

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 12: Literaturlauswertung, Messung der Wasser-  
beaufschlagung und -verteilung,  
Brand- und Löscheversuche mit Sprinklern  
an Regallagern mit und ohne Zusatz von  
Quellkörpern zum Löschwasser

97

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER  
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRÄNGELEGHEITEN

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

Forschungsbericht Nr. 97

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 12: Literaturlauswertung, Messung  
der Wasserbeaufschlagung und -verteilung,  
Brand- und Löscheversuche mit Sprinklern  
an Regallagern mit und ohne Zusatz von  
Quellkörpern zum Löschwasser

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Februar 1996

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURAUSWERTUNG SPRINKLER	2
2.1 Allgemeine Angaben über Sprinkler	2
2.2 Brände und Sprinkler	7
2.3 Stapellagerung und Sprinkler	8
2.4 Lüftung und Sprinkler	10
2.5 Anzahl der ausgelösten Sprinkler	13
2.6 Brandversuche und Sprinkler	14
2.7 Einflußgrößen von Sprinklern	22
2.8 Tropfen und Sprinkler	24
3. VERSUCHSANLAGE FÜR BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	28
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG	30
4.1 Kaltversuche	30
4.1.1 Wasserbeaufschlagung und -verteilung	30
4.2 Brand- und Löschversuche	35
4.2.1 Auslösezeiten der Brandmelder und Sprinkler	35
4.2.2 Temperaturen	36
4.2.3 Ergebnisse der Brand- und Löschversuche	39
5. ZUSAMMENFASSUNG	41
6. LITERATURVERZEICHNIS	43
7. TABELLEN UND BILDER	52

## 1. EINLEITUNG

Mit hohem Aufwand wird eine einfache, sichere und sachgerechte Fertigung und Lagerung der unterschiedlichsten Materialien und Güter angestrebt. Dabei wird jedoch häufig das Brandrisiko unterschätzt, so daß immer wieder Großbrände entstehen, die einen erheblichen Schaden verursachen. Die Feuerwehr sieht sich bei derartigen Bränden oft nur noch in der Lage, evtl. gefährdete Personen in Sicherheit zu bringen und die Umgebung zu schützen.

Um Brände bereits in der Anfangsphase automatisch bekämpfen bzw. löschen zu können, werden ortsfeste Sprinkleranlagen installiert die in den allermeisten Fällen auch zu einem Löscherfolg führen. Als Löschmittel wird dabei hauptsächlich Wasser benutzt. Die Sprinkler selbst werden nach entsprechenden Richtlinien den Gegebenheiten des zu schützenden Objektes ausgewählt.

Ein längerfristiges Forschungsvorhaben an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befaßt sich mit Untersuchungen über die Ausbreitung von Bränden und den Löscheinsatz mit Sprinklern in Lagern. Durch Änderung einzelner Parameter werden Erkenntnisse über die jeweiligen Abläufe gewonnen.

Bisherige Forschungsarbeiten diesbezüglich befassen sich mit der Auswertung des in- und ausländischen Schrifttums über Sprinkler, mit Bränden und Brandversuchen unter Beteiligung von Sprinklern, mit Einflußgrößen und der Installation von Sprinklern sowie mit Tropfengrößen und -verteilungen, um nur einige Punkte zu nennen. Dabei können in einzelnen Abschnitten die genannten Veröffentlichungen bei der Eingruppierung nicht immer eindeutig zugewiesen werden, weil sich manchmal mehrere Themenkreise überschneiden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Auswertung des Schrifttums weitergeführt und somit die Vielzahl der an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zugänglichen Fachliteratur auf den genannten Gebieten erfaßt. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen und den durchgeführten Versuchen soll einerseits der Brandscha-

den begrenzt und andererseits die Löschmittelmengen gering gehalten werden können.

Ein weiterer Abschnitt befaßt sich mit dem an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Verfügung stehenden Versuchsstand zur Untersuchung von Bränden mit Sprinklereinsatz, bei dem handelsübliche Sprinkler verwendet werden. Bei vorgeschalteten Kaltversuchen wird das Sprühverhalten bzw. die Wasserverteilung der eingesetzten Sprinkler ermittelt.

## 2. LITERATURAUSWERTUNG SPRINKLER

### 2.1 Allgemeine Angaben über Sprinkler

Schäfers und Prößdorf /1/ geben einen kurzen Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Sprinkler und über die in verschiedenen Ländern pro Jahr installierten Sprinkler. Ebenso werden Löschgase aus der Sicht der Hersteller und der Versicherer in Bezug auf den Personen-, Nachbarschafts- und Umweltschutz erwähnt. Zusätzlich wird auf die zahlreichen Sprinkleranlagen in Europa und auf die Richtlinien für Sprinkler hingewiesen. Darin sind u. a. die erforderlichen bzw. zulässigen Schutzflächen, die Betriebszeiten, die Wasserversorgung und die Rabatte bei eingebauten automatischen Löschanlagen enthalten. Bei 25 untersuchten Bränden in den 80er Jahren lag die Brandfläche im Schnitt bei 2900 m<sup>2</sup> und die Löschwassermenge bei 680 m<sup>3</sup> pro Ereignis.

Büssem /2/ geht auf die Weiterentwicklung von ESFR-Sprinklern (Early Suppression Fast Response) ein und erwähnt sowohl einzelne Löscheffekte und Einflüsse durch die Art der Lagerung als auch die Wärmeübertragung der nach oben gerichteten Flammen und Brandgase auf die von oben sprühenden Wassertropfen, die beim ESFR-Sprinkler mit ausreichender Masse und Energie in Richtung Brandherd fliegen.

Donner /3/ berichtet über verschiedene an bestimmte Risiken an-

gepaßte Sprinkler wie Großtropfensprinkler für Lagerräume und Betriebsstätten sowie Weitwurf-Wandsprinkler für den Wohnbereich oder auch Doppelsprinkler, um ungewollten Wasseraustritt zu verhindern.

Bamert /4/ gibt innerhalb eines Versuchsberichtes einen Auszug aus den Schweizer Sprinklerrichtlinien wieder.

