

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil I: Literaturlauswertung

# 55

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

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

Forschungsbericht Nr. 55

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

von  
Dipl.-Ing. Dieter Brein

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
Dezember 1985

FA.Nr. 100(4/83)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. BRANDVERSUCHE IM REALMASSTAB	2
3. BRANDAUSBREITUNG - AUSWERTUNG VON BRANDVERSUCHEN IM REALMASSTAB	16
4. ERMITTLUNG VON STOFFEIGENSCHAFTEN	20
5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	24
6. FORMELZEICHEN	26
7. LITERATURVERZEICHNIS	27
8. TABELLEN UND BILDER	31

## 1. EINLEITUNG

Brände im Lagerbereich von Produktionsanlagen, in Zwischen-, Groß-, und Hochregallägern führen aufgrund der zunehmenden Wertekonzentration zu hohen Schäden, wenn Brandmeldung und -bekämpfung mit schnell um sich greifenden Bränden nicht Schritt halten. Um die in den vergangenen Jahren erhöhten Risiken im Lagerbereich besser beurteilen zu können, wurden von verschiedenen Institutionen Brandversuche in realistischer Größenordnung durchgeführt.

Viele Erkenntnisse sind bislang allerdings überwiegend qualitativer Natur. Ein weiterer Mangel bei der adäquaten Beurteilung von Lagerrisiken ist die Tatsache, daß die meisten bisher bekannt gewordenen bzw. zur Veröffentlichung freigegebenen Ergebnisse über Brandversuche im Lagerbereich mit dem Ziel ermittelt wurden, nicht nur das Abbrandverhalten von gelagerten Gütern zu untersuchen, sondern in erster Linie auch Kenntnisse über das jeweils vorgesehene Löschesystem zu erhalten, also die Frage nach der Anordnung und Zahl der Löschdüsen und nach der erforderlichen Wasseraufgabe zu beantworten. Einer Auswertung der vorliegenden Versuchsberichte hinsichtlich der Brandentwicklungsphase ist die Tatsache hinderlich, daß häufig der Löscheinsatz so im Vordergrund der Berichte stand, daß dem Vorgang der Brandentstehung und Brandausbreitung vor dem Einsatz des Löschmittels oft nur geringes Augenmerk geschenkt wurde. Es gibt nach unserer Kenntnis hiervon nur im wesentlichen zwei Ausnahmen. Dies sind zum einen Brandversuche der Fire Research Station in England in den späteren 60er und frühen 70er Jahren und zum anderen großangelegte Versuche der Factory Mutual Research Corporation in den USA aus den 70er Jahren. Darüber hinaus liegen einige überwiegend qualitative Ergebnisse über Brandversuche und eine kaum überschaubare Anzahl von Veröffentlichungen über Brandfälle in Lagern vor, bei denen allerdings dem Feuerwehreinsatz breiter Raum gewidmet ist und zur Lagerung bezüglich Material, Menge und Verteilung im Raum und zur eigentlichen Brandausbreitung nur wenige Angaben enthalten sind.

Statistische Angaben zu Brandfällen, die Brandobjekte, Zündursachen und Schadenshöhen betreffend, findet man in den jährlichen Zusammenstellungen der britischen Fire Protection Association in der Zeitschrift "Fire Prevention" veröffentlicht. Weitere Erkenntnisse über die Brandausbreitung, jedoch zumeist auf den Labormaßstab beschränkt, erhält man bei Durchsicht der Arbeiten, die überwiegend vom National Bureau of Standards (USA) durchgeführt werden und die eine experimentelle und theoretische Bestimmung der Brandausbreitung an vertikal orientierten Feststoffoberflächen zum Ziel haben. Während bereits in diesen Arbeiten eine Reihe von Erkenntnissen zur vertikal nach unten und horizontal zur Seite gerichteten Brandausbreitung veröffentlicht wurden, ist die Frage der vertikal nach oben gerichteten, also der im realen Brandfall risikoreicheren Brandausbreitung, quantitativ noch wenig erforscht. Hier besteht eine wesentliche Schwierigkeit der Übertragung von Ergebnissen im Modellmaßstab auf den Großversuch darin, daß die Strömungs- und Wärmeübertragungsverhältnisse nicht ohne weiteres aus dem Modellmaßstab auf den realen Maßstab übertragbar sind.

Die folgende Literatúrauswertung gliedert sich entsprechend den bisher gemachten Angaben in eine Übersicht über die bekannt gewordenen Brandversuche im Realmaßstab, eine Betrachtung der bisher vorliegenden Veröffentlichungen über eine quantitative Auswertung der genannten Brandversuche und in eine Zusammenfassung der Arbeiten, die zur Bestimmung von Brandausbreitungsvorgängen im Labormaßstab durchgeführt wurden.

## 2. BRANDVERSUCHE IM REALMASSTAB

In einer Veröffentlichung über experimentelle Untersuchungen zur Brandmeldung und -kontrolle in Hochregalanlagen berichtete Nash /1/ über Brandversuche, die an Ausschnitten aus Hochregallägern bei der britischen Fire Research Station in Boreham Wood und in

Cardington durchgeführt wurden. Es wurden im Rahmen dieser Untersuchungen vier Testreihen mit Bränden durchgeführt.

Die Brandlast bestand bei der ersten Testreihe (4 Versuche) aus Holzpaletten, auf die Pappkartons gesetzt wurden. Diese Pappkartons waren mit tatsächlichen und simulierten Haushaltswaren wie Aerosoldosen, Waschmitteln, Kunststoffen, Papierschnitzeln, Holz- wolle, Papier und Pappe gefüllt. Die Paletten wurden in zwei Reihen, Rücken an Rücken auf vier Ebenen mit insgesamt 32 Palet- tenplätzen angeordnet. Die Länge der Regalanordnung betrug 4,88 m, die Breite 2,74 m und die Höhe 7,31 m. Die Zündung erfolgte durch Anbrennen eines aufgerissenen Pappkartons in der Mitte der unteren, vorderen Ebene. Nash geht im Detail auf die installier- ten Brandmelder und auf die ortsfesten Löschanlagen ein, die hier jedoch von untergeordnetem Interesse sind. Die Angaben über die Rauchentlüftung des Laborraumes sind aufschlußreich. Bei kleiner Dachöffnung und ohne Bodenöffnung füllte sich das Gebäude völlig mit Rauch (1.Versuch und 2.Versuch). Bei kleiner Dachöffnung und mit ausreichender Bodenöffnung blieb die Rauchentwicklung "auf ein erträgliches Maß" beschränkt (3. und 4.Versuch). Nach erfolg- ter Zündung betrug die durchschnittliche Ansprechzeit für die Detektoren 1 min 20 s und für die Sprinkleranlagen 6 min 16 s (68 °C-Sprinkler). Bei jedem Versuch breiteten sich die Flammen zur Mitte des Regals hin aus und dann die vertikalen "Kamine" bis zur vollen Höhe der gesamten Versuchsanordnung hinauf. Die Wärme- strahlung reichte jedoch nicht aus, um bei einer Gangbreite von 1,52 m ein gegenüberliegendes Gestell zu zünden.

Bei der zweiten Testreihe wurde dieselbe Regalanordnung verwen- det, jedoch wurden die Pappkartons einheitlich mit Holz- wolle gefüllt, um einen gleichmäßigen, reproduzierbaren Brandverlauf zu erzielen. Als Löschmittel war bei diesen Versuchen Leichtschaum vorgesehen. Die Zündung erfolgte in gleicher Weise wie bei den Sprinklerversuchen durch Anbrennen eines aufgerissenen Pappkar- tons in der Mitte der unteren, vorderen Ebene. Die Brandausdeh- nung glich derjenigen, die bei den Sprinklerversuchen der ersten

Testreihe festgestellt worden war; bei 3 von 4 Versuchen wurde die gesamte Höhe der Regalanordnung von den Flammen erfaßt.

Bei der dritten Testreihe wurden Versuche mit Halon 1211 als Löschmittel durchgeführt; die Versuchsanlage war die gleiche wie bei den Testreihen 1 und 2. Der Löscheinsatz erfolgte etwa 3 min nach der Zündung. Nash /1/ teilt mit, daß im Fall des Halons 1211 keine zuverlässige Löschung möglich war, da nur die Flammenbildung unterbrochen wurde.

Die vierte Testreihe bestand aus sechs Großversuchen an einer Hochregalanlage mit einer Sprinklerinstallation. Die Versuche wurden in einer Flugzeughalle in Cardington durchgeführt. Die Brandlast bestand im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Versuchen aus zwei parallel verlaufenden Regalen von jeweils 2,4 m Breite und 11,4 m Höhe mit jeweils 6 Ebenen von 1,7 m Höhe. Die Gangbreite zwischen den Regalen betrug 1,5 m. Das größere Regal war mit 6 Regalfächern ausgestattet und wies eine Länge von 16,9 m auf; das kleinere Regal mit 2 Regalfächern war 5,6 m lang und stand den zwei inneren Regalfächern des langen Regals gegenüber. Jedes Palettenfach enthielt 4 Paletten, je 2 Rücken an Rücken. Insgesamt wurden also 144 + 48 Karton-beladene Paletten verwendet. Den Fotografien der Veröffentlichung ist zu entnehmen, daß pro Palette jeweils 12 Kartons mit den ungefähren Abmessungen 50 cm x 50 cm x 50 cm verwendet wurden. In diesen Pappkartons waren Blechkanister, in Holzwolle verpackt, enthalten. Die Zündung erfolgte mittels eines Streichholzes an der Holzwolle eines aufgerissenen Kartons in der Mitte des langen Gestells in der untersten Ebene auf der Ganginnenseite.

Bei 5 von 6 Versuchen breitete sich der Brand innerhalb von 5 bis 6 min bis zur Gesamthöhe der Lageranordnung aus. Die horizontale Ausdehnung blieb in allen Fällen auf das Regalfach, in dem sich der gezündete Karton befand, beschränkt. Es muß jedoch dabei darauf hingewiesen werden, daß sich im Mittel nach 4,5 bis 6,5 min der erste Sprinkler öffnete und damit die Kontrolle des

Brandes durch die selbsttätige Löschanlage begann. Eine Zusammenfassung der Großbrandversuche bezüglich der Flammenhöhe und der Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist im Bild 1, entnommen aus /1/, wiedergegeben. Im Bild 1 sind die obengenannten Größen Flammenhöhe und Geschwindigkeit der Flammenausbreitung in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Die im Abschnitt 3 vorgenommenen Auswertungen ergeben für die Abhängigkeit der vertikalen Brandausbreitungsgeschwindigkeit von der Zeit einen nichtlinearen Zusammenhang, der mit Exponential- oder Potenzfunktionen dargestellt werden kann. Das wiedergegebene Diagramm enthält keine Angaben über die Flammenhöhe oberhalb der Regalanordnung, da diese im Diagramm bei 11,4 m, der Regalhöhe, endet; im Text wird allerdings eine Flammenlänge von 3 m oberhalb des Regals angegeben. Bedingt durch den Löscheinsatz wurden hier keine größeren Werte festgestellt.

Young und Nash /2/ haben aufgrund der Untersuchungen bei den oben genannten Versuchsreihen /1/ qualitative Angaben über die Größen gemacht, die den Haupteinfluß auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei gelagerten Stoffen, insbesondere bei Regal- oder Palettenlagerung haben. Es sind dies die geometrischen Verhältnisse der Lagerung, das Verpackungsmaterial und die Zünd- und Brandeigenschaften der verpackten Güter selbst.

Wie Brandversuche gezeigt haben, ist bereits ein Blocklager bei den zur Zeit gängigen Lagerhöhen vor allem dann im Sinne einer raschen vertikalen Brandausbreitung gefährdet, wenn die Lagergüter mithilfe von z.B. Gabelstaplern aufgeschichtet werden, da dabei vertikal durchgehende Spalten mit Spaltbreiten von einigen cm entstehen. In diesen Spalten kann durch den Kamineffekt eine rasche vertikale Brandausbreitung stattfinden.

Beim Regallager, bei dem sowohl "Kamine" als auch Abstände zwischen der Oberseite der jeweils unteren Palettenebene und der Unterseite der jeweils oberen Palettenebene vorhanden sind, tritt zu der raschen vertikalen noch eine nennenswerte horizontale

Brandausbreitung in diesen Freiräumen hinzu. Dies führt zu einer trichterförmig sich nach oben ausdehnenden Flammenfront. Wenn die Außenseiten des Lagergutes, die einem Gang zwischen Regalreihen zugewandt sind, brennen, dann kann bei nicht zu großen Gangbreiten das Lagergut an der entgegengesetzten Seite soweit vorgeheizt werden, daß es von Flugfeuer aus der bereits brennenden Reihe gezündet werden kann. Die beiderseitig gegenseitige Aufheizung führt zu einem weiteren Ansteigen der vertikalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit. Aufgrund der vorliegenden Messungen rechnen die Autoren die Zeitpunkte hoch, zu denen nach einer Zündung in Bodennähe die Dachunterseite bei Lägern unterschiedlicher Höhen von den Flammen erreicht sein wird, sofern es sich um Regalläger des untersuchten Typs handelt. Für 20 m, 30 m und 40 m hohe eingeschossige Lagergebäude geben sie jeweils eine Zeitspanne von ca. 6, 7 bzw. 8 Minuten an. Während sich noch die Flammen in dem gezündeten Palettenstapel nach oben rasch ausbreiten, werden bereits nebenliegende Stapel gezündet und Flugfeuer setzt weitere Stapel an anderen Stellen in Brand. Auch wenn das Lagergut selbst nicht brennbar ist, so breiten sich die Flammen dennoch über die brennbaren Verpackungen aus.

Die Zündfähigkeit der äußeren Verpackung ist aber in der Entstehungsphase des Brandes die wichtigste Größe, die die Brandausbreitungsgeschwindigkeit beeinflusst. Zum Beispiel benötigen Holzkisten eine höhere Zündenergie als Pappkartons, und obwohl sie eine größere Brandlast darstellen, brennen sie langsamer ab als Kartons.

Bezüglich des Einflusses der Verpackung gehen die Autoren /2/ auf den Unterschied zwischen Pappkartons und Schrumpffolie (Polyäthylen) ein. Bei nichtbrennbarem Lagergut wie z.B. Marmeladegläsern, in Schrumpffolie verpackt, wird die Brandausbreitung gegenüber in Kartons verpacktem Gut verzögert. Bei brennbarem Lagergut wird das Brandausdehnungsrisiko jedoch dadurch vergrößert, daß die Folie in noch unzerstörter Form als Schutz des Lagergutes vor Benetzung mit Wasser bei Einsatz einer Sprinkleranlage wirkt, bis sie von den Flammen erreicht und abgeschmolzen wird. Dann aber

können die Flammen eine trockene, brennbare Lagergutoberfläche zünden. Bezüglich des zu erwartenden Gesamtschadens kann dies jedoch wieder unter Umständen dadurch kompensiert werden, daß in anderen Lagerbereichen das Lagergut wasser- und rauchgeschützt als bei Verpackung in Kartons ist. Zusammenfassend stellen die Autoren /2/ fest, daß eine Verpackung nicht brennbaren oder schwerentflammbar Lagergutes in Schrumpffolie den Brandschaden vermindern kann. Zum Beweis ihrer Behauptung führen sie Versuche an, bei denen die eine Hälfte eines Lagerregals mit in Schrumpffolie verpackten und die andere Hälfte mit in Pappkartons verpackten Polyäthylenflaschen ein bezüglich der Kartonverpackung ungünstigeres Brandverhalten zeigte.

