilung der Stapelabstände	

Tabelle 2 : Heizwerte und Einzelmassen des Brandgutes.

Zündquelle: 50 gr Holzwolle

100 ml Brennsprititus (Äthylalkohol)

Heizwerte:

H _u	Holzwolle	16 MJ/kg
H _u	Äthylalkohol	25 MJ/kg
H _u	Karton	15 MJ/kg
H _u	Polystyrol	40 MJ/kg

Massen pro Karton:

Kanister aus

Weißblech	1,706 kg
Karton (ab V 5)	0,666 kg
Holzwolle	0,3 kg
EPS B1	0,25 kg

Tabelle 3 : Abbranddaten von Brandversuchen bei Zündung an der Stelle Z1 ('vorne links').

Versuch Nr.	8	10	13	14	15	18	20	24	25	27
Brandlast	HW5	PS3	PS5	HW3	HW5	HW5	HW3	HW3	PS3	PS5
M_1 in kg	14	9	16	14	14,5	14	13	20,5	16	20
t_0 in min	0,9	1,8	1,2	1,7	1,3	1,6	3,3	0,8	2,8	4,6
$(t_1 - t_0)$ in min	8,8	3,2	4,3	6,1	8,2	6,5	4,8	9,9	6,3	8,4
f_{Be} in min^{-1}	0,30	0,69	0,65	0,42	0,33	0,41	0,54	0,31	0,44	0,36
t_v in s	139	60	64	99	126	101	77	134	95	115