Melinek /5/ verweist auf den Rückgang von Todesfällen, wenn bei Bränden Sprinkler eingesetzt wurden, was jedoch nicht zuverlässig belegt werden kann. Außerdem können z.B. Werte aus den USA nicht direkt auf Großbritannien übertragen werden. In Tabellen wird nach 3 Brandarten unterschieden und festgestellt, daß bei Sprinklerung die Zahl der Brandopfer und Verletzten wesentlich geringer ist. Für den Einbau von Sprinklern wird zusätzlich eine Kostenanalyse aufgestellt.

In /6/ wird das Schaummittel AFFF als Zusatz zum Wasser auch in Sprinkleranlagen verwendet. Die Zumischung wird mit 3 % bis 6 % angegeben. Der sich bildende Film verhindert den Kontakt mit Luft und das Austreten von Gasen aus dem Brandgut. Dieser Zusatz kann in Lägern, Maschinenhallen und Hangars bei gelagerten Materialien wie Baumwolle, Papier oder Reifen eingesetzt werden.

Hayes /7/ erwähnt den Brandschutz in der britischen Kraftwerksindustrie. Insgesamt wurden bisher über 240 Wassersprühanlagen in diesem Industriebereich eingebaut, die immer den neuesten Anforderungen angepaßt werden. Es werden jedoch Bedenken darüber geäußert, daß im Falle eines Einsatzes die mit Schadstoffpartikeln beladenen Wassertropfen eingeatmet werden können und somit gesundheitliche Risiken darstellen.

Hoffmann /8/ berichtet, daß im Vergnügungspark "Disney World" in Florida (USA) der Brandschutz ernst genommen wird. So sind z.B. alle Gebäude mit Sprinkleranlagen ausgerüstet, monitorüberwacht und obliegen einer 60 Tage Wartung. Dadurch entstehen im Brandfall nur gringe Schäden.

Yao /9/ gibt einen Überblick über die Sprinklerentwicklung und sieht in Wasser das gebräuchlichste Löschmittel. Bei bis zum Jahre 1950 gefertigten konventionellen Sprinklern gelangte 40 % bis 60 % des austretenden Wassers an die Decke. Der Wandel begann mit der höheren Lagerung. Spraysprinkler benötigen weniger Wasser, verteilen die Tropfen auf eine größere Fläche und kühlen zusätzlich die Umgebung. Durch die Änderung von Produkten und Verpackungen wurde alles noch komplexer. In den 70er Jahren wurde an Kunststoffen auf Gestellen über 4,6 m Höhe gezeigt, daß sie im Brandfall ohne Zwischenebenensprinkler nicht beherrschbar sind. Als Weiterentwicklung gelten ESFR-Sprinkler. Außerdem werden theoretische Modelle erarbeitet, wenn keine Großbrandversuche mehr möglich sind.

Blackburn /10/ beschreibt anhand eines Einkaufskomplexes die Schutzeinrichtungen wie Brandmelder, Sprinkler und andere Systeme. Er erwähnt die Möglichkeit, mit schnell auslösenden Sprinklern einen Brand bis zu 5 MW bekämpfen zu können.

Melinek /11/ prüft die Effektivität von Sprinklern, indem er Brände vergleicht, die gelöscht bzw. kontrolliert wurden mit denen, die nicht gelöscht bzw. kontrolliert wurden. Im wesentlichen werden durch Sprinkler Brände auf Flächen von weniger als 100 m<sup>2</sup> begrenzt. Jedoch werden Sprinkler erst bei Bränden von mehr als 3 m<sup>2</sup> wirksam. Kleinere Brände erfordern spezielle Sprinkler. Im allgemeinen reduzieren Sprinkler den Einsatz von Feuerwehren sowie den entstehenden Brandschaden. Die Statistik weist Unterschiede zwischen ein- und mehrstöckigen Gebäuden auf. Bei 1/3 der Brände wird die Feuerwehr meist garnicht alarmiert. In den meisten Fällen sind jedoch nur größere Gebäude mit höherem Risiko gesprinklert.

In /12/ wird über die Forderung von Sprinklern in "Nicht-Wohngebäuden" über 30 m Höhe berichtet. Laut Statistik wird der Gebäudeschaden dadurch auf etwa 30 % und der Schaden beim Inhalt auf etwa 50 % begrenzt. Durch Sprinkler wird auch die bei einem Brand entstehende Menge an toxischem Brandrauch reduziert. Die

Sprinkler-Richtlinien sind in Großbritannien, USA, Australien und Neuseeland ähnlich, ihre Auslegung jedoch unterschiedlich. In 100 Jahren wurden in Australien und Neuseeland 99,46 % der Brände von Sprinklern kontrolliert, in den anderen Ländern ca. 4 % weniger. Oft werden kleine Brände nicht gemeldet und fehlen deshalb in der Statistik. Weltweit wird für die Jahre 1985 bis 1992 berichtet, daß bei einer Anzahl von 9884 Bränden die Erfolgsrate 98 % betrug. In Tabellen werden weitere Einzelheiten über Zeiträume, Orte, Ausfälle u.a. mehr angegeben. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, daß durch ein Strahlrohr ein etwa 10 mal höherer Wasserschaden entsteht, weil der Einsatz erst viel später bei einem sich bereits stärker entwickelten Brand erfolgen kann. Die entsprechende Auswahl eines Sprinklers hängt vom Einsatzort ab. So werden z.B. bei Lägern die Zwischen-  
ebensprinkler oder die ESFR-Sprinkler unterhalb der Decke verwendet. Außerdem wird in diesem Bericht auf die Kostenseite eingegangen.

Young /13/ berichtet, daß in Großbritannien in Schulen häufig Brände gelegt werden. In den USA werden aus diesem Grund in Schulen bereits Sprinkler eingebaut, denn Sprinkler schützen sowohl Leben als auch Sachwerte. Die Kosten für den Einbau in neue Schulgebäude betragen lediglich 2 % der Bausumme. In Tabellen sind zusätzlich für Europa, Amerika und Australien Risiken und der Prozentanteil der mit Sprinklern kontrollierten Brände aufgeführt.