Als dritten Haupteinfluß schließlich führen die Autoren /2/ das Brandverhalten des Lagergutes selbst an, das sich auf die Dauer und Intensität des Brandes auswirkt, schließlich auch das produzierte Rauchvolumen und die Rauchdichte bestimmt.

Das in der Regel bekannte Brandverhalten bzw. die Brennbarkeit des Lagergutes selbst und die zu erwartende Brandheftigkeit haben, in Kategorien eingeteilt, Eingang in die Prämiennichtlinien des Verbandes der Sachversicherer /3/ gefunden. In Verbindung mit der Brandgefährlichkeit der Verpackung, die dort in 5 Stufen eingeteilt ist, ergibt sich die Einteilung in 6 Lagerarten unterschiedlichen Risikos. In der Tabelle 1 sind die Verpackungsarten und die Lagerarten aufgeführt, nach denen bei der Prämienermittlung unterschieden wird. Den Sprinklerrichtlinien des Verbandes der Sachversicherer /4/ ist eine vergleichbare Risikoaufteilung zu entnehmen, die sich dort auf die Auslegung von Sprinkleranlagen auswirkt. In der Tabelle 2 sind die von der Lagermaterial- und der Verpackungsklasse abhängigen Brandgefahrenklassen der Sprinklerrichtlinien sowie Listen wiedergegeben, aus denen die Zuordnung eines bestimmten Lagermaterials zu einer Lagermaterialklasse abgelesen werden kann. Eine ausführliche Zusammenstellung bezüglich der Anforderungen an Sprinkleranlagen selbst findet man bei Schatz /5/.

Während die bei /3/ und /4/ ermittelten Gefahrenpotentiale wohl primär auf den Sachschutz der gelagerten Güter selbst zielen, liegt hingegen bei den Arbeiten zur DIN 18230 /6/, "Baulicher Brandschutz im Industriebau", wie der Titel des Normblattes besagt, die Hauptzielrichtung darin, eine einheitliche brandschutztechnische Beurteilung von Industriebauten mit festgelegter Brandbelastung in bezug auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer ihrer einzelnen Bauteile zu ermöglichen. Bei der Bestimmung der rechnerischen Brandbelastung wird in dieser Norm ein Abbrandfaktor  $m$  verwendet, mit dem das Brandverhalten der brennbaren Stoffe in der jeweiligen Art, Form und Verteilung berücksichtigt wird. Die Ermittlung dieses Abbrandfaktors  $m$  für ein Brandgut in der jeweiligen Art, Form und Verteilung geschieht derzeit in einer Versuchsanlage des Staatlichen Materialprüfungsamtes des Landes Nordrhein-Westfalen in Dortmund. Die bisher dort ermittelten  $m$ -Faktoren sind im Beiblatt 1 zu DIN 18230 aufgeführt. Die Liste wird durch neue Versuchsergebnisse laufend ergänzt. Die DIN 18230 Teil 2 beschreibt die Ermittlung des Abbrandfaktors  $m$  ausführlich, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Eine Klassifizierung bestimmter Stoffe mit dem  $m$ -Faktor scheint den mit anderen Angaben /3,4/ ermittelten Gefahrenpotentialen jedoch nicht direkt vergleichbar zu sein. Allerdings werden im Gegensatz zum zahlenwertmäßig erfaßten  $m$ -Faktor die Gefahrenpotentiale nach /3/ oder /4/ nicht unmittelbar quantifiziert. Bei /3,4/ werden Forderungen hinsichtlich Prämien bzw. Sprinklerschutz erhoben, die im wesentlichen auf Branderfahrungen gegründet sind. Die zusätzliche Angabe von Zahlenwerten, z.B. eine Angabe der jeweils zu erwartenden Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit für bestimmte Lagergüter in verschiedenen geometrischen Anordnungen, wäre wünschenswert. Dies ist eine Problemstellung, an deren Lösung mit diesem Forschungsvorhaben gearbeitet wird. Zur Ergänzung der Angaben in den Tabellen 1 und 2 enthält Tabelle 3 eine Auswahl von  $m$ -Faktoren, die dem o.g. Beiblatt 1 zu DIN 18230 Teil 1 entnommen sind. Der in der Tabelle 3 zu findende Wert 0,2 ist ein Minimalwert per definitionem.

Ähnliche Risikoeinteilungen wie bei /3/ und /4/ findet man nach Young und Nash /2/ in den Regeln des britischen Fire Officers Committee und denen der National Fire Protection Association der USA, wobei ebenfalls die Art des Lagergutes, die Verpackung und die Lagerart zur Risikobeurteilung herangezogen werden.

In einem weiteren Bericht über Brandversuche an Hochregallagern beschreiben Rogers und Young /7/ 19 Großbrandversuche, die Mitte der 70er Jahre in Cardington durchgeführt wurden. Die Anordnung des Lagergutes war dabei der von Nash /1/ beschriebenen vergleichbar. Dabei befanden sich auf jeder Holzpalette 14 Kartons, die je einen leeren, 23 l fassenden Kanister aus Stahlblech und 1 kg Holzwohle enthielten. Zündquellen wurden von Versuch zu Versuch an unterschiedlichen Positionen und in unterschiedlicher Größe verwendet. Der Bericht /7/ macht hierzu detaillierte Angaben. Am Beispiel eines Versuches aus der Versuchsserie, bei dem mit einer kleinen Zündquelle am Boden vor einer Palette gezündet wurde, sei die Brandausbreitung durch Zahlenwerte veranschaulicht. Die "kleine" Zündquelle war dabei ein Weichfaserstab mit den Abmessungen 10 cm x 3 cm x 0,8 cm, der in Brennspritus getränkt wurde. Die Brandausbreitung lief dabei wie folgt ab:

Die Flammenhöhe war 1,7 m/ 3,4 m/ 5,1 m nach 53 s/ 124 s/ 169 s. Nach 225 s schlugen die Flammen aus der Palette in der ersten Ebene im Zentrum unter der Palette in der zweiten Ebene an. Nach 258 s erreichten die Flammen die Oberseite der zweiten Palettenebene und breiteten sich nach 282 s in die dritte Palettenebene aus. Eine weitere Brandausbreitung erfolgte bei diesen Versuchen nicht, da das Primärziel der Untersuchungen der Wirkungsweise von Löschanlagen galt und diese bei Ansprechen eines Detektors in Betrieb genommen wurden.

Die Autoren /7/ machen zur Brandentwicklung qualitative Angaben, die auszugsweise wiedergegeben werden. Von Einfluß sind demnach besonders die Größe und die Lage der Zündquelle, wobei mit der "großen" Zündquelle (Wanne 1 m x 0,5 m, gefüllt mit 2 l Benzin)

eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche erreicht wurde. Das Zündverhalten bei Verwendung der "kleinen" Zündquelle war stärker von Umgebungsbedingungen abhängig, besonders in den ersten Sekunden der Brandentwicklung. Wenn die Zündquelle an der Frontseite der Palette plazierte wurde, hing die weitere Brandausbreitung in entscheidendem Maße davon ab, wie schnell die Flammen den Weg in die Kanäle zwischen den Paletten fanden, wo sich dann durch den Kamineffekt eine rasante Brandausbreitung einstellte. Wenn die Zündung bereits inmitten des Palettenlagers erfolgte, erhielt man eine rasche Ausbreitung der Flammen von Anfang an, da sich die Zündquelle bereits in den Kanälen befand.

Zur Bestimmung des Abbrandverhaltens von Schaumstoffstapeln wurden an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik 1974 und 1975 von John /8/ Brandversuche durchgeführt. Bezüglich der Brandausbreitung war festzustellen, daß die Geschwindigkeit der Brandausbreitung mit der Zeit zunahm. Wegen der auf 2 m begrenzten Höhe der Schaumstoffstapel ist hier allerdings nur die Wiedergabe der Werte für die ersten zwei Versuchsminuten möglich. In der 1. min bzw. 2. min betragen die von den Flammen vertikal zurückgelegten Wege ca. 0,5 m bzw. 1,5 m. Von Einfluß auf die Brandentwicklung waren geometrische Faktoren wie Spalten und lockere Materialschichtung sowie materialspezifische Faktoren wie Abtropfen und Mitbrennen von Schmelze am Boden und deren Ausbreitung.

Weitere Großbrandversuche, über die von Johnson /9/ und Dean /10/ sowie Delichatsios /11/ berichtet wurde, wurden im Test Center der Factory Mutual Versicherungsgruppe durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen bestand in erster Linie darin, die Wirkungsweise von Löschanlagen bei Bränden in Lägern mit Beteiligung von Kunststoffen als Lagermaterialien zu untersuchen. Einige Vorversuche waren auch als reine Brandtests konzipiert, um das freie Abbrennen zu untersuchen.

Die bei den von Johnson /9/ beschriebenen Versuchen verwendete Brandlast bestand aus je 8 Polyäthylenflaschen mit ca. 1,8 l

Volumen in Wellpappkartons. Jeder Brandlaststapel bestand dabei aus 205 Kartons mit einer Gesamthöhe von ca. 5 m als Blocklager, also ohne Paletten. Bei weiteren Versuchen wurden z.B. Polystyrolbecher mit ca. 0,45 l Volumen und auch solche mit anderen Größen, in Kartons verpackt, verwendet. Dieses Brandgut wurde als Palettenlager eingerichtet. Zusätzlich wurden um insgesamt 18 dieser Stapel weitere angeordnet, bei denen Kartons aus doppel-lagiger Wellpappe verwendet wurden. In diesen befanden sich Poly-äthylenflaschen wie bei den ersten beiden Versuchen. In weiteren Versuchen wurden Trinkbecher aus expandiertem Polystyrol in Wellpappkartons, außerdem flache Schalen aus expandiertem Polystyrol und Beerenschalen in Polyäthylenfolie verwendet. Über die Brandentwicklung bei diesen Versuchen enthält die Veröffentlichung /9/ keine quantitativen Angaben. Es wird lediglich ausgesagt, daß Zwischenräume kleiner als ca. 20 cm wünschenswert seien, um einer zu schnellen Brandausbreitung in vertikaler Richtung vorzubeugen. Im Bild 2 ist der Versuchsaufbau einiger Versuche im Grundriß angegeben.

Dean /10/ beschreibt Versuche in "kleinem" Maßstab (2,44 m (Länge) x 2,59 m (Breite) x 3,96 bis 4,88 m (Höhe)) und solche in "großem" Maßstab (7,62 m (Breite) x 7,62 m (Länge) x 4 bis 5 m (Höhe)). Das Brandgut war aus verschiedenen Kunststoffen ausgewählt worden, ähnlich dem der bei Johnson beschriebenen Versuche. Insgesamt wurden 44 Kleinversuche und 23 Großversuche durchgeführt, mit denen die Unterschiede im Brandverhalten in Abhängigkeit vom eingesetzten Material und der Größe der Zwischenräume zwischen den Stapeln ermittelt werden konnten. Es konnte allerdings kein mathematischer Zusammenhang der Daten zur Brandausbreitung zwischen den Groß- und Kleinversuchen gefunden werden. Delichatsios /11/ hat die Meßwerte zusammengestellt und den Massenverlust abhängig von der Zeit und dem eingesetzten Brandmaterial angegeben. Wegen der zahlreichen Daten wird auf diese Arbeit im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

Weitere Untersuchungen wurden von der europäischen Reifenindustrie, Löschanlagenherstellern und Sachversicherern im Jahre 1971 in Frankreich /12/ durchgeführt, um das Brandverhalten großer Ansammlungen von in Hallen gelagerten Autoreifen und deren Löschmöglichkeiten zu untersuchen.

In einem Prüfbericht /13/ werden Versuche in einem Hochregallager beschrieben, bei denen Entscheidungshilfen für die Festlegung der erforderlichen Anzahl und Aufteilung von Rauchmeldern in Lagerregalen gefunden werden sollten. Als Brandlast wurden Polyurethanschaummatten verwendet. Der Bericht enthält keine Angaben über die Brandentwicklung.

In Vergleichsversuchen wurde das Brandverhalten von Verpackungen aus schwerbrennbarem Polystyrol-Hartschaum und von solchen aus Wellpappe /14/ im Großmaßstab untersucht, um den empirischen Nachweis für eine Neuuzuordnung des Kunststoffmaterials in die Verpackungsklassen der Sachversicherer zu erbringen. Die Verpackungen wurden in Gitterboxen verteilt. Es zeigte sich, daß sich die Wellpappkartons unter den gewählten Versuchsbedingungen ungünstig verhielten. Die Abmessungen der in einer Versuchshalle aufgebauten Versuchsanordnung betragen 3,7 m (Breite) x 4,15 m (Länge) x 5,7 bis 6 m (Höhe).

Martin /15/ berichtet über Vergleichsversuche zur Ermittlung des unterschiedlichen Brandverhaltens von Kartons aus Wellpappe und von solchen aus einer nichtbrennbaren Pappe, die mit schwerentflammbareren Polystyrolschaumplatten gefüllt waren. Diese Versuche wurden im Freien durchgeführt. Dazu wurden die Kartons jeweils in Gitterboxen geschichtet. Die Gesamtabmessungen des Versuchsaufbaus betragen 2,5 m (Länge) x 1,66 m (Breite) x 3,88 m (Höhe). Bei den Verpackungen aus nichtbrennbarer Pappe fand keine Brandfortleitung statt, während die Verpackungen aus Wellpappe zusammen mit der Füllung vollständig verbrannten.

Weitere Untersuchungen betreffen den von Dean /16/ durchgeführten Vergleich des Brandverhaltens von Verpackungen aus expandiertem Polystyrolhartschaum mit und ohne Brandschutzausrüstung im Hinblick auf die Löschmöglichkeiten bzw. Beherrschbarkeit des Brandes durch Deckensprinkler. Die Brandlast war dabei in Wellpappkartons verpackt und als Kompaktlager mit den Abmessungen 6,7 m x 6,7 m (Grundfläche) x 5,3 m (Höhe) aufgeschichtet. Der Grundriß der Lageranordnung entsprach damit ungefähr dem der von Johnson /9/ angegebenen Versuche (Bild 2). Der Brandverlauf war bei der Verpackung ohne Brandschutzausrüstung heftiger als bei dem vergleichend verwendeten Material mit Brandschutzausrüstung (BS). Ein zeitiges Umfallen der Stapel bei dem Versuch mit dem Material mit BS verzögerte die weitere Brandentwicklung; das Feuer breitete sich auch deshalb nicht weiter aus, weil die Sprinkleranlage den Brand beherrschte. Ein Zusammenfallen der Stapel ohne BS führte ebenfalls zu einer Verminderung der offenen Flammen. Durch das Umfallen wurde der Brand allerdings auf nebenstehende Stapel übertragen und der Brand flammte wieder auf. Es wurde jedoch auch hier der Brand durch die Sprinkleranlage erfolgreich niedergehalten und gleichmäßig reduziert.