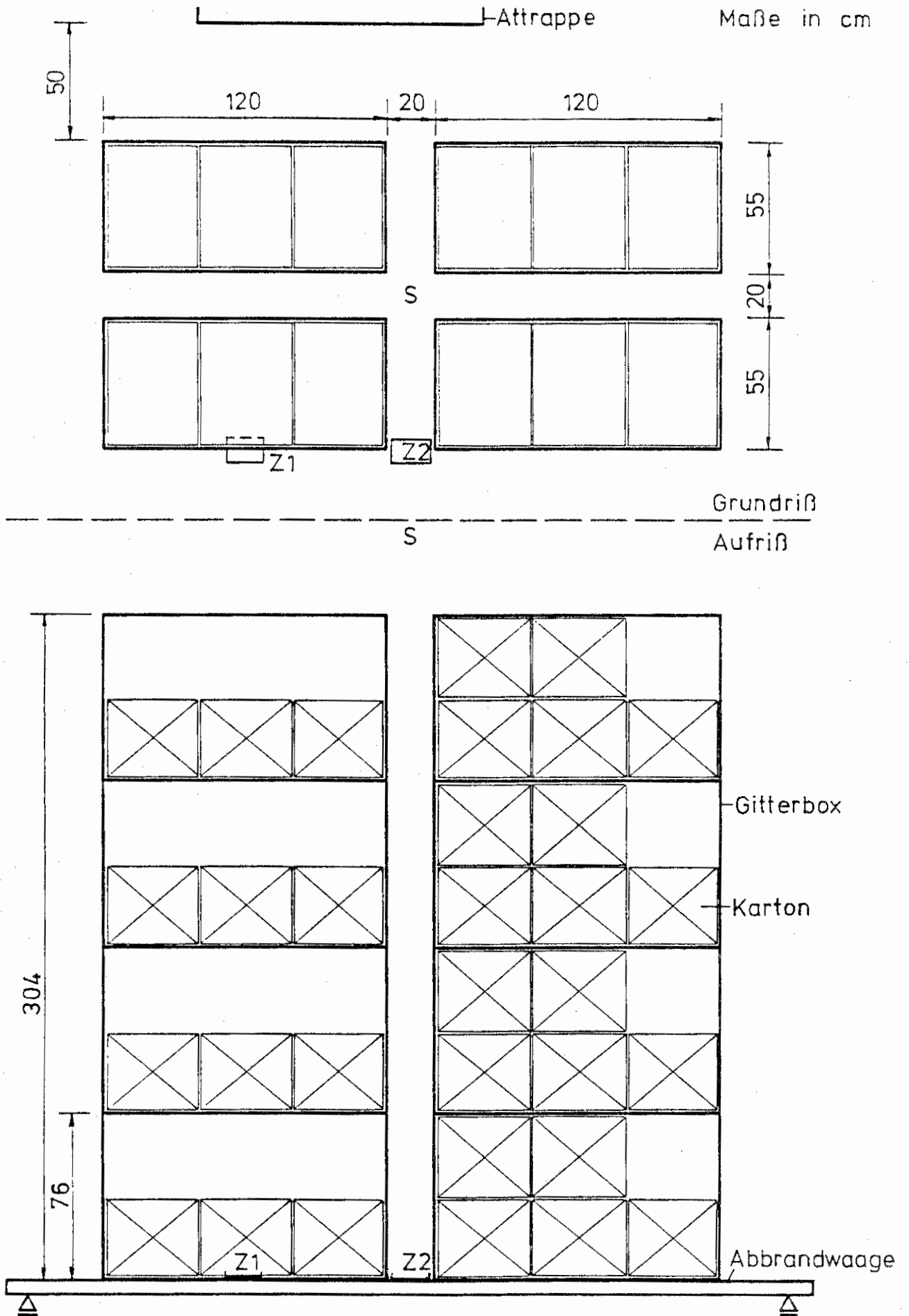


Bild 1 Grund- und Aufriß des Versuchsaufbaus für 3 Kartons (links) bzw. 5 Kartons (rechts) pro Gitterbox.