Usemann und Becker /14/ beschreiben in allgemein verständlicher Form die Bedeutung von Sprinkleranlagen (Naß- und Trocken-), die hydraulische Berechnung von Sprinklerrohrnetzen, die Wirksamkeit von Anlagen unter Einbeziehung der Tropfengröße und den Löschvorgang beim Einsatz. Dabei werden die Löscheffekte, die Flammenstruktur, das Ansprechverhalten von Sprinklern und die Verteilung des Löschwassers sowie Modelle für die Löschwirksamkeit von Sprinkleranlagen angesprochen.

Young /15/ berichtet von Sprinklern in Telefonvermittlungsan-



lagen, Atrien, Maschinenräumen und Hochregellägern sowie von Hochdruckdüsen für Schiffskabinen, deren schnelle Auslösung auch für den Personenschutz in Wohnungen, Gefängnissen und Schulen geeignet ist.

Andrzejewski /16/ geht ausführlich auf das Problem der Korrosion von Rohrleitungen von Sprinkleranlagen ein, die sowohl durch das in den Leitungen stehende Wasser als auch von Feuchtigkeit von außen verursacht wird.

Leech /17/ erwähnt die meist durch Brandstiftungen entstandenen Brände in Schulen und nennt als einzig mögliche Art der Brandbekämpfung die automatischen Sprinkler. Deshalb werden seit 1989 in Schulen Sprinkler installiert, deren Auslegung für die für Schulen geltende geringe Gefahrenklasse erfolgt.

Lambrecht /18/ beschreibt die nichtautomatische Löschanlage, die im wesentlichen aus einem festverlegten Leitungssystem und offenen Düsen besteht, so daß bei einem Brandfall der gesamte Löschnabschnitt beaufschlagt werden kann. Eine Überwachungsanlage und die Brandfrüherkennung sind wichtige Bestandteile dieses Konzeptes. Bei der Auslegung der Anlage sind für Blocklager bis 4 m Höhe, für Regallager bis 12 m Höhe sowie für andere Räume die Auslegungsparameter zu berücksichtigen. Derartige Anlagen sind bei Lagergrößen von 200 m<sup>2</sup> bis 1600 m<sup>2</sup> auch für kleinere Betriebe realisierbar.

In /19/ werden Statistiken über die Zuverlässigkeit von Sprinklern in den USA, in Großbritannien, Australien und Neuseeland aufgeführt. In den Jahren 1886 bis 1986 wurden in Australien und Neuseeland von 9022 Bränden 8973 erfolgreich gelöscht. Neben den Bränden und Brandschäden in bestimmten Zeiträumen werden Angaben mit und ohne Sprinklereinsatz miteinander verglichen, die Anzahl der Verletzten und Todesfälle genannt sowie die Entrauchung beim Sprinklereinsatz angesprochen.

Schatz /20/ gibt einen Überblick über die an der Forschungs-

stelle für Brandschutztechnik vorhandene in- und ausländische Literatur auf dem Gebiet des Brandschutzes mit Sprinklern, um dadurch einen möglichst umfassenden Überblick zu erhalten. Die in der Literatur behandelten Themen werden dabei einzelnen Bereichen zugeordnet.

Steinhaus /21/ verweist auf den in Deutschland statistisch ermittelten Löscherfolg von Sprinkleranlagen von über 98 %. Er beschreibt die Wirkungsweise und Auslegekriterien einer Sprinkleranlage, die nicht nur Personen- und Sachschäden, sondern auch Umweltschäden minimieren kann. Sprinkleranlagen werden für Wirkflächen von 150 bis 300 m<sup>2</sup> und Wasserleistungen pro m<sup>2</sup> zwischen 2,5 mm/min und 30 mm/min ausgelegt. Durch das schnelle Eingreifen profitiert der Umweltschutz durch geringere Luft- und Bodenverschmutzung sowie weniger Gewässerverunreinigungen. Die positiven Erfahrungen mit Sprinkleranlagen werden auch von Sachversicherern mit hohen Rabatten bewertet. Für bestimmte Zeiträume und anhand von 70 Betriebsstätten wird die Effizienz von Sprinkleranlagen dargestellt, wobei z.B. die Schadenssummen für ungesprinklerte Flächen um den Faktor 10 höher liegen.

## 2.2 Brände und Sprinkler

In /12/ zeigen einige Beispiele den schnellen Löscherfolg von Bränden bei Sprinklereinsätzen. Die Brandlast bestand z. B. aus PU-Pölstermöbeln. Die Art des jeweiligen Sprinkler hängt von vom Einsatzbereich ab.

In /22/ wird über Brände berichtet, die bei Unruhen in Los Angeles gelegt wurden. Von 9 betroffenen Gebäuden waren 3 mit Sprinklern geschützt. Die Brände konnten damit gelöscht werden. Bei den ungesprinklerten Gebäuden waren die Verluste doppelt so hoch. Es hat sich dabei auch gezeigt, daß bei Brandstiftungen die Wirksamkeit von Sprinklern zur Begrenzung der Brandausbreitung nicht ersetzt werden können, da sie einen Brand bereits im Entstehungsstadium bekämpfen. Auch bei Unruhen werden sie als

einzig wirksames Mittel angesehen.

Elliot und Butters /23/ erwähnen einen Brand in Philadelphia, der im 27. Stock eines Hochhauses ausbrach und nach oben übergriff. Im 30. Stockwerk konnte der Brand durch eine Sprinkleranlage gelöscht werden. Der schwierige Löscheinsatz durch die Feuerwehr kostete 3 Feuerwehrleuten das Leben, 16 weitere Personen wurden verletzt.

### 2.3 Stapellagerung und Sprinkler

Yao /9/ berichtet über die Installation von Sprinklern bei Lagerhöhen von 4,6 m in den 70er Jahren. Die allgemeine Entwicklung danach führte zu höheren Lägern bis bis zu einer Höhe von 7,6 m in 9,1 m hohen Gebäuden. Damit verbunden war die Entwicklung von Großtropfen- und ESFR-Sprinklern, deren Tropfen den Brandherd besser erreichen können.