Aus dem Versuchsablauf ist der sehr schnelle zeitliche Anstieg der Flammen entlang der Oberflächen der Verpackung zu entnehmen. Bezüglich der vertikalen Brandausbreitung ist bei dem Material mit BS folgender Ablauf wiedergegeben (Zeit in Sekunden/ Höhe in m):  
18/0,9; 25/1,8; 45/2,7; 55/5,3;

die Vergleichswerte bei dem Material ohne BS:  
15/0,6; 30/1,2; 40/2,1; 50/3,9; 54/5,3.

Ein Unterschied ist also bezüglich der zeitabhängigen Zunahme der Flammenhöhe kaum festzustellen, was im wesentlichen zunächst auf den gleichen Umkarton zurückzuführen ist. Erst wenn dieser durchgebrannt ist, wird der Einfluß des jeweiligen verpackten Materials sichtbar. Es zeigte sich bei diesen Vergleichsversuchen, daß das Material mit BS eine wesentlich stärkere Verqualmung des Versuchsstandes zur Folge hatte als das Material ohne BS.

Ebenfalls bei FM wurde mit einem gesprinklerten und einem ungesprinklerten Abbrandversuch das Brand- und Löschverhalten eines Zwei-Komponenten Polyurethan-Verpackungsschaumes mit Brandschutzausrüstung untersucht /17/, wobei die Lageranordnung im mittelgroßen Maßstab verwendet wurde ( bei FM als "Intermediate Scale Fire Test" bezeichnet) und Deckensprinkler zum Einsatz kamen. Der Grundriß und die Seitenansicht der Lageranordnung für einen solchen Versuch sind im Bild 3 wiedergegeben. Dem Bild ist ebenfalls die Lage der Zündquelle aus 4 Zellstoffrollen, jede 76,2 mm lang x 76,2 mm Durchmesser und mit jeweils 118 ml Fahrbenzin getränkt, zu entnehmen. Die Wellpappkartons als Umverpackung wurden vollständig mit dem Verpackungsschaum gefüllt. Bei beiden Versuchen war die vertikale Brandausbreitung sehr schnell. Nach ca. 1/2 Minute waren die Flammen bereits 3 m hoch (Stapelhöhe). Bei dem Versuch des freien Abbrennens folgte einer Phase rascher Brandausbreitung eine Phase vergleichsweise unkritischen Abbrennens mit starker Rauchentwicklung. Während die weiter oben gelegenen Kartons samt Füllung weitgehend verbrannten, war die Ausbreitung vom Zündort in horizontaler Richtung offenbar weniger stark.

Von Falkengaard und Steffensen /18/ wird über das Brandverhalten von Bierkästen aus Polyäthylen berichtet, die inzwischen solche aus Holz weitgehend verdrängt haben, wobei Vorteile im Gebrauchsnutzen (Verrottung, Stapelfähigkeit, Wiederverwendbarkeit) im Vordergrund stehen. Die Autoren erwähnen dabei auch Versuche, die im Jahre 1971 stattgefunden haben, um das Brandverhalten von Holz- und Plastik Kästen zu vergleichen. Es wurden dabei allerdings weder Temperatur- noch Strahlungsmessungen durchgeführt. Solche Messungen wurden erst bei Großversuchen im Jahre 1983 unternommen, bei denen Unterschiede im Brandverhalten von leeren Bierkästen aus Polyäthylen, und von Bierkästen, die mit leeren und mit gefüllten Bierflaschen bestückt waren, ermittelt werden sollten, um das Brandrisiko nach Angabe der Autoren in geschlossenen Räumen und im Freien abschätzen zu können. Es wurden zwei Versuche mit mehr als 2000 Kisten pro Versuch aufgebaut. Es wurden das Zündverhalten von leeren und gefüllten Kisten, die

Brandentwicklung und -intensität, die Rauchentwicklung, die Brandausbreitung auf die Nachbarstapel zur Bestimmung der erforderlichen Gangbreiten sowie die Wärmestrahlungs- und Temperaturentwicklung gemessen. Bei beiden Versuchen wurden jeweils 3 Stapel aufgebaut: ein Hauptstapel und zwei Seitenstapel. Die Versuche zeigten, daß die Brandausbreitung in den leeren Kisten rascher war als in den Kisten mit den leeren Flaschen. Ursache dafür war vermutlich die Wärmekapazität der Flaschen und die behinderte Luftströmung in Kisten mit Flaschen. Solange es nur in den Kisten brannte und keine Polyäthylenschmelze ablief, waren Brand- und Rauchentwicklung gering, als aber die Kisten schmolzen und der Brand in einen Flüssigkeitsbrand übergang, nahmen Brand- und Rauchentwicklung stark zu. Bei gefüllten Flaschen war die Brandentwicklung nochmals langsamer. Hierzu trug die Abkühlung durch platzende Flaschen, die hohe Wärmekapazität der Flaschen und die Tatsache bei, daß sich praktisch kein Schmelzen und Abtropfen einstellte und es somit nicht zum Flüssigkeitsbrand am Boden kam. Die Autoren fassen die Versuchsergebnisse wie folgt zusammen:

- a) Sowohl leere Bierkästen als auch mit vollen Flaschen gefüllte können leicht gezündet werden.
- b) In der Startphase ist die Brandentwicklung harmlos. Nach der Bildung einer ablaufenden und am Boden brennenden Schmelze nimmt der Brand stark an Heftigkeit zu.
- c) Beim vollentwickelten Brand ist bei leeren Kästen die Brand- und Rauchentwicklung sehr stark.
- d) Kästen mit leeren Flaschen können durch Wärmestrahlung des brennenden Nachbarstapels gezündet werden, bei nachfolgend geringerer Brandentwicklung als bei leeren Kisten.
- e) Abstände zwischen Stapeln von 3 bis 5 m reichen nicht aus, um eine Brandübertragung durch Strahlung zu verhindern, die Abstände müssen hierfür wesentlich größer sein.
- f) In Kästen mit gefüllten Bierflaschen ist die Brandentwicklung sehr langsam. Besonders bei kleiner Zündquelle ist eine langsame Brandausbreitung zu erwarten. Das aus platzenden Flaschen herauslaufende Bier löscht den Brand nicht, dämpft ihn aber sehr.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen auf, was bisher in der frei zugänglichen Literatur über Brandversuche an gelagerten Stoffen in den üblichen Verpackungen berichtet wurde. Eine Einbeziehung des Brandverhaltens von Aerosolsprühdosen wurde dabei in dieser Arbeit nicht vorgenommen, aber auch hierzu wurden Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse in die Beurteilung der Versicherer Eingang gefunden haben.

Das Literaturstudium hat allerdings aufgezeigt, daß, von wenigen Ausnahmen abgesehen, quantitativ verwertbare Daten kaum vorliegen. Im Zweifelsfall muß also eine geeignete Löschanlage noch durch einen den realen Bedingungen entsprechenden Brand- und Löschanlage ermittelt werden, da die breite Basis zur Berechnung der Brandausbreitung bei vorgegebenem Lagergut und zur Berechnung der Löschwirksamkeit einer Anlage noch fehlt. Daß solche Versuche häufig durchgeführt werden, ist bekannt. Allerdings werden die Versuchsergebnisse aus Wettbewerbsgründen oft unter Verschuß gehalten.

### 3. BRANDAUSBREITUNG- AUSWERTUNG VON BRANDVERSUCHEN IM REALMASSTAB

Eine Auswertung von Großversuchen, insbesondere bezüglich der Brandentwicklung, liegt von Delichatsios /11/ vor. In dieser Veröffentlichung wurden die Abbrandgeschwindigkeiten der unterschiedlichsten gelagerten Stoffe, deren Abbrandverhalten in den 70er Jahren bei FM untersucht worden war, zusammengestellt. Es zeigte sich bei der Bewertung der Abbranddaten (zeitlicher Massenverlust, Wärmefreisetzung), daß der Massenverlust allgemein durch eine Gleichung

$$M = a \cdot t^b \quad (1)$$

dargestellt werden kann.  $M$  ist dabei die in der Zeit  $t$  verbrannte Masse, der Faktor  $a$  und der Exponent  $b$  sind von verschiedenen Einflüssen abhängig. Es sind dies die Eigenschaften der Stoffe (Kunststoffe, Karton) wie Zündtemperatur, Dichte, spezi-

fische Wärme, Schmelz- und Zersetzungsvorgänge und die Wärmeabgabe bei der Verbrennung durch Strahlung und Konvektion. Außerdem sind der Volumenanteil des brennbaren Materials in der Lagerung, sowie die äußere Form des Guts, gekennzeichnet durch das Oberflächen/Volumenverhältnis, und die Form der Flammenausbreitung im Lager (eben oder zylindrisch) von Einfluß. Ein Ergebnis der Auswertung ist, daß die Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit steigender Volumenkonzentration abnimmt. Wenn Güter in Kartons mit Facheinteilung verpackt werden, resultiert daraus eine größere Abbrandgeschwindigkeit (Luftzutritt) als ohne Facheinteilung.

Der Tabelle 4 ist zu entnehmen, welchen Einfluß das gewählte Material auf die Zeitabhängigkeit des Abbrandes hatte. So ergab sich z.B. bei Verbrennung von Pappkartons für den Exponenten  $b$  der Wert 2 in Gleichung (1), bei Verbrennung bestimmter Kunststoffe ergaben sich Werte für  $b$  bis zu 12. Der Autor setzt die Wärmeentwicklung, d.h. die zeitliche Änderung der Wärmefreisetzung, in Beziehung zur tatsächlich im jeweiligen Moment freigesetzten Wärme und schlußfolgert aus der Gegenüberstellung der Werte von verschiedenen Versuchen, daß für die Beurteilung des Brandrisikos, auch bezüglich der Löschmöglichkeit, nur beide Größen eine Aussage zulassen. Denn eine rasche Brandausbreitung gepaart mit einer bereits großen Wärmefreisetzung macht den Löscherfolg unwahrscheinlicher, als wenn eine der beiden Größen noch gering ist. Der Tabelle 4 ist zu entnehmen, daß bei den Versuchen des Jahres 1979 die Wärmeentwicklung heftiger als bei den Versuchen von 1974 war.

Während im Teil a) der Tabelle 4 die Abbrandmasse überwiegend dem Quadrat der Zeit proportional ist, ist sie beim Teil b), wie nachfolgende Überlegung zeigt, der dritten Potenz der Zeit proportional. Dies folgt aus der Angabe in der Tabelle 4, daß der freigesetzte Wärmestrom in  $W$  von der Zeit zum Quadrat abhängt. Wenn die Abbrandmasse  $M \sim t^2$  ist, dann ist der zeitliche Massenverlust  $\dot{M} = dM/dt \sim t$  und die freigesetzte Wärmemenge

$\dot{Q} = \dot{M} \cdot H_u \sim t$ . Wenn aber  $Q \sim t^2$ , dann ist  $M \sim t^3$ . Der Autor /11/ führt diese zwischen den Versuchsreihen festgestellten Unterschiede auf die geometrischen Verhältnisse zurück. Bei den Tests 1979 breiteten sich die Flammen symmetrisch in radialer Richtung vom Zündort weg aus, während sie sich bei den Tests 1974 nur in einer Richtung vertikal im Gang zwischen den Paletten ausbreiteten.

Eine weitere quantitative Bewertung findet man bei Alpert und Ward /19/. Sie geben bezüglich der vertikalen Brandausbreitung an, daß die Flamme entsprechend einem Exponentialgesetz an Höhe zunimmt. Dies läßt sich folgendermaßen beschreiben: Wenn z.B. innerhalb von 1 Minute die Flamme von 1 m auf 2 m Höhe anwächst, dann wird sie in der nächsten Minute auf 4 m, in einer weiteren Minute auf 8 m usf. ansteigen. Der benötigte Zeitabschnitt, in dem eine Flamme ihre Flammenhöhe an einer senkrechten Wand eines bestimmten Materials verdoppelt, wird in der Originalveröffentlichung als "doubling time" (Verdoppelungszeit) bezeichnet. Wenn diese Verdoppelungszeit bekannt ist, dann kann die Zeit für eine Brandausbreitung bis zu einer bestimmten Höhe abgeschätzt werden. In der Brandentwicklungsphase kann man zudem annehmen, daß die Wärmefreisetzung aus der Verbrennung der Verpackung, welche zunächst überwiegend vom Brand erfaßt wird, der Zunahme der Flammenhöhe direkt proportional ist, also die prinzipiell gleichen mathematischen Zusammenhänge anwendbar sind. Dies ist im Bild 4 illustriert. Diesem Vorgang liegt die folgende Gleichung für die exponentiell zeitabhängige Änderung der freigesetzten Wärme ab einer bestimmten, z.B. durch die Größe der Zündquelle festgelegten, Grundwärmefreisetzung  $\dot{Q}_0$  zugrunde:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot \exp(\alpha t) \quad (2)$$

Setzt man beim Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Bränden den Anfangswert  $\dot{Q}_0$  als konstante Größe an, die für alle Brände gleich sein soll, dann unterscheiden sich die im Laufe der Zeit freigesetzten Wärmen  $\dot{Q}$  nur um die Größe des jeweiligen  $\alpha$ . Die "Verdoppelungszeit" ist dabei gleich der Größe  $0,693/\alpha$ , wie sofort aus Gleichung (2) folgt:

Wenn  $\dot{Q}_2 = 2 \cdot \dot{Q}_1$ , dann ist  $\exp(\alpha t_2) = 2 \cdot \exp(\alpha t_1)$  und  $t_2 = 0,693/\alpha + t_1$ . Also ist  $0,693/\alpha$  die Zeit, die ein Brand benötigt, um die doppelte Wärmemenge, bezogen auf einen Anfangszeitpunkt  $t_1$  freizusetzen. Dies gilt im Falle einer annähernd auf die vertikale Richtung beschränkten Brandausbreitung in der Anfangsphase eines Brandes sinngemäß auch für die Höhenzunahme des Brandes, siehe Bild 4. Ein Auszug aus einer von Friedman /20/ angegebenen Aufstellung über "Verdoppelungszeiten" von Bränden in den Labors der FM-Gruppe ist in der Tabelle 5 im Anhang angegeben. Da jedoch die von Friedman zugrundegelegte Meßgröße der zeitliche Massenverlust war, der mittels einer Abbrandwaage gemessen wurde, läßt sich kein direkter Rückschluß auf die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung ziehen. Hierzu müßte man gleichzeitig Meßwerte über die Eindringtiefe der Flammen in das Material in Zündquellennähe haben, wo der Brand ja bereits länger andauert als dort, wo erst die Verpackung und noch nicht das verpackte Gut von der Flammenausbreitung betroffen ist und auch Meßwerte über das Fortlaufen der Flammen über die Oberfläche der Verpackung.