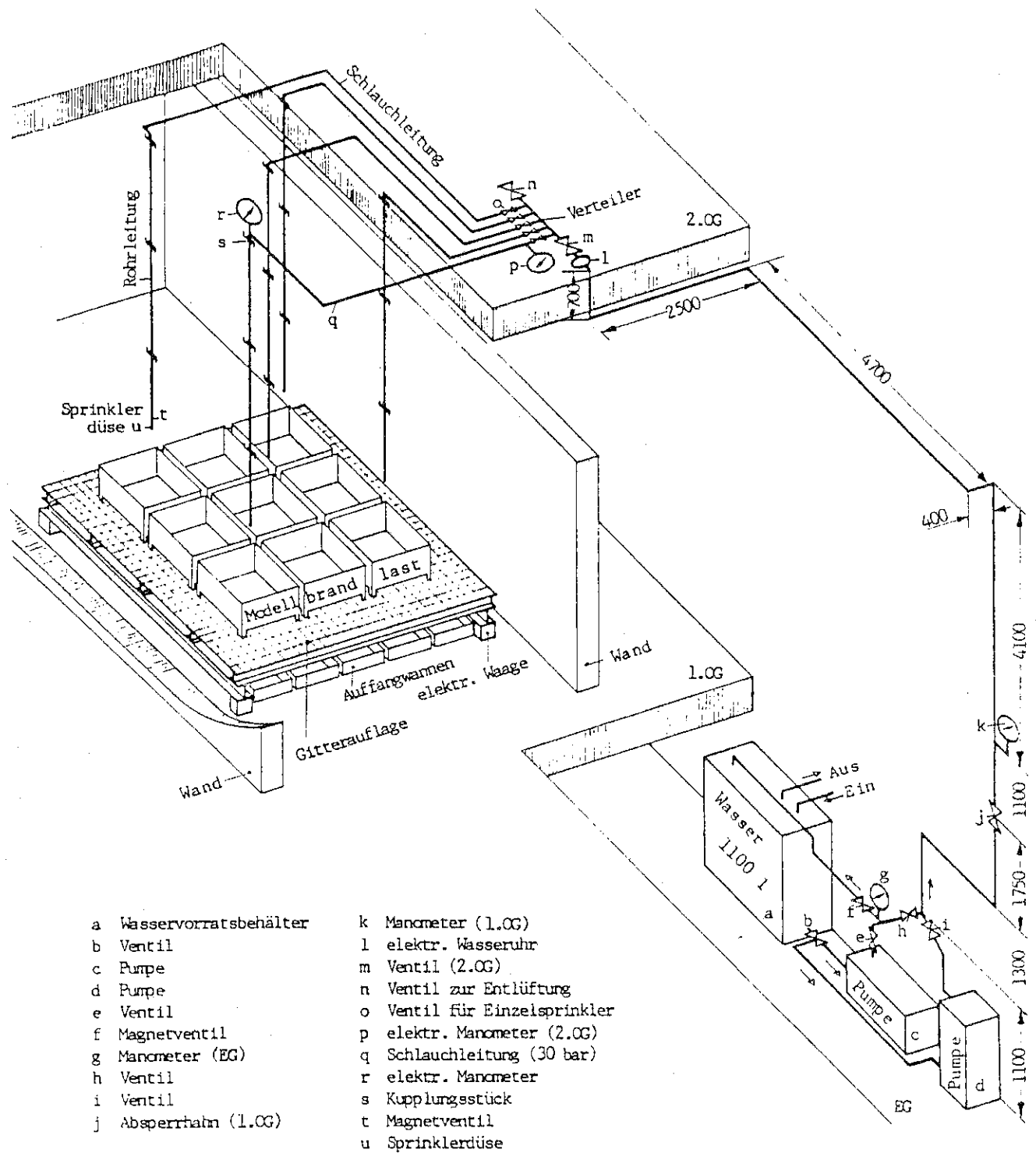


Bild 2 Versuchsaufbau mit Darstellung der Löschanlage nach Schatz /2/.