Maurno /24/ weist darauf hin, daß seit der Zulassung von ESFR-Sprinklern für Kunststoffartikel auch Paletten geprüft werden. Der eingesetzte Druck an den Sprinklern reduziert sich von 5,2 bar auf 3,5 bar. Die Beladung kann auf Gestellen bis zu 7,6 m Höhe erfolgen. Eine Stapelung in den Gängen kann dagegen eine Anlage überfordern.

Briers /25/ erwähnt die Klassifikation von Risiken in Lägern. Sie werden in 4 Klassen eingeteilt und bezeichnet als leichtes Risiko, als normales Risiko mit 4 Unterklassen je nach Höhe, als hohes Risiko (Produktion) und als hohes Lagerrisiko. Die gestapelten Stoffe dagegen werden in 5 Klassen untergliedert. Dabei wird über die verschiedenen Produkte und Geometrien berichtet. Bei einer Überschreitung der Lagerhöhe ist eine höhere Wasserbeaufschlagung bis zu 30 mm/min oder eine Zwischenebenensprinklerung vorgeschrieben. Auf europäischer Ebene soll versucht werden, die Auswahl der Sprinkler zu vereinheitlichen.

In /26/ wird anhand von 2 Bränden in Lägern auf die Wichtigkeit des ausgewählten Sprinklers für bestimmte Risiken hingewiesen. So konnte z. B. ein Polystyrolbrand mit großen Tropfen und ein Brand von Mitteln zur Schönheitspflege mit einem erst bei 140 °C öffnenden Sprinkler gelöscht werden. FM hat die Brandrisiken in Klassen von I bis IV eingestuft, wobei auf Einzelheiten wie z.B. Abstände, Höhen und Gangbreiten oder auch auf Trocken- bzw. Naßsysteme geachtet werden muß. Die Einstufung ist für die Auswahl der Sprinkler und für die Art der Lagerung von großer Bedeutung.

Berghoff /27/ behandelt die Normung von Bauteilen und die Installation von Sprinkleranlagen und erwähnt dabei ESFR- und Großtropfensprinkler. Desweiteren gibt er Kennwerte von Sprinkleranlagen wie z. B. Brandgefahrenklassen, Wasserbeaufschlagungen und Wirkflächen sowie eine Einstufung von Lagermaterialien anhand von Tabellen an.

Grisoni /28/ berichtet von der immer höheren Lagerung an brennbaren Stoffen, wobei zur Unterstützung von Deckensprinklern auch Zwischenebenensprinkler installiert werden. In diesem Zusammenhang werden auch Großtropfen- und ESFR-Sprinkler genannt. Diese können bei einem Betriebsdruck von 3,5 bar bei Lagerhöhen von 7,6 m in 9 m hohen Gebäuden eingesetzt werden. Bei Nutzungsänderungen gibt es ebenfalls keine Probleme. Eine höhere Empfindlichkeit des Sprinklers mit einem RTI-Wert von 29 erlaubt bereits den Einsatz bei einem sich erst ausbreitenden Brand mit 1200 kW. Dagegen werden bei einem RTI-Wert von 180 bei einem Brand bereits eine Wärmefreisetzung von 4200 kW erreicht und der Löscheinsatz wird schwieriger.

In /29/ wird von der Installation von ESFR-Sprinklern in der ganzen Welt berichtet. Diese Sprinkler können mit einem Druck von 3,5 bar in verschiedenen Lägern bei Einzellagerreihen, bei Doppelreihen und je nach Brandgut, auch Aerosole, Kunststoffe oder Papierrollen in unterschiedlichen Lagerhöhen bis zu 7,6 m bei Raumhöhen von 9 m eingesetzt werden.

Gibson /30/ gibt an, daß die Anzahl der Lagerbrände gemessen an der Gesamtanzahl von Bränden nur 32 %, bei den Schäden jedoch über 72 % betragen. Die gelagerten Stoffe werden in verschiedene Kategorien eingeteilt. Brennbare Flüssigkeiten in Regalen können z. B. mit Sprinklern beherrscht werden. Die Art der Lagerung beeinflusst jedoch einen Brand erheblich. Der Trend geht zu automatischen Lagern mit größeren Höhen und immer mehr gelagerten Gütern, d. h. hohe Werte auf engstem Raum. Die Schutzmöglichkeiten von Regalen und Gängen bestehen aus Decken- und Zwischenebenen-sprinklern. Großtropfen- und ESFR-Sprinkler können bei Stapelhöhen bis 10,6 m, bei Kunststoffen bis 7,6 m eingesetzt werden.

Für Diericks, Briers und Rombouts /31/ sind die 3 entscheidenden Einflüsse beim Löschen die Sprinklerempfindlichkeit, die Wasserbeaufschlagung und die Lagerdichte. Der Abstand vom Lagergut zum Sprinkler beeinflusst das Löschen ebenso wie der Verbrennungsvorgang selbst oder das Erreichen des Brandherdes durch die Tropfen. Bei einer max. Gebäudehöhe von 9,1 m können bis zu der Lagerhöhe von 7,6 m Papierrollen, Reifen, Aerosole, Kunststoffe und brennbare Flüssigkeiten gelagert werden. In dieser Arbeit wird ausführlich über die Lagergüter und Verpackungen, die Lagerhöhen und Wasserbeaufschlagungen sowie die Installation der Sprinkler unter der Decke oder in Zwischenebenen berichtet. Dies wird durch Tabellen verdeutlicht. Für die weitere Entwicklung sollten europäische und amerikanische Vorschriften angenähert werden.

#### 2.4 Lüftung und Sprinkler

Friedman /32/ gibt einen Überblick über Computermodelle von 62 Programmen aus 10 Ländern, die sich mit Bränden und dem dadurch entstehenden Rauch befassen, wobei verschiedene Schwerpunkte gelegt wurden. Zusätzlich wird in 3 Modellen auf die Wechselwirkung eines Sprinklersprays mit dem Feuer eingegangen.