Sobald der Brand den gesamten Lagerabschnitt erfaßt hat, stellt sich jedoch eine nahezu konstante Abbrandrate ein. Meßwerte zur Wärmefreisetzung bei Bränden in der Phase konstanten Abbrandes geben die Autoren /19/ für verschiedene Brände von Feststoffen an, zum Vergleich auch für solche von Flüssigkeiten. Wenn diese Werte und die Menge an Material bekannt sind, läßt sich die Gesamtbranddauer abschätzen, mit der gerechnet werden muß, wenn keine Löschmaßnahmen ergriffen werden. Diese Meßwerte für im Freien abbrennende Brandstoffe werden in der Tabelle 6 und für verschiedene andere gelagerte Waren in der Tabelle 7 der Vollständigkeit halber wiedergegeben, obwohl sie mit dem Thema "Brandausbreitung" nur noch bedingt in Zusammenhang gesehen werden können. Dem Verfasser der hier vorliegenden Arbeit erscheint es jedoch nach Kenntnis der spärlichen deutschsprachigen Literatur zu diesem Fachgebiet notwendig, die im Ausland in umfangreichen Versuchsreihen gewonnenen Erfahrungen allgemeiner zugänglich zu machen. Des weiteren nehmen die Autoren zum Feuerrisiko

Stellung. Dieses kann nicht nur durch die kritische Größe Brandlast in  $\text{kg/m}^2$  angegeben werden, sondern es muß auch die Brandentwicklung nach einer erfolgten Zündung berücksichtigt werden.

Für die Möglichkeit einer erfolgversprechenden Brandbekämpfung ist es sicherlich wichtig zu wissen, ob der Brand bereits eine kritische Größe erreicht hat. Die Autoren /19/ schlagen folgende Einteilung für die Risikogröße der Brandentwicklungszeit bis zu einer angenommenen Grenze von 1 kW Wärmefreisetzung vor:

- langsam - über 300 Sekunden,
- mäßig - 150 bis 300 Sekunden,
- schnell - 80 bis 150 Sekunden, und
- sehr schnell - unter 80 Sekunden.

Angaben zu dieser Brandentwicklungszeit sind ebenfalls in Tabelle 7 wiedergegeben. Es findet sich dabei ein Großteil der Brandlasten aus den vorangehenden Tabellen wieder. Wenn man bezüglich der Wärmefreisetzung (linke Spalte in Tabelle 7) ebenfalls nach dem Vorschlag der Autoren /19/ folgende Einteilung vornimmt:

- 0 bis  $500 \text{ kW/m}^2$  - geringe Wärmefreisetzung,
- 500 bis  $4000 \text{ kW/m}^2$  - mäßige Wärmefreisetzung, und
- über  $4000 \text{ kW/m}^2$  - große Wärmefreisetzung,

so lassen sich beispielsweise Lageranordnungen mit sehr schneller Brandausbreitung, aber mäßiger Wärmefreisetzung finden, wie PU-Schaumplatten. Dagegen sind z.B. PP-Tuben in Kartons, 4,57 m hoch gestapelt, eine Brandlast mit rascher Brandentwicklung und hoher Wärmefreisetzung.

#### 4. ERMITTLUNG VON STOFFEIGENSCHAFTEN

Die Zündung und Ausbreitung eines Brandes über Oberflächen von Feststoffen werden von den Einflußgrößen Fremd (Zünd-)energie, Materialdicke, Vorheizung und anderen bestimmt. Nach der Entfernung der Zündquelle tragen bei der weiteren Brandausbreitung die im Bild 5 eingetragenen Anteile zur Energiebilanz bei. Da in der Ausbreitungsphase des Brandes im Lager bevorzugt die Verpackung

ins Brandgeschehen einbezogen ist, gilt deren Verhalten besonderes Interesse. Wraight/21/ hat in Laborversuchen die Zündung von Wellpappkarton durch Wärmestrahlung untersucht. Als Materialien verwendete er zwei einlagige Sorten mit 2,8 mm bzw. 4,6 mm Gesamtdicke und eine zweilagige Sorte mit 7,5 mm Gesamtdicke. Diese wurden einer Wärmestrahlungsquelle mit Strahlungsdichten zwischen  $14 \text{ kW/m}^2$  und  $80 \text{ kW/m}^2$  ausgesetzt. Bei den Versuchen wurden sowohl solche mit einer zusätzlichen Zündflamme oberhalb der vertikal in eine Halterung eingesetzten Proben durchgeführt als auch solche ohne Zündflamme, um eine spontane Selbstentzündung zu erreichen. Wraight hat als minimal notwendige Zündenergien für Selbstentzündung für die drei Kartonsorten  $16,5 \text{ kW/m}^2$  bis  $17,5 \text{ kW/m}^2$  gefunden; bei zusätzlicher Zündflamme oberhalb der Kartons zur Zündung der infolge der Wärmeeinstrahlung aus dem Material freiwerdenden Zersetzungsgase werden Werte von  $15,0 \text{ kW/m}^2$  bis  $15,5 \text{ kW/m}^2$  angegeben. Zum Vergleich dienen die minimalen Zündenergien für Fichtenholz ("european whitewood") von  $52 \text{ kW/m}^2$  (ohne Zündflamme) bzw.  $16 \text{ kW/m}^2$  (mit Zündflamme).

Wraight zieht mehrere Schlußfolgerungen aus seiner Arbeit:

- die benötigte Zündenergie für Kartons liegt zwar bei zusätzlicher Verwendung einer Zündflamme in der Gegend des Wertes für weiche Hölzer, ohne Zündflamme ist diese bei Holz jedoch ca. 3 mal so hoch,
- die Materialdicke ist auf den Zündzeitpunkt ohne Einfluß
- die Orientierung der Wellen des Wellpappkartons, ob horizontal oder vertikal, ist praktisch für die Zündzeiten ohne Bedeutung.

Bild 6 zeigt Mittelwertkurven für die Zündung durch Wärmestrahlung ohne bzw. mit zusätzlicher Zündflamme aus der Arbeit von Wraight. In dieses Bild wurden ebenfalls Werte eingetragen, die unter Verwendung der Prüfapparatur nach ISO/TR 3814 bei 5 mm dicker, 2-lagiger Wellpappe von Becker et.al. /14/ ermittelt wurden.

Bei Alpert und Ward /19/ ist die dort als allgemeingültig bezeichnete Aussage zu finden, daß die meisten brennbaren Stoffe bei Vorhandensein einer kleinen Zündflamme bereits mit einer Wärme-

einstrahlung von ca.  $18 \text{ kW/m}^2$  innerhalb weniger Minuten gezündet werden können. Dies ist bedeutsam, wenn aufgrund der Wärmeabstrahlung von brennenden Lagerstapeln mit einer Zündung angrenzender Stapel durch Wärmestrahlung zu rechnen ist.

Eine weitere Stoffeigenschaft, die im Labor unter konstanten Bedingungen gemessen werden kann, ist die Geschwindigkeit, mit der die Wärmefreisetzung an einem bestimmten Produkt, z.B. einer Verpackung oder einem Füllmaterial erfolgt, und die dabei auftretende, zeitabhängig freigesetzte Wärmemenge. Diese Größen können zu Grenzbelastungsbetrachtungen verwendet werden, gleich der im vorigen Abschnitt bei Alpert und Ward /19/ genannten. Die Messung der Wärmeabgabe nach der Zündung erfolgt in einem besonderen Ofen, wie er z.B. von Walton und Twilley /22/ beschrieben wurde. Dabei wird eine Materialprobe mit Wärmestrahlung beaufschlagt und die Zersetzungsgase werden mithilfe einer Zündflamme gezündet. Die entstehende Wärme durch die Verbrennung der Zersetzungsgase aus der Materialprobe führt zu einer Erhöhung der Abgastemperatur im Kamin des Laborofens, der vor dem Versuch mit einer Gasflamme kalibriert wurde. Aus der Temperaturerhöhung des Abgasstroms läßt sich nun die freigesetzte Wärmemenge bestimmen. Dieses Verfahren findet insbesondere auch Anwendung bei den verschiedensten Baustoffen. Zur Veranschaulichung des Vorganges der zeitlich abhängigen Wärmefreisetzung bei Wärmebelastung von außen dient Bild 7, in dem für eine Materialprobe aus Polyurethanhartschaum die Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit (HRR, " Heat Release Rate ") in Abhängigkeit von der Zeit, mit der Wärmestrahlung als Parameter, aufgetragen wurde.

Chamberlain /23/ hat die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung bei Bauhölzern und anderen Baustoffen aus Holz wie z.B Spanplatten mit diesen Modellmaßstab-Kalorimetern untersucht, um Erkenntnisse über die Einflüsse des Feuchtegehaltes der Materialprobe und auch der Vorbehandlung mit Flammschutzmitteln zu erhalten. Er fand bei den Vergleichsversuchen, daß eine Zunahme der relativen Feuchtigkeit der Stoffe die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung (HRR)

verringert. Es tritt ebenfalls eine Verringerung bei der Zugabe von Flammenschutzmitteln ein. Vergrößert wird hingegen der Wert der Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit bei Zunahme der Dichte der Materialien. Chamberlain fand eine lineare Abhängigkeit der Form

$$\text{HRR} = a \cdot \rho + b \quad (3)$$

Von ebensolchem Einfluß ist die Wärmestrahlung. Hier besteht allerdings ein nichtlinearer Zusammenhang. Die Zunahme der Wärmestrahlung erhöht dabei die Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit überproportional. Der Maximalwert der Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit liegt z.B. bei der Beaufschlagung des Probekörpers mit einer Wärmestrahlung von  $60 \text{ kW/m}^2$  (dies entspricht einer Schwarzkörpertemperatur von  $741 \text{ }^\circ\text{C}$ ) für Bauhölzer bei ca.  $100\text{--}135 \text{ kW/m}^2$  und erreicht bei andern von Chamberlain untersuchten Stoffen auf Holzbasis bis zu  $380 \text{ kW/m}^2$ . Zum Vergleich für ein anderes organisches Produkt findet man bei Walton und Twilley für PU-Hartschaum bei  $60 \text{ kW/m}^2$  Wärmebeaufschlagung einen Wert für die Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit von ca.  $240 \text{ kW/m}^2$ . Auf eine andere Möglichkeit der Messung dieser Größe im Prüfofen, nämlich durch die Messung des bei der Verbrennung verbrauchten Sauerstoffs, die als Änderung der Sauerstoffkonzentration im Kamin meßbar ist, wie bei Huggett /24/ beschrieben, soll hier nicht weiter eingegangen werden. Werte zur Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit von Wellpappkartons konnten in der gesichteten Literatur bisher nicht gefunden werden.

Wenn die Umgebungsbedingungen für einen bestimmten Stoff identisch sind, dann ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit über die Oberfläche dieses Stoffes nur von den physikalischen Stoffeigenschaften und von der chemischen Zusammensetzung des Stoffes abhängig. Im vorliegenden Fall des Lagerbrandes ist besonders die vertikale Probenanordnung von Interesse. Während zur Bestimmung der Brandausbreitung zur Seite und nach unten zahlreiche experimentelle und theoretische Arbeiten in der Literatur zu finden sind, ist die vertikal nach oben gerichtete Brandausbreitung

noch kaum erforscht. In einer der wenigen Literaturstellen zu diesem Thema findet man bei Sibulkin und Kim /25/ Angaben über die Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v$  der vertikal nach oben gerichteten Flammenausbreitung von der eingestrahlten und konvektiv an die Oberfläche übertragenen Wärmemenge, der Zünd- und der Oberflächentemperatur, den Stoffgrößen  $\lambda, \rho$  und  $c$  und der "Vorwärm-  
länge  $\delta$ ". Die Autoren geben an, daß

$$v = \frac{\dot{q}^2 \cdot \delta}{\lambda \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{zünd}} - T_0)^2} \quad (4)$$

ist, wobei die "Vorwärm-  
länge  $\delta$ " etwa der Flammenlänge oberhalb der bereits brennenden Oberfläche entspricht. Hierbei bereiten die Bestimmung der Wärmemenge und der Größe der Vorwärm-  
länge besondere Schwierigkeiten, weshalb die oben angegebene Abhängigkeit im gegenwärtigen Zeitpunkt bevorzugt qualitativ gesehen werden sollte. Die Autoren haben diesen Zusammenhang an einem Brandversuch mit Acrylglas überprüft. Solange jedoch noch keine für die Praxis verwendbaren Berechnungsmöglichkeiten vorliegen, ist man auf praxisnahe Versuche angewiesen, um das Brandrisiko abzuschätzen. Bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde deshalb mit Brandversuchen an gelagerten Stoffen im realen Maßstab in dem von Schatz /5/ beschriebenen Versuchsstand begonnen. Eine Beschreibung der Versuche und deren Bewertung wird im Bericht über den Teil 2 dieses Forschungsvorhabens erfolgen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

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. Der vorliegende Bericht beschreibt Brandversuche, die im Labormaßstab und in realem Maßstab in den vergangenen Jahren bei verschiedenen Institutionen durchgeführt wurden und geht auf Veröffentlichungen ein, in denen die Ergebnisse dieser Versuche qualitativ ausgewertet wurden. Die dabei gefundenen Zusammenhänge reichen allerdings nur in beschränktem Umfange zur Beurteilung von Lagerrisiken aus.

Aus diesem Grunde sind Arbeiten notwendig, welche die Brandausbreitungsvorgänge auf physikalischer Grundlage berechenbar machen. Ansätze hierzu sind in der Literatur zu finden. Die Anwendung der vorgeschlagenen Gleichung zur Beschreibung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit erfordert allerdings noch Vergleichsmessungen an Brandversuchen im realen Maßstab, sowie Messungen im Labormaßstab zur Bestimmung der physikalischen Stoffgrößen, die für den Zündvorgang von Bedeutung sind.