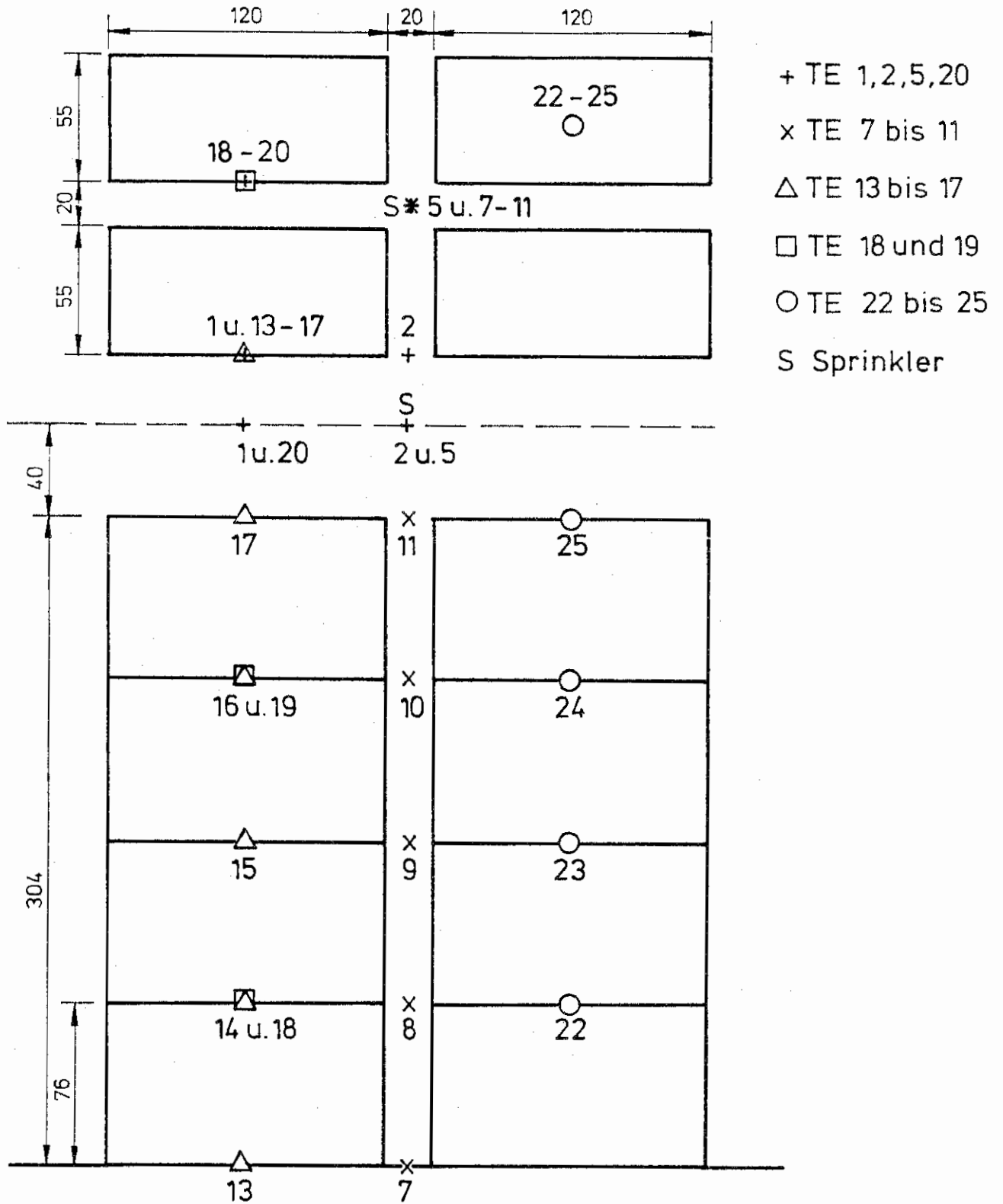


Bild 3 Verteilung der Temperaturmeßstellen bei seitlicher Zündung der Brandlast.