Hadjisophocleous /33/ erwähnt Computermodelle als wesentliche

Bestandteile für die Brandsicherheit. In diesen Modellen werden z. B. die Brand- und Rauchbewegungen in Gebäuden erfaßt sowie die Ansprechzeiten von Sprinklern und Meldern bestimmt.

Hinkley /34/ gibt einem ausführlichen Bericht über Modellvorstellungen, die klären sollen, ob Lüftungsanlagen praktische Auswirkungen auf die Auslösezeiten von Sprinklern besitzen. Es wird u. a. die Meinung vertreten, daß Lüftungsanlagen erforderlich sind, wenn Brände nicht gleich durch eine Sprinkleranlage gelöscht werden können, aber die Meinungen gehen diesbezüglich auseinander. Für das beschriebene Modell mit und ohne Lüftung werden bestimmte Anforderungen gestellt. Es werden z. B. Kenngrößen von der Brandlast, den Raumabmessungen, der Brandgröße beim Auslösen des ersten Sprinklers, den Sprühweiten und der Kühlwirkung der Sprinkler, den Strömungsverhältnissen und den Temperaturen, den Wechselwirkungen zwischen Sprinkler und den heißen Brandgasen sowie der Lüftung benötigt. Anhand zahlreicher Gleichungen, Tabellen und Bilder werden die Ergebnisse mit unterschiedlichen Parametern dargestellt.

Ingason und Olsson /35/ erwähnen, daß es notwendig ist, Methoden zu finden, die die Wechselwirkung zwischen den Ventilationsbedingungen und dem Auslösen des ersten Sprinklers beschreiben. Modellrechnungen und Kleinversuche sind vorhanden, aber es mangelt an Großversuchen, um Daten zu erhalten. In Schweden werden diesbezüglich seit 1990 Untersuchungen in einem Brandraum mit den Abmessungen 7,5 m x 15 m x 6 m in einer Versuchshalle mit der Größe 18 m x 22,3 m x 20 m durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Meßeinrichtung mit einem Gasbrenner bis zu 1,7 MW und der Absaughaube werden genau beschrieben. Temperatur- und Druckmessungen sowie die Wärmeleistung des Brandes gehen in die Modellrechnungen mit ein. Die Wirkung eines Sprinklers in der Nähe des Abzuges ist größer als bei weiterer Entfernung. Das Sprinklerspray kühlt die Gasschicht ab und verringert die Geschwindigkeit. Weiterhin wurden für 2 verschiedene Sprinkler Auslösezeiten zwischen 2 min und 12 min, Deckentemperaturen bis 130°C, Geschwindigkeiten bis 4 m/s und eine Schichtdicke unter der Decke

von ca. 1 m ermittelt. In zahlreichen Tabellen und Bildern sind die Ergebnisse aufgeführt.

Für Hinkley, Hansell, Marshall und Harrison /36/ ist der Sprinklereinsatz vor dem Eintreffen der Feuerwehr sehr nützlich. Auch Rauchabzüge werden bei starker Verqualmung als positiv eingeschätzt. Ein sehr ausführlicher Bericht befaßt sich mit Untersuchungen über das Zusammenwirken von Sprinklern und der Ventilation durch Öffnungen an der Decke. Versuche mit stationären bzw. anwachsenden Bränden bis zu 5 MW bzw. 14 MW und 55 Sprinklern für den Löscheinsatz wurden durchgeführt. Die ausführliche Beschreibung des 50 m x 20 m x 10 m großen Gebäudes mit 40 Ventilationsöffnungen, stehenden Sprinklern mit einer Wasserbeaufschlagung von 5 mm/min wird durch Bilder verdeutlicht. Als Parameter wurde die Anzahl der geöffneten Lüftungsklappen variiert, was sich unterschiedlich auf die Temperatur auswirkte. Die experimentellen Ergebnisse wurden mit den Berechnungen verglichen. Die jeweiligen Temperaturen, die Geschwindigkeiten unter der Decke, die Kohlendioxidkonzentration sowie die Anzahl, die Zeit und die Position der ausgelösten Sprinkler werden aufgeführt. Das Auslösen des ersten Sprinklers lag zwischen 28 s und 169 s. Bei sich schnell ausbreitenden Bränden haben Lüftungsöffnungen weniger Einfluß auf die Sprinkler.

Hagen /37/ berichtet von früheren Auffassungen über den Ersteintritt von Sprinklern und die anschließende Auslösung der Rauchwärmeabzugsanlage (RWA), was in den USA übernommen wurde. Zur Personenrettung ist es sinnvoll, die RWA frühzeitig auszulösen. Berechnungen und anschließende Versuche in Gent sollten den Einfluß von RWA auf Sprinkler bzw. den Brand klären helfen. Über Ergebnisse wird nicht berichtet.

Mawhinney /38/ beschreibt Untersuchungen in Räumen mit den Abmessungen 6 m x 6 m x 3,6 m, wobei offene oder geschlossene Türen die Rauchausbreitung beeinflussten. Die Brandintensität wurde durch mehr oder weniger Sprinklerwasser geregelt, was durch Temperaturmessungen sichtbar wurde. Bei Holzkrippen als Brandlast

wurde die Wärmefreisetzung mit  $4,1 \text{ l}/(\text{min m}^2)$  Wasser um ca. 50 % erniedrigt. Durch die Wegnahme der Strahlungswärme, d. h. durch die Abnahme der Temperatur, zerspringen weniger Fensterscheiben. Ebenfalls ändern sich die Druckverhältnisse und der Auftrieb der Brandgase wird gebremst. Ein erfolgloses Löschen bringt mehr toxische Gase, die in Treppenträume eindringen und damit Druckbelüftungen notwendig erscheinen lassen.

## 2.5 Anzahl der ausgelösten Sprinkler

Schäfers und Pröbldorf /1/ geben in Tabellen neben den betreffenden Bränden die Anzahl der ausgelösten Sprinkler an, wobei festzustellen ist, daß die meisten Brände mit nur einem Sprinkler gelöscht werden konnten. Die Erfolgsquote liegt bei 98,1 %. Beim Einsatz von bis zu 2 Sprinklern liegt sie bei 61 %, bis zu 4 Sprinklern bei 77 % und von bis zu 10 Sprinklern bei 89,5 %.