## 6. FORMELZEICHEN

a	Faktor
b	Exponent, Summand
c	spezifische Wärmekapazität
$H_u$	unterer Heizwert
m	Abbrandfaktor m nach DIN 18230 Teil 1
M	Abbrandmasse
$\dot{M}$	zeitlicher Massenverlust
$\dot{q}$	Wärmestrahlungsdichte
$\dot{Q}$	zeitliche Wärmefreisetzung
t	Zeit
T	Temperatur
v	Geschwindigkeit der vertikal gerichteten Flammenausbreitung
$\alpha$	$0,693/\alpha =$ "Verdoppelungszeit"
$\delta$	Vorwärm länge
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	Dichte

### Indices

o	Anfangswert
O	Oberfläche
zünd	Wert bei Zündung

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Nash, P.: Experimentelle Untersuchungen über Brandmeldung und -kontrolle in Hochregalanlagen. Fire International 31(1971), S.18-29
- /2/ Young, R.A., Nash, P.: The fire protection of modern high bay storages. Fire Prevention Science and Technology 18(1977), S.4-13
- /3/ Unverbindliche Prämienrichtlinien für die Industrie-Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungsversicherung.  
Sowie: Erläuterungen zu den Prämienrichtlinien für die Industrie-Feuer und Feuer-Betriebsunterbrechungsversicherung.  
  
Verband der Sachversicherer e.V., Köln
- /4/ Richtlinien für Sprinkleranlagen.  
Planung und Einbau  
Form 3003 1/81  
Verband der Sachversicherer e.V., Köln
- /5/ 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 Feuerwehrangelegenheiten (1985)

- /6/ DIN 18230, "Baulicher Brandschutz im Industriebau".  
Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /7/ Rogers, S.P., Young, R.A.: The Protection of High-racked Storages by Commercial Zoned Sprinkler-Systems. Fire Research Note 1068, April 1977. Fire Research Station, Borehamwood, England
- /8/ John, R.: Brandverhalten von Kunststoffen. Orientierende Brandversuche an Polyäthylenschaumstoffen. Nichtveröffentlichter Bericht, April 1974 sowie  
Brandverhalten von Kunststoffen. Feuerrisiko bei der Lagerung von verschiedenen Kunststoffen mit und ohne Brandschutz-ausrüstung.  
Nichtveröffentlichter Bericht, Februar 1975  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)
- /9/ Johnson, R.S.: Controlling Plastic Materials Fires in Warehouses.  
Fire Journal 71(1977), Heft 3, S.43-45
- /10/ Dean, R.K.: A Final Report on Fire Tests Involving Stored Plastics.  
Fire Technology 12(1976), Heft 1, S.55-65
- /11/ Delichatsios, M.A.:  
A Scientific Analysis of Stored Plastic Fire Tests.  
Fire Science and Technology 3(1983),  
Heft 2, S.73-103

- /12/ Extinction de Feux de Pneumatiques.  
Versuchsbericht November 1971.  
Syndicat National du Caoutchouc, des  
Plastiques et des Industries qui s'y  
rattachent.  
9, Avenue Hoche, Paris (8<sup>e</sup>)
- /13/ Prüfbericht über Anordnung automatischer  
Rauchmelder in Regalen.  
Brandverhütung 159(1983), S.41-43
- /14/ Becker, W., Bericht über Brandversuche an Verpackungen aus  
Neff, H., schwerbrennbarem Polystyrol-Hartschaum.  
Tiedtke, K.: Verband der Sachversicherer e.V., Köln, 1981.
- /15/ Martin, K.: Nichtbrennbare Pappe - eine neue Alternative  
für den Brandschutz in Lagerbereichen.  
Der Maschinenschaden 56(1983), Heft 3, S.108-113
- /16/ Dean, R.K.: Large-Scale Fire Tests of Expanded Polystyrene  
Packaging Material.  
FMRC-Report 22543, Dezember 1976.  
Nicht veröffentlichter Bericht für The  
Society of the Plastics Industry
- /17/ Spencer, C.A.: Guardpak Foamed Polyurethane Material.  
FMRC-Report OJ1AO.AC, September 1984  
Nicht veröffentlichter Bericht für  
Sealed Air Corporation
- /18/ Falkengaard, O., Steffensen, J.:  
Plastølkassers brandforhold. Resultater og  
konklusion fra storskalaforsøget.  
brandvaern 3/84, S.6-10

- /19/ Alpert,R.L., Evaluating Nonsprinklered Fire Hazards.  
Ward,E.J.: SFPE Technology Report 83-2.  
Society of Fire Protection Engineers,Boston, 1983
- /20/ Friedman,R.: Quantification of Threat from a Rapidly Growing  
Fire in Terms of Relative Material Properties.  
Fire and Materials, Vol.2, No.1, 1978
- /21/ Wraight,H.: The Ignition of Corrugated Fibreboard ("Cardboard")  
by Thermal Radiation.  
Fire Research Note No.1002, Fire Research  
Station, Borehamwood, Herts.,England, 1974
- /22/ Walton,W.D.; Heat Release and Mass Loss Rate Measurements  
Twilley,W.H.: for Selected Materials.  
Report NBSIR 84-2960, National Bureau of  
Standards, Department of Commerce,  
Washington, D.C., USA, 1984
- /23/ Chamberlain,D.L.:  
Heat Release Rate Properties of Wood-Based  
Materials.  
Report NBSIR 82-2597, National Bureau of  
Standards, Department of Commerce,  
Washington, D.C., USA, 1982
- /24/ Huggett,C.: Estimation of Rate of Heat Release by  
Means of Oxygen Consumption Measurements.  
Fire and Materials, Band 4, Heft 2, 1980,S.61-65
- /25/ Sibulkin,M., The Dependence of Flame Propagation on Surface  
Kim,J.: Heat Transfer,II.Upward Burning.  
Combustion Science and Technology 1977,  
Vol.17, S.39-49

## 8. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1: Einteilung in Lagerrisiken.

Auszug aus den Prämienrichtlinien des VdS nach /3/.

Schadenerfahrungen im In- und Ausland haben in der Vergangenheit deutlich aufgezeigt, daß Läger aller Art aufgrund ihrer Wertkonzentration und ihrer teils hohen Brandbelastung für die Feuerversicherer exponierte Risiken sind. Über 50% aller Brände entstehen in Lagerrisiken.

Bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials eines Lagers sind eine Vielzahl von Kriterien zu berücksichtigen:

1. Brennbarkeit des Lagergutes
  - Brandbelastung
  - Zündverhalten
  - Gefahr der Selbstentzündung
2. Empfindlichkeit des Lagergutes gegen Rauch, korrosive Gase, Löschwasser
3. Brennbarkeit der Verpackungen und der Lager und Transporthilfen einschließlich Regalen
  - Brandlast
  - Zündverhalten
4. Größe der Lagerfläche (je Komplex im Sinne der Prämienrichtlinien)
  - Gefahr der Verrauchung
  - Einschränkung der Angriffsmöglichkeiten der Feuerwehr
5. Höhe der Lagerung
  - Gefahr der schnellen Brandausbreitung
  - Einschränkung der Angriffsmöglichkeiten der Feuerwehr
6. Ortsfeste Feuerlöschanlagen

Fortsetzung Tabelle 1:

Als Ergebnis wird unterschieden in Läger

- geringster Gefahr
- geringer Gefahr
- mittlerer Gefahr
- höherer Gefahr
- höchster Gefahr,

wobei die Prämienrichtlinien in Tabellenform Anhaltswerte für bestimmte Güter und deren Umverpackungen angeben.

Bezüglich des Punktes 3. in obiger Auflistung wird zwischen fünf verschiedenen Verpackungsarten unterschieden:

- VP 1 - ohne Verpackung
- VP 2 - nichtbrennbare Verpackung, allseitig umschließend und formstabil
- VP 3 - nur brennbarer Kantenschutz als Verpackung
- VP 4 - Verpackung aus Holz, Pappe, Papier, Folien, ungeschäumten Kunststoffen oder mit Kantenschutz aus Schaumstoffen sowie Verpackungen aus gekennzeichneten schwer entflammenden Schaumkunststoffen
- VP 5 - Schaumkunststoffe als äußere oder innere Verpackung, sofern mehr als nur Kantenschutz

Die Verpackungsart VP 2 hat dabei eine gewisse Schutzfunktion - zumindest über einen kurzen Zeitraum kann sie bei manchen Lagergütern deren Entflammen verhindern. Verpackungen aus dünnen nichtbrennbaren Folien haben diese Schutzfunktion nicht und sind daher zu Kategorie VP 1 zu rechnen.

Die übrigen Verpackungsarten VP 3 bis VP 5 stellen bei den meisten Lagergütern eine Gefahrerhöhung dar.

Fortsetzung Tabelle 1:

Einige Besonderheiten sind zu beachten, die die Bewertung des Gefahrenpotentials weiter beeinflussen:

1. Auch ohne Verpackung sowie bei nichtbrennbarer Verpackung führt die Lagerung auf Holzpaletten zur Einstufung nach VP 3.
2. Werden z.B. Kunststoff- oder Holzkisten oder -Lagerbehälter eingesetzt, gelten auch sie als brennbare Verpackung.
3. Bei der Einstufung von Flüssigkeiten und Konserven werden die Dosen, Flaschen usw. nicht als Verpackungen angesehen, sondern erst die Umkartons, Folien und sonstigen weiteren Verpackungen um die Dosen und Flaschen herum. Sollten die Dosen, Flaschen usw. jedoch aus brennbaren Stoffen, z.B. Kunststoff, bestehen, gelten diese als brennbare Verpackung.
4. Kantenschutz, der über 20% der Oberfläche des Lagergutes hinausgeht, ist kaum noch als Kantenschutz zu bezeichnen - schon gar nicht, wenn es um die Brandgefahr geht.
5. Mischlagerung dürfte meist zur Einstufung in Lager höherer Gefahr führen, bei der Verwendung von Schaumkunststoffen als Verpackung jedoch in solche höchster Gefahr. Produkte des Landhandels dagegen dürften im allgemeinen eine geringere Gefahr darstellen.

Die Prämienrichtlinien bewerten besondere Risiken mit dem Begriff "Sonderlager". Diese umfassen die folgenden Produkte:

- Zuckerrübentrockenschnitzel
- Altpapier, Lumpen
- Schaumkunststoffe auf der Basis von Polystyrol und Polyurethan

Fortsetzung Tabelle 1:

- Andere Schaumkunststoffe (Polyvinylchlorid, Phenolharz- und Melaminharzschaum) und EPS-SE-Hartschaum (mit Flamm- schutz ausgerüsteter expandierter Polystyrol-Hartschaum)
  
- Matratzen und Polsterwaren
- Holzwolle, -fasern, -späne, -mehl
- Torf, -mull, -streu
- Sprengstoffe, Munition

Die obige Reihenfolge stellt keine Bewertungsfolge dar. Zum Schluß dieser Aufstellung folgen noch einige allgemeine Anmerkungen, auch solche zur Bewertung des Gefahrenpotentials: Eine besondere Unterteilung in Lager und Hochregallager erfolgt nicht, die Höhe der Lagerung wird jedoch berücksichtigt. Ebenso sind über die normalen Lager hinaus eine Reihe von Sonderlagern Kühlhäuser unterschiedlicher Konstruktion sowie Lager und Verkaufslager des Einzel-, Groß- und Versandhandels.

Zur getrennten Tarifierung von Lagern und Produktionsbereichen müssen Lager von den anderen Betrieben als Komplexe getrennt sein. Sonst gilt der jeweils höchste Prämiensatz, der für Produktion oder Lagerung erhoben wird, für den gesamten Komplex.

Kleine Lager, z.B. "Pufferlager" können auch im Produktionsbereich untergebracht sein. Befinden sie sich in einem feuerbeständig abgetrennten Raum wird kein Zuschlag erhoben. Sonst ist Zuschlag für die Gefahrerhöhung vorgesehen, wenn der Prämiensatz für das Lager höher wäre als für die Produktion.

Überwiegt der Lageranteil im Komplex und ist die Lagerprämie höher als die Prämie für die Produktion, so ist ohne Komplextrennung zwischen Produktion und Lager die Lagerprämie für den gesamten Komplex anzuwenden.

Tabelle 2: Gefahrenpotential gelagerter Güter.

Auszug aus den Sprinklerrichtlinien des VdS nach /4/

### 1. Einteilung der Schutzbereiche nach Brandgefahren.

Die von Sprinkleranlagen zu schützenden Gebäude und Bereiche (Schutzbereiche) werden entsprechend den Brandgefahren (BG) wie folgt eingeteilt:

BG 1: Schutzbereiche mit niedriger Brandbelastung und geringer Brennbarkeit der Gebäude und deren Inhalt

BG 2: Schutzbereiche mit mittlerer Brandbelastung und mittlerer Brennbarkeit

Diese Schutzbereiche werden entsprechend ihrer Brandbelastung und Brennbarkeit weiter unterteilt, und zwar in BG 2.1 bis BG 2.3

BG 3: Schutzbereiche in Produktionsbereichen mit großer Brandbelastung und hoher Brennbarkeit

Diese Schutzbereiche werden entsprechend ihrer Brandbelastung und Brennbarkeit weiter unterteilt, und zwar in BG 3.1 bis BG 3.3

BG 4: Schutzbereiche mit Lagerung von Stoffen und Waren

---

Diese Schutzbereiche werden entsprechend dem Brandverhalten der verschiedenen Stoffe weiter unterteilt, und zwar in BG 4.1 bis BG 4.4

Fortsetzung Tabelle 2:

## 2. Zuordnung von Lagermaterialien und Brandgefahren

Die Einstufung von Lagermaterial in Brandgefahrenklassen (BG 4.1 bis BG 4.4) ergibt sich aus der Brandgefährlichkeit der Lagermaterialien selbst (L1 bis L4) und ihrer Verpackung (V1 bis V4) entsprechend der aus /4/ entnommenen Darstellung (nächste Seite), wobei die Einteilung in die Klassen L1 bis L4 der Lagermaterialien einer tabellarischen Aufstellung im Anhang der Sprinklerrichtlinien /4/ entnommen werden kann. Diese ist der Vollständigkeit halber ebenfalls wiedergegeben.

Fortsetzung Tabelle 2: Zuordnung von Lagermaterial ( L1 bis L4 ) in Verbindung mit Verpackungsarten bzw. Transporthilfen ( V1 bis V4 ) nach Brandgefahren ( BG 4.1 bis BG 4.4 ) nach /4/.