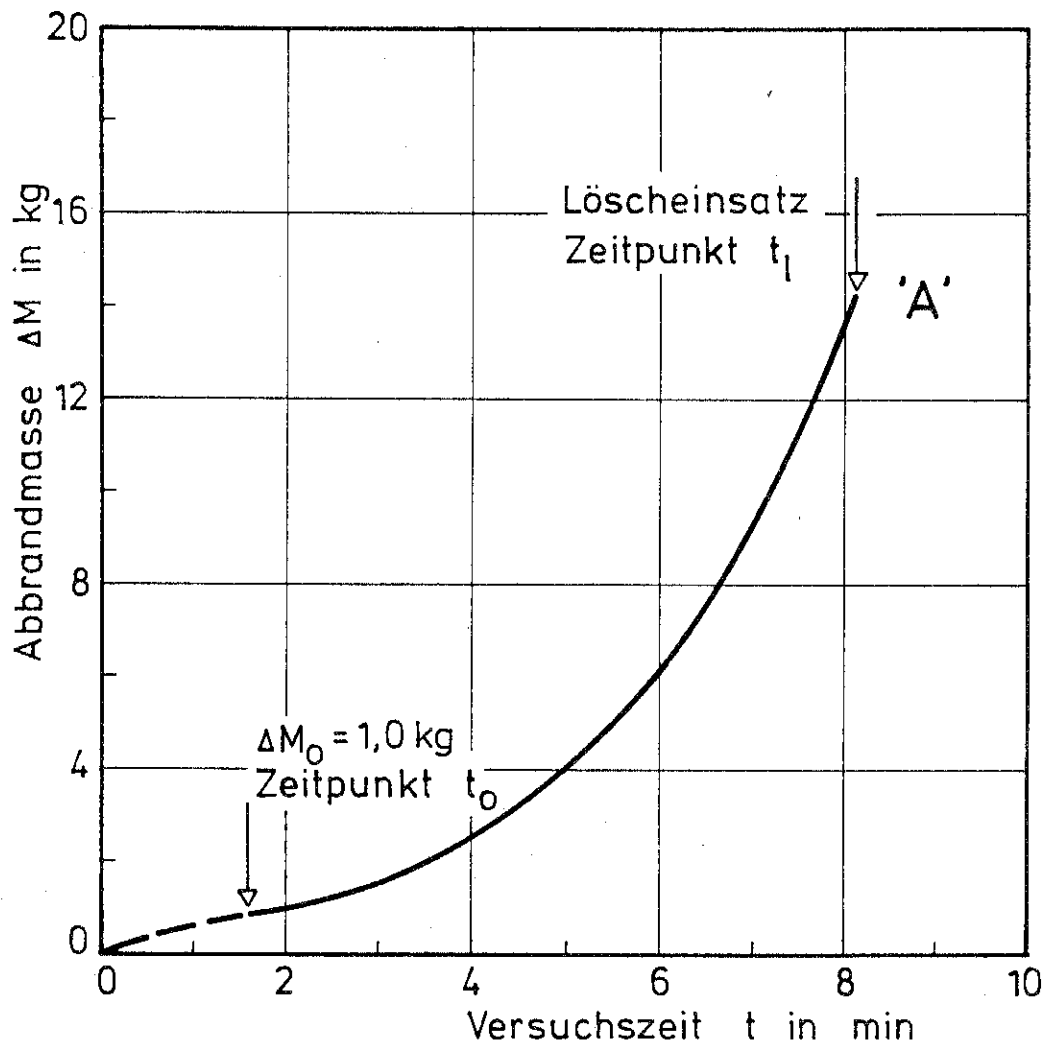


Bild 4 Zeitlicher Verlauf der Zunahme der Abbrandmasse.

Beispiel: Versuch 18.

'A' = Auslösezeitpunkt = Löscheintrittszeitpunkt t_1 .

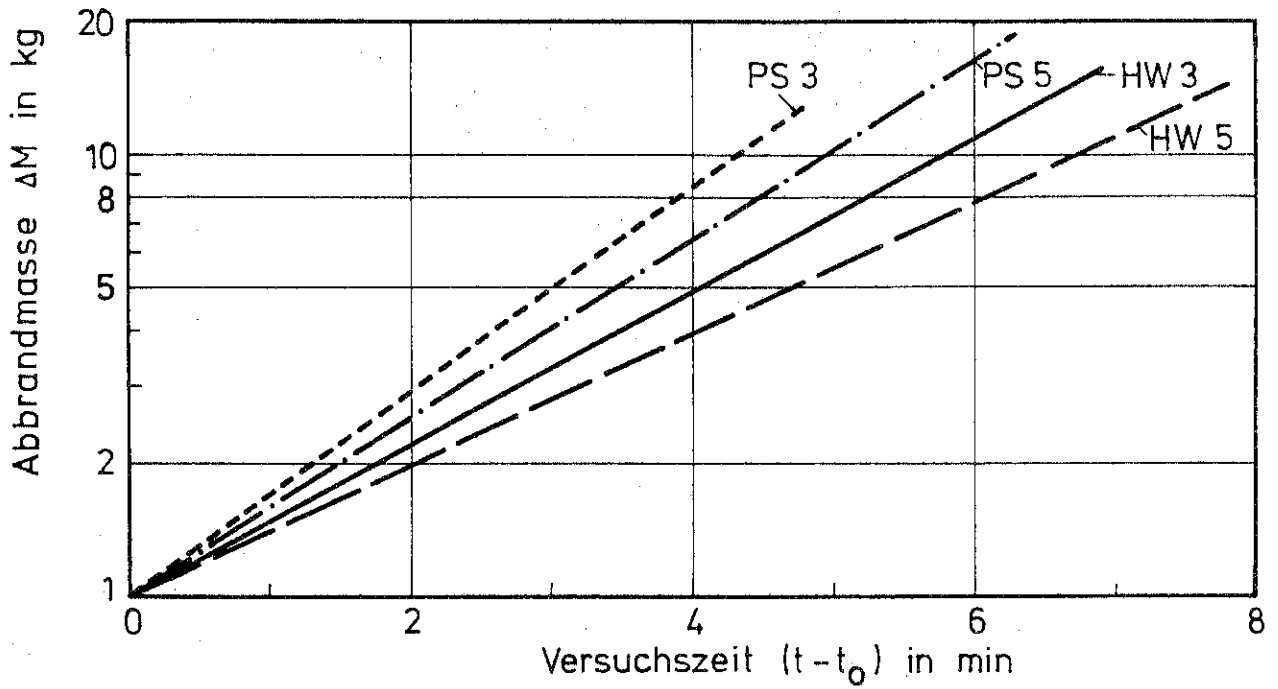


Bild 5 Zunahme der Abbrandmasse über der Zeit $(t - t_0)$, gemittelt für jeweils gleiche Versuche.