In /12/ werden anhand von Tabellen u. a. die Anzahl der vorhandenen und der ausgelösten Sprinkler bei einer Anzahl von 8917 Bränden genannt und für Europa, USA sowie für Australien und Neuseeland aufgeschlüsselt dargestellt. Weiterhin werden für die in den Jahren 1978 bis 1987 ausgebrochenen Brände die Anzahl ausgelösten Sprinkler aufgeführt.

Young /13/ gibt die in Australien und Neuseeland mit Sprinklern kontrollierten Brände sowie die jeweilige Anzahl der ausgelösten Sprinkler an. Zusätzlich werden Brände in verschiedene Risiken wie Hotel, Büro u. a. aufgeschlüsselt und die mit einem Sprinkler und mit bis zu vier Sprinklern gelöschten Brände angegeben.

Mawhinney /19/ untergliedert in seinem Bericht, wieviele Sprinkler bei welchen Bränden geöffnet haben. Bei über der Hälfte wurde zum Löschen nur 1 Sprinkler benötigt. Außerdem werden neben der Anzahl der Brände und der Brandschäden die zugehörige Anzahl der Sprinkler genannt, die von einem bis zu mehr als 26 Sprinkler reicht.



In /22/ wird neben Bränden in bestimmten Gebäudearten jeweils die Anzahl der bei einer installierten Sprinkleranlage ausgelösten Sprinkler angegeben. In einem Geschäftslager konnten mit 22 Sprinklern 9 gelegte Brandherde gelöscht werden. In einer Tabelle werden 34 Brände und die jeweils zum Löschen ausgelöste Anzahl von Sprinklern genannt.

In /31/ wird u.a. von der Anzahl der ausgelösten Sprinkler berichtet. Bei 75 % der Brände wurden weniger als 5 Sprinkler und bei 95 % der Brände weniger als 25 Sprinkler ausgelöst.

Nugent und Hall /39/ beschreiben Brandversuche mit unterschiedlichen Parametern. Die Anzahl der dabei ausgelösten Sprinkler bei insgesamt 178 installierten Sprinklern wurde mit 37 bzw. 13 Sprinklern angegeben. Bei Lachenbränden lösten bei unterschiedlichen Auslösetemperaturen der Sprinkler von 74 °C bzw. 130 °C max. 31 bzw. 19 Sprinkler aus.

Stephens /40/ gibt in Tabellenform die bei Brandversuchen ausgelöste Anzahl von Sprinklern an.

## 2.6 Brandversuche und Sprinkler

Bamert /4/ berichtet über Brandversuche an unterschiedlichen Lagern (Regal-, Block-), über die Lagerung gefährlicher Stoffe und deren Schutz sowie über Tests mit brennbaren Flüssigkeiten und Schlußfolgerungen für den Einsatz von Sprinklern.

Nugent und Hall /39/ machen ausführliche Angaben über zahlreiche Versuche mit brennbaren Flüssigkeiten, die sich z. B. als Lachen auf dem Boden bis zu 80 m<sup>2</sup> oder in auslaufenden Behältern auf Regalen befanden. Der erste der jeweils installierten Sprinkler löste je nach Versuch nach einer Versuchszeit zwischen 11 s und 1 min 19 s aus, andere Sprinkler folgten. Die eingesetzten Wasserbeaufschlagungen reichten bis zu 240 l/(min m<sup>2</sup>). Bei einigen Versuchen wurde auch Schaum (Aquaous Film Forming

Foam, AFFF) zugemischt. Weitere Größen wie die Zündmenge an Heptan, die Temperatur, der Windeinfluß, die Verschäumung, die Anzahl der Sprinkler, deren Abstände, die Branddauer, die Auslösezeiten der einzelnen Sprinkler, die einzelnen Wasserbeaufschlagungen, die jeweils verwendeten Sprinkler und die Löschzeiten werden angegeben. Die Brände konnten je nach Parameter nur teilweise gelöscht werden sowohl mit Schaum- als auch mit Standardsprinklern. Die Untersuchungen wurden in mehreren Jahren durchgeführt. Einzelheiten sind dem Versuchsbericht zu entnehmen, der auch ein großes Literaturverzeichnis umfaßt.

Stephens /40/ berichtet über einen Brand in einer Brennerei und den daraufhin durchgeführten Versuchen in einem Raum mit einer Fläche von 30 m x 30 m. Als Parameter wurden u. a. unterschiedliche Brandlasten, Sprinkler und Wasserbeaufschlagungen verwendet. Dabei bewirkten höhere Wasserbeaufschlagungen einen besseren Kühleffekt an der Decke und somit das Auslösen von weniger Sprinklern. Einzelne Versuche werden ausführlich beschrieben und Auslösezeiten der Sprinkler angegeben.

Bei Madrzykowski und Vettori /41/ sollte ein Brand- und Löschalgorithmus für Büromöbel aus Holz, Kunststoff, Schaum oder Textilien gefunden werden. Der Löscheffekt wurde charakterisiert anhand der Reduzierung der Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit (Heat Release Rate, HRR). Die Messung erfolgte über die Absaughaube (Fire Product Collector, FPC). Die Brandlast von ca. 300 kg bestand aus Sofas, Polsterstühlen, Holztischen, Stühlen, Computer und Papier. Die Deckenhöhe des Versuchsraumes betrug 2,44 m, die Sprinklerhöhe 2,35 m und die Wasserbeaufschlagung 94,6 l/min. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Abnahme der HRR-Kurve nach dem jeweiligen Sprinklereinsatz.

Ingason /42,43/ untersuchte u.a. in Großversuchen in einem Raum von 9,6 m x 6 m x 3 m den Einfluß von Farbschichten auf Glasfasersprinklern mit Fäßchendurchmessern von 3 mm und 8 mm, die z. B. in Farbsprühkabinen installiert oder bei Renovierungsarbeiten überstrichen werden. Als Brandgut wurde Heptan verwendet. Es

wurde festgestellt, daß der Schutz eines Sprinklers durch Beutel aus unterschiedlichen Materialien oder bei einem Farbanstrich die Ansprechzeiten um 2 bis 5 mal verlängert. Schnellansprechende Sprinkler lösten mit und ohne Schutz schneller aus als herkömmliche Sprinkler.