Verpackungen	V 1	V 2	V 3	V 4
Lagermaterialien	Nichtbrennbare Verpackungen, Holzpaletten und brennbarer „Kantenschutz“ sind zulässig. Der „Kantenschutz“ darf nicht mehr als 20% der Oberfläche des verpackten Lagergutes umschließen. Besteht der Kantenschutz aus Schaumstoff, so darf er nicht mehr als 5% – bei Kantenschutz, der durch brennbare oder nichtbrennbare Materialien abgedeckt ist, nicht mehr als 10% – der Oberfläche des verpackten Lagergutes umschließen. Nicht zulässig sind Verpackungen aus Holz, Papier oder Kunststoffen	Holzboxen, Holzpaletten, Verpackungen aus Holz, Papier, Karton, Wellkarton und Kunststoff (ungeschäumt) Nicht zulässig sind Schaumstoffe, außer Schaumstoffe als Kantenschutz. Besteht Kantenschutz aus Schaumstoff, so darf er nicht mehr als 5% – bei Kantenschutz innerhalb von Boxen und Kartons nicht mehr als 10% – der Oberfläche des verpackten Lagergutes umschließen	Verpackungen nach Art V 1 bzw. V 2 in Verbindung mit Schaumstoffen. Der Schaumstoffanteil der Verpackung, bezogen auf das Volumen des verpackten Lagergutes, darf nicht größer als 15% – innerhalb von Boxen und Kartons nicht größer als 30% – sein	Verpackungen mit einem höheren Schaumstoffanteil als nach V 1 bis V 3
L 1 Nichtbrennbare Lagermaterialien, auch Nahrungsmittel in Gläsern oder Blechdosen	BG 4.1	BG 4.2	BG 4.3	BG 4.4
L 2 Schwer- und mittelbrennbare Lagermaterialien, wie Holz, Papier, Pappe, Kunststoffe, jeweils in fester Form. Schaumstoffe sind bis zu einem Anteil von 15%, bezogen auf das Bruttovolumen, zulässig, wenn sie von nichtbrennbarem Material umschlossen sind. Ausgeschlossen sind z. B. Papier und Pappe in Rollen, vertikal gelagert, sowie Wellpappe, vertikal gelagert, Toilettenpapier	BG 4.2	BG 4.2	BG 4.3	BG 4.4
L 3 Leichtbrennbare Lagermaterialien, Papier und Pappe (in Rollen, vertikal gelagert), luftdurchlässige Holzstapel, Lagergüter mit einem Anteil von Schaumstoffen bis 15%, bezogen auf das Bruttovolumen, oder Lagergüter, die von nichtbrennbarem Material umschlossen sind mit einem Anteil von Schaumstoffen bis 30% des Bruttovolumens	BG 4.3	BG 4.3	BG 4.3	BG 4.4
L 4 Lagermaterialien mit höheren Schaumstoffanteilen wie in L 3 aufgeführt	BG 4.4	BG 4.4	BG 4.4	BG 4.4

Fortsetzung Tabelle 2: Ergänzung zu den Angaben bezüglich L1 bis L4 auf der vorhergehenden Seite:  
Zuordnungen

Lagermaterial	L	Lagermaterial	L
Akkumulatoren	2	Garne	
Asphalt	2	synthetisch	3
Baumwolle	2	natur	2
Bier	1	Getränke (keine Spirituosen)	1
Bitumen	3	Getreide	2
Blechwaren	1	Glaswaren	1
Bücher	2	Gummiwaren	
Celluloid	3	ungeschäumt	3
Chemikalien(nicht brennbar)	1	geschäumt	4
Dachpappe	2	Holz	
Draht		massive Lagerung	2
blank	1	luftdurchlässige Stapel	3
isoliert	2	Holzwohle	4
Eisenwaren	1	Jute	2
Elektrogeräte	2	Kabel	2
Elektromaterialien	2	Keramikwaren	1
Elektronische Geräte	2	Konserven	1
Faserstoffe		Kork	2
natur	2	Kunststoffe	
synthetisch	3	ungeschäumt Plattenform	2
Fenster		Granulat, Pulver, Folien	3
Metall	1	geschäumt	4
Holz	2	Lebensmittel	
Kunststoff	2	in Gläsern und Blechdosen	1
Fette	2	sonstige	2
Feuerwerkskörper	4	Leder (natur)	2
Filz	2	Leinen	2
Flachs	2	Mehl	2
Furniere (Holz)	2	Metallwaren	1
Futtermittel	2	Milchpulver	2
		Möbel(ohne Schaumstoffe)	2

Fortsetzung Tabelle 2:

Lagermaterial	L
Nahrungsmittel	
in Gläsern und Blechdosen	1
sonstige	2
Öle	
wasserlöslich	2
nicht wasserlöslich	3
Paletten (Holz)	3
Papier, Pappe	
in horizontal	
gelagerten Rollen	2
in vertikal	
gelagerten Rollen	3
Papierabfälle	2
Papierwaren	2
Porzellan	1
Schaumgummi	4
Seife	2
Spanplatten	2
Sperrholz	2
Speiseöl	3
Spirituosen	2
Tabakwaren	2
Trockenbatterien	2
Türen	
Metall	1
Holz, Kunststoff	2
Wachse	2
Waschmaschinen	2
Waschmittel	2
Wellpappe	2
horizontal gelagert	2
vertikal gelagert	3
Zündhölzer	3

Tabelle 3: Abbrandfaktor m, entnommen dem Beiblatt 1 zu  
DIN 18230 Teil 1 vom November 1982 /6/.

lfd.Nr.	Material	Lagerungs- dichte in %	m-Faktor
1	Holz und Holzwerkstoffe		
1.1	Fichtenholz		
1.1.1	Bretter	50	1,0
		70	0,8
1.1.2	Kanthölzer 40 mm * 40 mm	50	1,0
1.1.3	" 100 mm * 100 mm	50	0,7
		90	0,5
1.1.4	" 200 mm * 200 mm	50	0,3
		95	0,2
1.1.5	" , zu Blöcken 500 mm * 500 mm dicht gefügt	50	0,2
		98	0,2
1.1.6	Rundholz, geschält, Ø 150 bis 300 mm	50	0,5
1.1.7	Holzwohle in loser Schüttung gepreßt zu Einzelballen	8	1,0
		60	0,2
1.2	Spanplatten (DIN 4102 - B2)	99	0,2
2	Papier, Karton		
2.1	Schreib- und Druckpapier	100	0,2
2.2	Karton, in Rollen oder in Formaten auf Paletten		
2.2.1	gestrichener Karton	90	0,2
		100	0,2
2.2.2	ungestrichener Karton	90	0,2
		100	0,2
2.3	Packpapier in Ballen	90	0,2
		100	0,2
2.4	Papierrollen, stehend, liegend oder auf Paletten im Format geschnitten		
2.4.1	gestrichenes Papier	75	0,2
2.4.2	ungestrichenes Papier	75	0,2
2.5	Sanitärkrepppapier-Röllchen, in Beuteln verpackt	80	1,7
3	Textile Erzeugnisse		
3.1	Baumwolle		
3.1.1	Gewebeballen	-	0,4
3.1.2	Fasern zu Ballen verpreßt	-	0,2
3.2	Polyamidfasern zu Ballen verpreßt	-	0,7
3.3	Polyacrylnitril zu Ballen verpreßt		
3.3.1	Fasern, nicht modifiziert	-	0,8
3.3.2	Fasern, modifiziert mit ca. 35 % Vinylidenchlorid	-	0,2
3.4	Abfallmaterial		
3.4.1	zu Ballen verpreßt aus Baumwolle-, Polyamid- und Polyacrylnitril-Fasern	-	0,8

Fortsetzung Tabelle 3:

lfd.Nr.		Lagerungs- dichte in %	m-Faktor
4	Kunststoffe		
4.1	Polyäthylen		
4.1.1	Granulat in einzelnen Säcken	-	0,8
4.1.2	Formteile (leer Bierkästen) gestapelt	-	0,5
4.2	Polystyrol		
4.2.1	Hartschaum(DIN 4102- B3) PS 20	100	0,8
4.2.2	Hartschaum(DIN 4102- B1) PS 20 SE	100	0,4
4.3	Polyurethan-Hartschaum		
4.3.1	Polyurethan-Hartschaum (DIN 4102- B2)	100	0,3
4.3.2	Polyurethan-Hartschaum (DIN 4102- B1)	100	0,2
4.4	Polycarbodiimid Hartschaum	100	0,2
4.5	Ungesättigte Polyesterharze, glasfaser- verstärkt		
4.5.1	Profilstäbe lose gestapelt	25	0,7
5	Feste Brennstoffe		
5.1	Braunkohlebriketts lose geschüttet	60	0,3
6	Brennbare Flüssigkeiten in offener Wanne		
6.1	Chlorbenzol	-	0,5
6.2	Cyclohexan	-	0,6
6.3	Dimethylformamid	-	1,3
6.4	Glycol	-	1,3
6.5	Heizöl EL	-	0,4
6.6	Heizöl S	-	0,5
6.7	Isopropylalkohol	-	1,2
6.8	Methanol	-	1,0
6.9	Terpentin	-	0,6
6.10	Xylol	-	0,4

Anmerkung: Lagerungsdichte = Materialvolumen/Gesamtvolumen  
oder = Schüttdichte/Rohdichte

m = 0,2 ist der lt. Vornorm DIN 18230 Teil 2, Ausgabe  
November 1982, Abschnitt 7.2 anzusetzende Minimalwert.  
Behandlung von Ausnahmen siehe dort.

Tabelle 4 : Massenverlust bei Brandversuchen nach Delichatsios /11/

a) Versuche von 1974

Brandlast	Gew.-Anteil Kunststoff/ Karton in %	Ungefährer Massenverlust in kg
<b>A. Kartons mit Facheinteilung</b>		
Polystyrol-Becher, ca. 450 ml Vol.	75/25	$M = 6,8 \text{ t}^2$
PVC-Flaschen, ca. 900 ml Vol.	50,3/49,7	$M = 6,4 \text{ t}^2$
PE-Flaschen, ca. 450 ml Vol.	57/43	$M = 3,6 \text{ t}^2$
PP-Becher, ca. 450 ml Vol.	53/47	$M = 3,9 \text{ t}^2$
Leere Kartons, nur Facheinteilung	0/100	$M = 7,9 \text{ t}^2$
<b>B. Kartons ohne Facheinteilung (lose Verpackung)</b>		
Spielzeug aus Polystyrol	91/9	$M = 3,2 \text{ t}^2$
In Kunststofffolie verpackte Fleischschalen	100/0	$M = 8,8 \text{ t}^3$
In Papier verpackte Fleischschalen	100/0	$M = 10,9 \text{ t}^3$
Tuben aus Polystyrol, div. Vol.	92/8	$M = 4,2 \text{ t}^2$
Flaschen aus PE, ca. 450 ml Vol.	81/19	$M = 0,5 \text{ t}^{2,5}$
Verschiedene PE-Flaschen div. Vol.	-	$M = 2,3 \text{ t}^2$
Abfalleimer aus PE	87/13	$M = 2,0 \text{ t}^3$
PE-Flaschen, ca. 1800 ml Vol.	-	$M = 1,8 \text{ t}^3$
<b>C. Wärmedämmplatten</b>		
PU-Platten, papierkaschiert	71/29	$M = 29 \text{ t}^4 (< 1,5 \text{ min})$ $M = 29,5 \text{ t} (> 1,5 \text{ min})$
PS-Platten, nicht kaschiert	100/0	$M = 2 \text{ t}^{8 \div 12}$

b) Versuche von 1979

	Wärmefreisetzung in W, Zeit t in min
Polystyrolbecher in Kartons	$\dot{Q} = 4,1 \cdot 10^3 \text{ t}^2$
PE-Becher in Kartons	$\dot{Q} = 2,82 \cdot 10^3 \text{ t}^2$
Doppellag. Karton	$\dot{Q} = 9,24 \cdot 10^3 (t+15)^2$
Leere Kartons mit Facheinteilung	$\dot{Q} = 3,36 \cdot 10^3 (t+5)^2$

Anmerkung: Bei den beiden letzten Versuchen ist eine Anfangsphase von 15 bzw. 5 Minuten Dauer berücksichtigt, für die die empirische Gleichung nicht gilt.

Tabelle 5: Exponentielle Brandausbreitung bei Versuchen von FM nach Friedman /20/.

Art des Brandes	Brandumfang in kW *	Faktor $\alpha$ in $\text{sec}^{-1}$	$t_D$ in sec **
1. Flexibler PU-Schaum (Matratzen) 0,6 m * 0,6 m * 0,1 m hoch, in der Mitte Oberseite gezündet	1 - 20	0,033	21
2. Schlafzimmerversuchsbrand. Mit einem Laken bedeckte PU-Schaummatratze in einem Raum von 2,4 m * 3,6 m Grund- fläche	10 - 400	0,024	29
3. Holzkrippe, 0,76 m * 0,76 m * 0,38 m hoch, aus 120 Kiefern- holzstäben 3,2 cm im Quadrat, in der Mitte der Bodenfläche gezündet	150 - 1000	0,018	38
4. Waren auf Paletten in einer Anordnung 2,4 m * 2,4 m * 4,6 m hoch, am Boden gezündet (Tests bei FM von 1974, vgl. /11/)			
a) Pappkartons mit Metall- folien kaschiert	4000 - 18000	0,0029	240
b) Spielzeugteile in Kartons	2500 - 15000	0,0040	170
c) Polypropylen Tuben in Kartons	1500 - 22000	0,0045	150
d) Leere Kartons mit Fach- einteilung	7000 - 20000	0,0057	120
e) Klimaanlageanteile auf Polyäthylen-Paletten	2000 - 40000	0,0088	79
f) In Papier eingewickelte Fleischverkaufsschalen aus Polystyrol	3000 - 60000	0,025	28
g) Polystyrol Wärmedämm- platten	7000 - 100000	0,029	24

\* Berücksichtigter Brandumfang (Wärmefreisetzung in kW) bei der Kurvenanpassung an experimentelle Daten.

\*\*  $t_D$  "Verdoppelungszeit"  $0,693/\alpha$

Tabelle 6: Wärmefreisetzung bei im Freien abbrennenden Brandstoffen nach Alpert und Ward /19/.

Stoff	Wärmefreisetzung in kW, bezogen auf ...
Brennbare Flüssigkeit in einer Wanne	3300/m <sup>2</sup> Oberfläche
Brennbare Flüssigkeit, zerstäubt	9300/m <sup>3</sup> /h Durchfluß
Holzpaletten (1 Stapel)	5200/m Höhe
Holz oder Acrylglas (vertikal)	
- 0,6 m Höhe	100/m Breite
- 1,2 m Höhe	240/m Breite
- 2,4 m Höhe	620/m Breite
- 3,7 m Höhe	1040/m Breite
Holz oder Acrylglas	
- Oberseite der horizontalen Oberfläche	740/m <sup>2</sup> Oberfläche
Polystyrolplatte (vertikal)	
- 0,6 m Höhe	225/m Breite
- 1,2 m Höhe	520/m Breite
- 2,4 m Höhe	1385/m Breite
- 3,7 m Höhe	2370/m Breite
Polystyrolplatte (horizontal)	1360/m <sup>2</sup> Oberfläche
Polypropylenplatte (vertikal)	
- 0,6 m Höhe	155/m Breite
- 1,2 m Höhe	345/m Breite
- 2,4 m Höhe	970/m Breite
- 3,7 m Höhe	1630/m Breite
Polypropylenplatte (horizontal)	800/m <sup>2</sup> Oberfläche

Tabelle 7: Wärmefreisetzung in kW/m<sup>2</sup> Grundfläche für gelagerte Waren und Zeitdauer bis zum Anwachsen der Wärmefreisetzung auf 1 MW nach Alpert und Ward /19/.