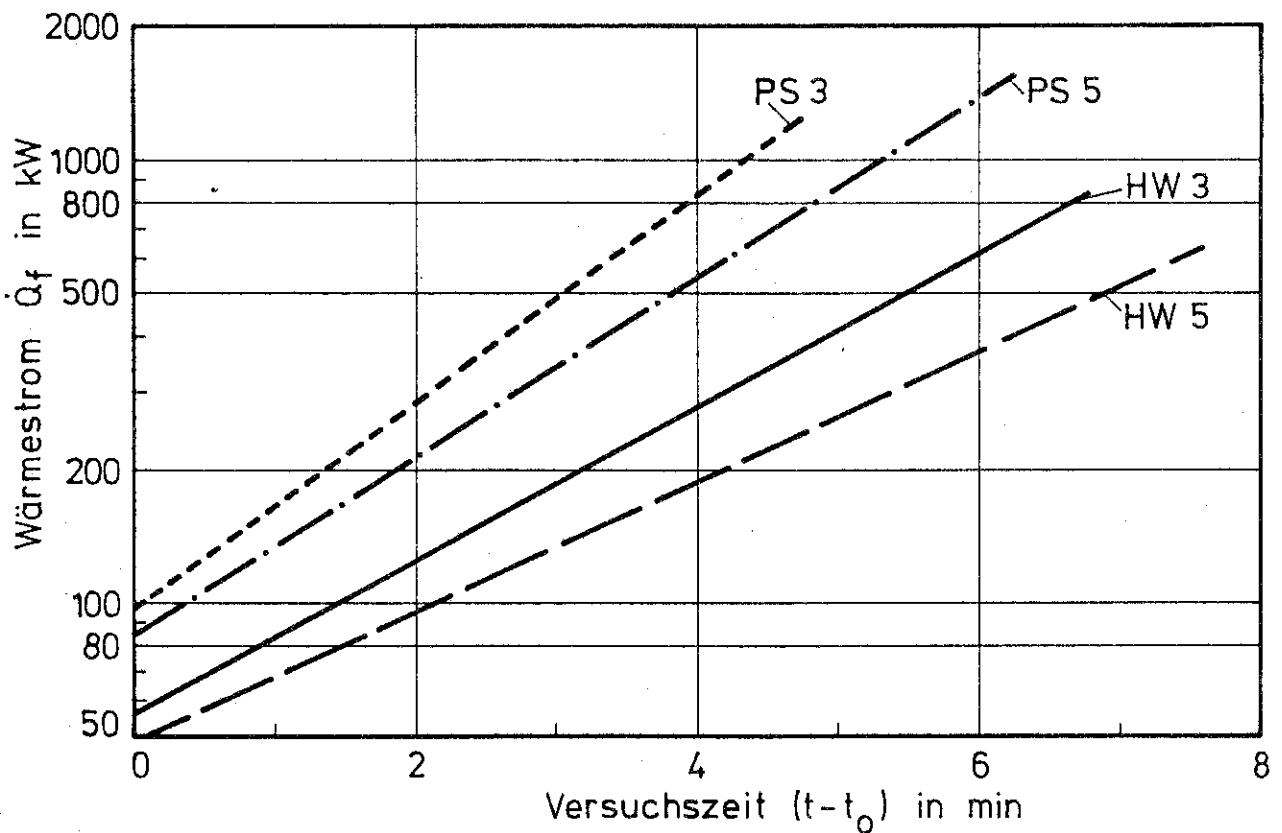


Bild 6 Zunahme des fühlbaren Wärmestroms Q_f über der Zeit $(t - t_0)$, gemittelt für jeweils gleiche Versuche.