Chow und Wong /44/ studierten das Eindringvermögen eines Sprinklersprays in einem Raum der Größe 4 m x 2,96 m x 2,9 m und fingen auf dem Boden an 120 Stellen in Behältern von 25 cm x 25 cm das versprühte Wasser auf. Die Wasserbeaufschlagung betrug hier 57,6 l/min und wurde von verschiedenen Positionen im Raum aufgebracht. Sprinkler werden als geeignet angesehen zum Schutz von Personen und Sachwerten, wobei sowohl die Umgebung gekühlt als auch die brennenden Oberflächen benetzt werden. Dabei können oft kleinere Tropfen den Brandherd nicht erreichen, so daß nur größere Tropfen auf den Brandherd gelangen.

Hoffmann und Galea /45/ machen Angaben über Brandversuche in Räumen unterschiedlicher Abmessungen, wobei als Zündquelle entweder ein Papierkorb oder ein Bett verwendet wurde. Zum Löschen wurden Sprinkler mit einer mittleren Tropfengröße von 1 mm und einem RTI-Wert von 46 eingesetzt. Die Versuchsergebnisse werden mit Modellrechnungen verglichen und in Bildern dargestellt.

Kim /46/ gibt für den Schutz von Glasscheiben 2 prinzipielle Kriterien an, nämlich frühe Aktivierung der Sprinkler und genügend Wasser. Bei Vermeidung großer Temperaturgradienten können mit Sprinklern geschützte spezielle Gläser einem Brand länger als eine Stunde standhalten. Bei diesbezüglichen Versuchen in einem Raum der Größe 3,6 m x 3,3 m x 3,3 m konnte dies je nach Scheibengröße, Ausführung des Fensterrahmens sowie Position der Sprinkler nachgewiesen werden. Tabellen belegen die Ergebnisse.

Bei Seeger /47/ wird über die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Versuche berichtet, wobei Wasserverteilungen unterschiedlicher Sprinkler gemessen und von einem auf 4 Sprinkler hochgerechnet wurde. Zusätzlich wurde das bei

Versuchen festgestellte frühere Ansprechen von Sprinklern bei der Blocklagerung gegenüber der Stapellagerung erwähnt.

Wighus /48/ beschreibt Brand- und Löschversuche in einem Raum mit den Abmessungen 2,5 m x 2,5 m x 5 m, bei denen mit einem 1 MW-Propanbrenner Lachenbrände simuliert werden. Der Löschein-satz erfolgte mit Sprühdüsen mit Tropfendurchmessern von 0,5 mm bis 1,6 mm. Dadurch werden die Oberflächen gekühlt und die Wär-mestrahlung vermindert. Die Versuche zeigten, daß bei zu gerin-ger absorbiertes Wärme des Wassers der Brand nicht gelöscht wer-den konnte. Kleine Tropfen bewirken einerseits eine stärkere Ab-nahme der Raumtemperatur, werden jedoch andererseits teilweise in den oberen Schichten verdampft und auch durch die Lüftung weggetragen.

Persson /49/ stellt eine neue Methode zur Klassifizierung von verschiedenen Produkten mit dem von FMRC entwickelten Kalorime-ter zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate für den Sprinkler-schutz in Lägern vor, wobei neben dem Lagergut vor allem die Lagerhöhe als wichtig angesehen wird. Insgesamt 18 Versuche mit Sprinklereinsatz und 8 unterschiedlichen Aufbauten wurden unter diesem Kalorimeter durchgeführt. Die Sprinkler befanden sich 3,05 m über den Paletten. Die Wasserbeaufschlagungen betragen 4,5 mm/min bis 20,8 mm/min. Die Ergebnisse werden anhand von Bildern verdeutlicht. Weitere Versuche sollen folgen.

Klein /50/ führt 2 Versuche mit 2 verschiedenen Sprinklern an, die einen unterschiedlichen Löscherfolg zeigten. Zur Beantwor-tung dieses Ergebnisses wurden beim Verband der Sachversicherer (VdS) an Sprinklern die kinetische Energie, die Tropfengröße, die Wasserverteilung und das Mitreißen von Luft gemessen.

Wagner /51/ gibt Methoden zur Bestimmung der erforderlichen Was-serbeaufschlagung an, wobei zunächst die Einstufung in Brand-gefahren erläutert werden. Zusätzlich werden Brandversuche des Commite Europeen des Assurances (CEA), der Factory Mutual (FM) Research Corporation (FMRC) und des Verbandes der Sachversiche-

rer (VdS) erwähnt. Sowohl in den USA als auch in Schweden wurden Versuche mit Sprinklern bis zu einer Wasserbeaufschlagung von 20 mm/min und der Absaughaube (Fire Product Collector, FPC) mit ähnlichen Ergebnissen durchgeführt.

Ingason, Persson und Ryderman /52/ erwähnen in ihrem Bericht zahlreiche in einem Raum von 60 m<sup>2</sup> durchgeführte Brandversuche mit versprühtem Öl oder mit Lachen bis zu 12 m<sup>2</sup>, die mit Sprinklern kontrolliert bzw. gelöscht wurden. Als Zusatzmittel zum Wasser wurde AFFF verwendet. Bei den Versuchen wurden u.a. Temperaturen, Drücke, Rauchsichtdicken, die Wärmestrahlung und Wärmeleistung sowie die Löschzeiten gemessen.

Für Pryzbyla und Gandhi /53/ hängt das Brandverhalten in einem Lager mit brennbaren Flüssigkeiten von Faktoren ab, die sich durch die Art der Lagerbehälter, des Materials der Verpackung sowie dem Lager selbst ergeben. Diesbezüglich wurden 22 Paletten-Brandversuche mit Wasserbeaufschlagungen bis ca. 80 mm/min durchgeführt. Unterschiedliche Brandausbreitungen wurden z. B. durch verschiedene Flüssigkeiten, Verpackungsarten und Konfigurationen erreicht. Es wurde festgestellt, daß sich langsam ausbreitende Brände kontrolliert werden konnten und sich schnell entwickelnde Brände nicht.