Brandgut	Wärmefreisetzung in kW/m <sup>2</sup>	t in sec
1. Holzpaletten - 0,45m Höhe, 6-12 % r.F.	1420	150 - 325
2. " - 1,52m Höhe, 6-12 % r.F.	5220	90 - 200
3. " - 3,05m Höhe, 6-12 % r.F.	10670	80 - 125
4. " - 4,88m Höhe, 6-12 % r.F.	17020	75 - 125
5. Versandtaschen, gefüllt, 1,52m hoch gelagert	400	190
6. Kartons mit Fächereinteilung, 4,57m hoch gelagert	1700	60
7. PE-Briefablagen, gefüllt, 1,52m hoch gestapelt	8500	180
8. PE-Abfalleimer in Kartons, 4,57m hoch gelagert	2000	55
9. PE-Glasfiber Duschabtrennungen in Kartons, 4,57m hoch gelagert	1400	85
10. PE-Flaschen in Verpackung Nr.6	6240	85
11. PE-Flaschen in Kartons, 4,57m hoch gelagert	2000	75
12. PU-Wärmedämmplatten, Hartschaum, 4,57m hoch	1930	8
13. PS-Becher in Verpackung Nr.6	14200	55
14. PS-Tuben, lose in Kartons, 4,27m hoch gelagert	5400	120
15. PS Spielzeugteile in Kartons, 4,57m hoch	2040	125
16. PS Hartschaumdämmplatten, 4,27m hoch	3300	6
17. PVC Flaschen in Verpackung Nr.6	3400	95
18. PP Tuben in Verpackung Nr.6	4430	100
19. PP und PE Folie in Rollen, 4,27 m hoch	6240	40
20. Methylalkohol	740	-
21. Fahrzeugbenzin	3300	-
22. Flugbenzin	3300	-
23. Dieselöl	2000	-

PE = Polyäthylen  
 PS = Polystyrol  
 PVC = Polyvinylchlorid  
 PP = Polypropylen  
 PU = Polyurethan

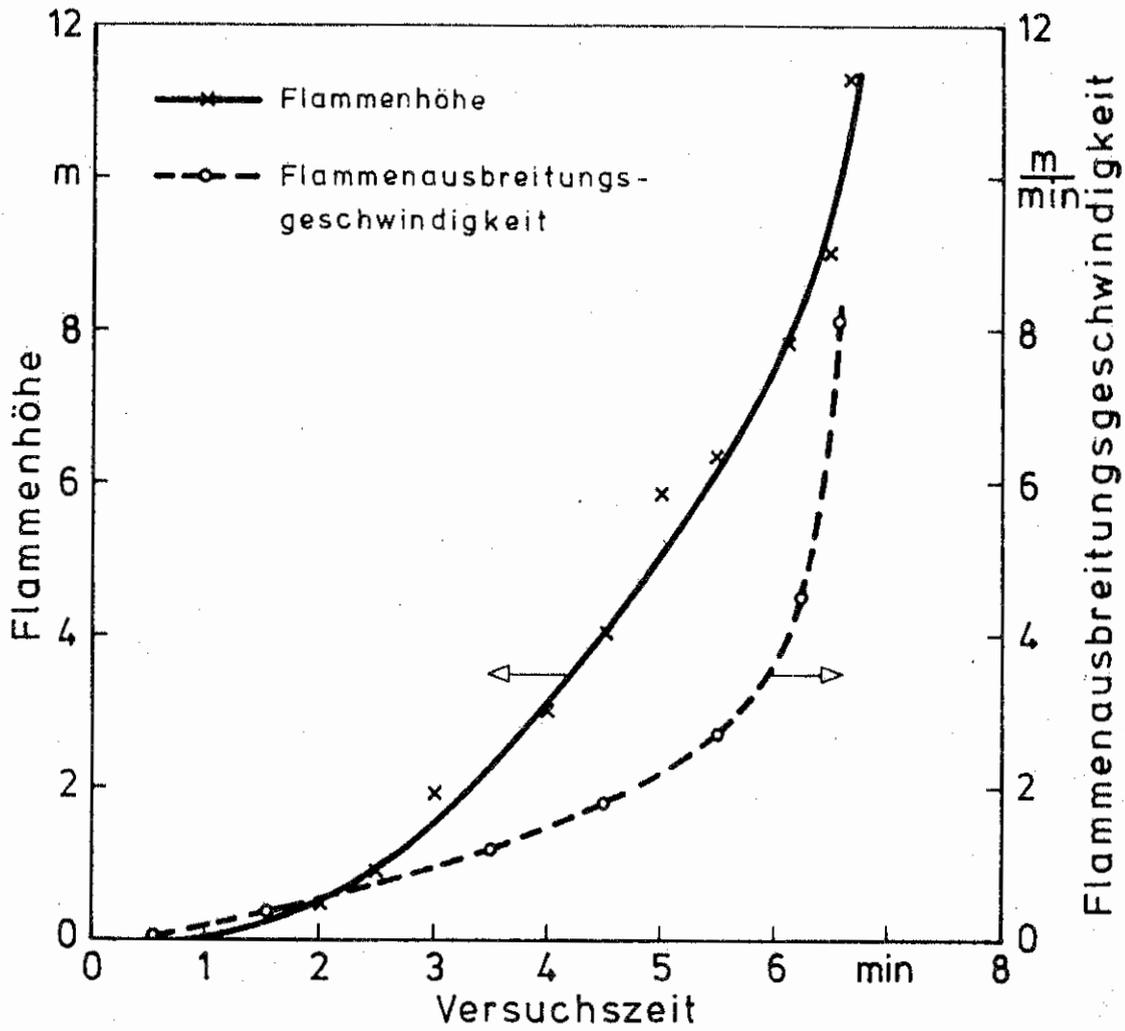
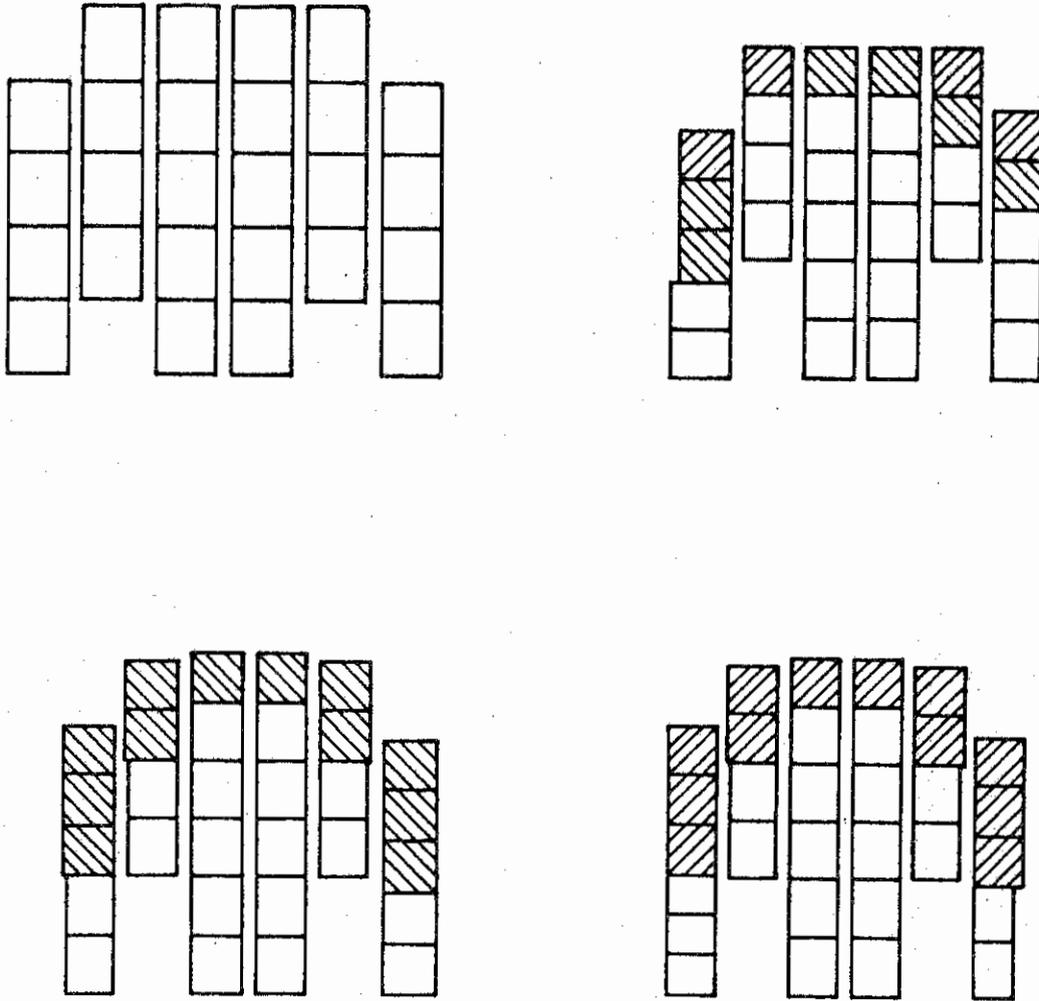


Bild 1 Flammenhöhe und Flammenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei den Brandversuchen in Cardington, England, nach /1/. Die Höhe der Regalanordnung betrug 11,4 m .



- Polystyrolgefäße, gestapelt in Wellpappkartons
- Blechschachteln in doppelagiger Wellpappe
- 8 Polyäthylenflaschen im Wellpappkarton

Bild 2 Grundriß der bei Johnson /9/ beschriebenen Großbrandversuche.

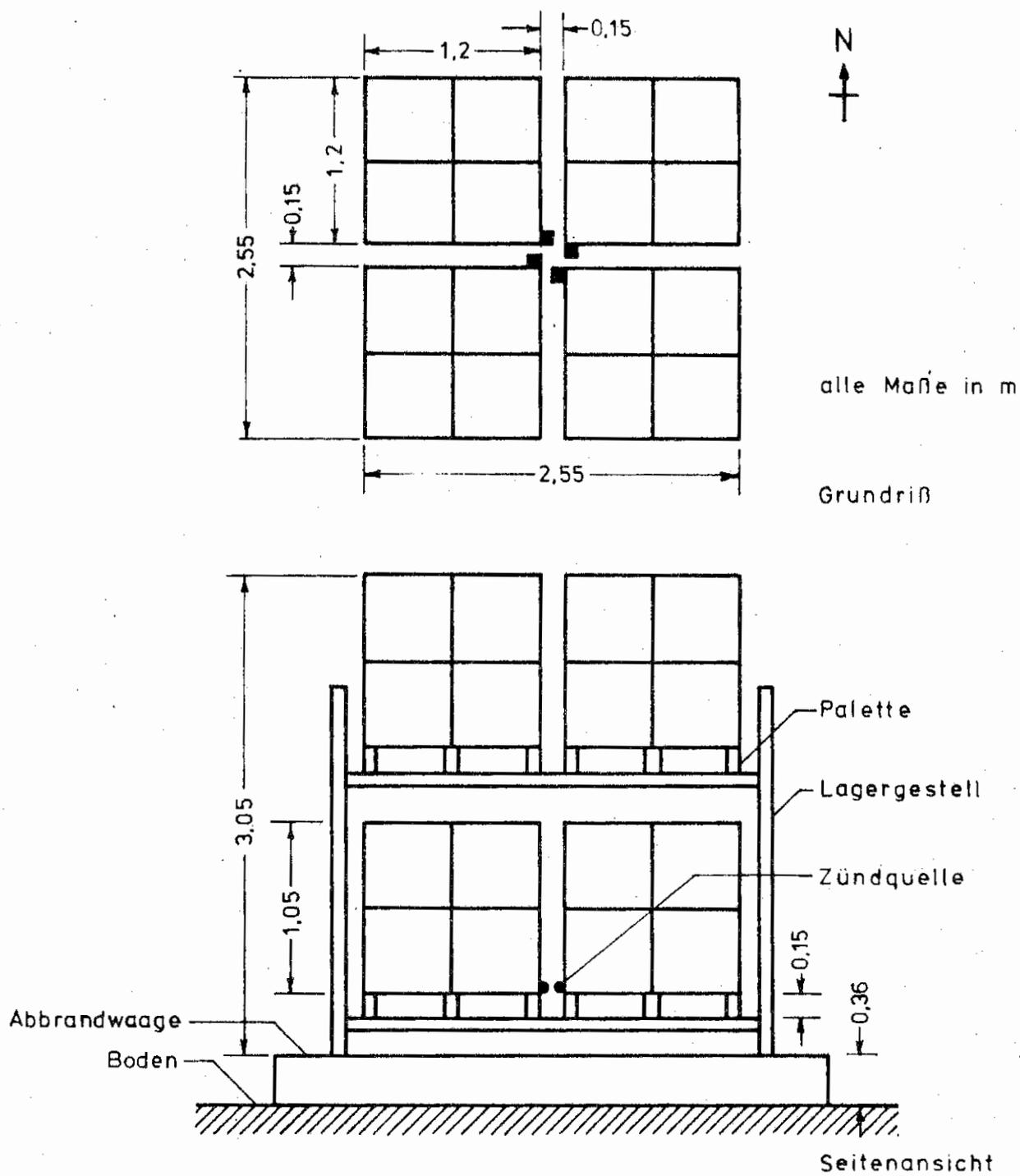


Bild 3 Paletten- Regallager Versuchsanordnung der Factory Mutual Forschungsgruppe (USA) für den " Intermediate Scale Fire Test " nach /17/.

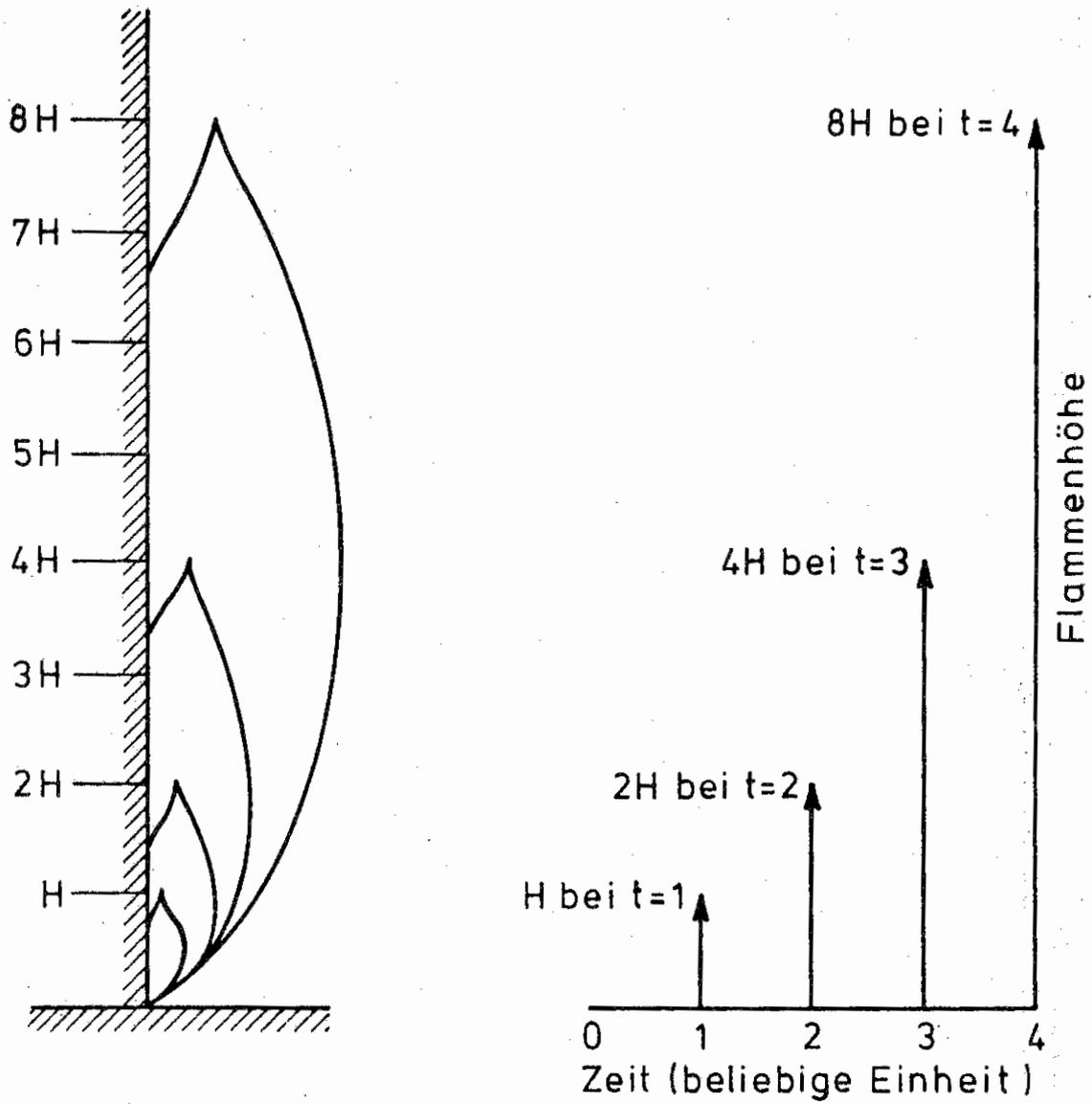


Bild 4 Verdoppelungseffekt an einer vertikal ausgerichteten Oberfläche nach Alpert und Ward /19/.

Beitrag zur Energiebilanz

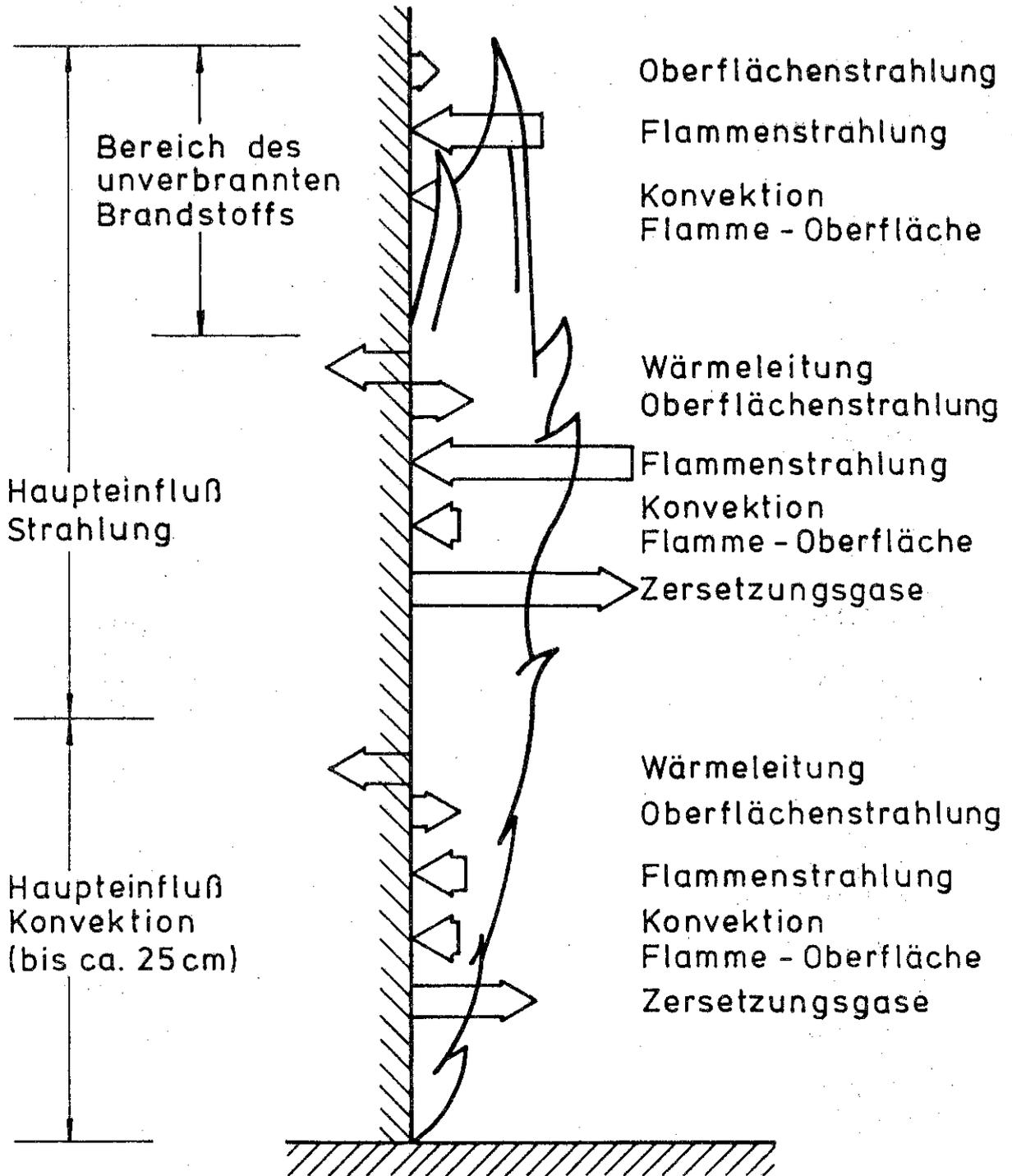


Bild 5 Beitrag zur Energiebilanz bei sich an vertikalen Wänden nach oben ausbreitenden Bränden nach Alpert und Ward /19/.

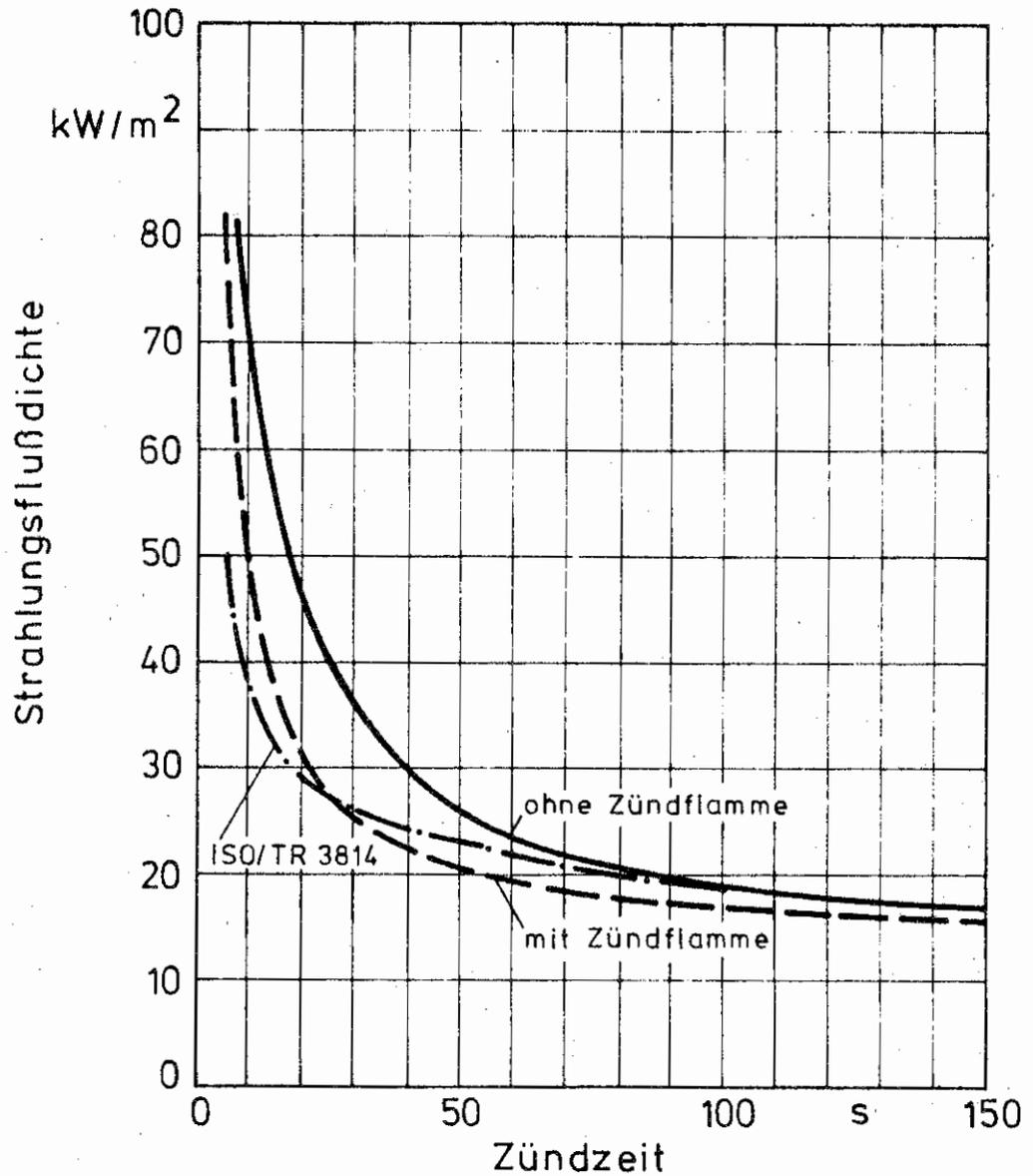


Bild 6 Zündzeiten von Wellpappkartons bei Wärmeeinstrahlung mit und ohne zusätzliche Zündflamme, nach Wraight /21/ Zusätzlich eingetragen ist die Kurve für 5 mm dicke, 2-lagige Wellpappe nach Becker et.al. /14/, gemessen nach ISO /TR 3814.

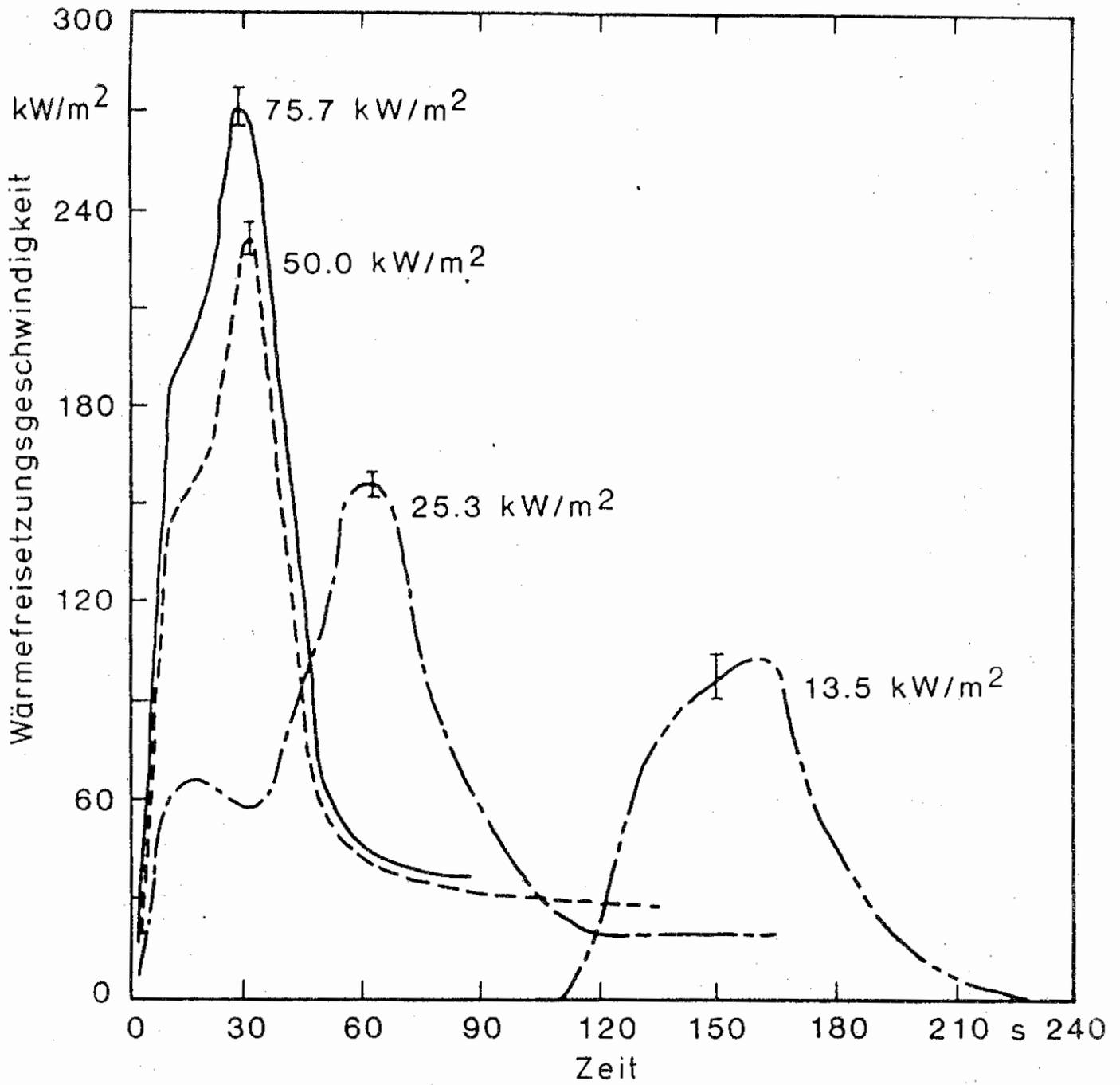


Bild 7 Zeitliche Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit bei PU- Hartschaum, mit der Wärmestrahlung der Probenbeheizung als Parameter, nach Walton und Twilley /22/.