Kokkala /54/ beschreibt eine Brandversuchsserie an brennbaren Flüssigkeiten mit Flammpunkten zwischen -6 °C und 234 °C und mit 7 verschiedenen Sprinklern bzw. Düsen in einer Höhe von 3 m und 8 m bei einer quadratischen Anordnung im Abstand von 2,1 m und 3 m. Die Flüssigkeitslachen hatten eine Größe zwischen 0,4 m<sup>2</sup> und 12 m<sup>2</sup>. Die unterschiedlichen Parameter machten sich beim Löscheinsatz bemerkbar. Flüssigkeiten mit Flammpunkten höher als 60 °C konnten mit einer Wasserbeaufschlagung von mehr als 25 mm/min beherrscht werden und mit Flammpunkten höher als 120 °C mit mehr als 10 mm/min. Brände mit der gleichen Grundfläche von 1,6 m<sup>2</sup> konnten mit einer Wasserbeaufschlagung von 7 mm/min Wasser gelöscht werden, mit 34 mm/min Wasser aus einer anderen Düse dagegen nicht. Tabellen und Bilder verdeutlichen die Ergebnisse.

Bei Cousin /55/ werden Versuche in einem Flugzeugrumpf mit zahlreichen Variablen aufgeführt, bei denen Temperatur, Rauchdichte, Strahlung und mehrere Gase gemessen wurden. Die Untersuchungen in einem  $1 \text{ m}^3$  Raum mit mehreren Düsen und Tropfen zwischen 0,2 und 0,3 mm zeigten, daß Brände der Klasse A in geschlossenen Räumen gelöscht werden konnten. Bilder zeigen die entsprechende Versuchsanordnung.

Mulhaupt /56/ beschreibt zahlreiche Brand- und Löschversuche mit Lagerbehältern aus Metall und Kunststoff mit verschiedenartigen brennbaren Flüssigkeiten. An Paletten- und Kleinversuchen wurde z. B. festgestellt, daß diese mit bis zu 160 mm/min Wasser nicht gelöscht werden konnten. Gleichartige Versuche erfolgten mit Schaumzusätzen zum Löschwasser bis zu 6 %. Bei erfolgreichen Versuchen konnten 4 bis 5 Sprinkler in weniger als 4 min den Lagerbrand löschen. Einzelheiten über die genauen Versuchsparameter sind dem Bericht zu entnehmen.

Ingason erwähnt in /57/ und in /35/ Untersuchungen in Schweden, um die Wirkung von Sprinklern auf die Deckenströmung und die Entlüftung sowie den Einfluß auf den Installationsort zu erhalten. Dabei wurden 3 verschieden große Brände und 3 Sprinklertypen eingesetzt sowie die Höhe variiert. Die Ergebnisse werden in Feldmodellen verwendet, um z. B. das Auslösen von Sprinklern vorausbestimmen zu können.

In /58/ werden Untersuchungen für Seitenwandsprinkler unter Einbeziehung der Raumgröße, der Sprinklerposition, des Brandes, der Ventilation und des Wasservorrates vorgesehen. Als abgeschlossen gelten die Versuche mit unterschiedlichen Sprinklertypen in Hochregallagern, wobei ein Standard-Spray-Sprinkler das beste Ergebnis zeigte. Weiterhin wird von Versuchen in Schallschutzräumen berichtet und geplante Versuche mit Maisöl, Margarine und Butter in Behältern auf Regalen angesprochen.

Lougheed und Mawhinney /59/ berichten über den Sprinklerschutz in Regalen und die für Versuche installierten verschiebbaren

Regale mit on/off- und schnellansprechenden Sprinklern. Die Raumhöhe betrug 2,4 m und der Sprinklerabstand 2,1 m. Bei Untersuchungen mit Seitenwandsprinklern konnte im Gegensatz zu anderen der Brand mit  $28 \text{ l}/(\text{min m}^2)$  gelöscht werden. Weitere Versuche wurden mit geänderten Parametern durchgeführt.

Georgi /60/ berichtet über 10 Versuche an Lagerhilfen aus Polypropylen. Dabei werden wichtige Kriterien genannt wie brennendes Abtropfen, Verhalten wie bei brennbaren Flüssigkeiten, rasante Brandausbreitung, Isolationswirkung bei zweischaligen Behältern und Entsorgung der Schmelzen und Feststoffe. Die Brandbekämpfung mit Wasser ist selten mit einem Löscherfolg verbunden. 7 Versuche mit einer 3 m hohen Blocklagerung und 3 Versuche mit Regallagerung zeigten, daß zum Löschen jeweils mehrere Parameter erfüllt sein müssen. Einzelne Ergebnisse können Tabellen entnommen werden.

Smith, Ryan und Pro /61/ erwähnen den Einfluß der Ventilation auf das Wasserspray von Sprinkleranlagen und führen diesbezügliche Versuche in einem rechteckigen 2,3 m x 1,8 m und 9,75 m langen Tunnel mit 6 unterschiedlichen Sprinklern und Luftgeschwindigkeiten bis zu 4 m/s an. Das Sprinklerwasser wurde jeweils in auf dem Boden stehenden Behältern gesammelt. Der Effekt der Ventilation ist von großem Einfluß auf die Kontrolle eines Brandes. Tabellen verdeutlichen die Ergebnisse.

Stephens /62/ weist auf die Installation einer Sprinkleranlage in einer Busgarage hin, die auf einer Fläche von  $325 \text{ m}^2$  mit bis zu 10 mm/min Wasser betrieben werden soll. In Cardington wurden deshalb auf einer Fläche von 30 m x 30 m Doppeldeckerbusse an den Sitzen angezündet. Die Sprinkler in einer Höhe von 9 m konnten den Brand mit 5 bis 10 mm/min Wasser nicht kontrollieren, jedoch mit 14 mm/min ein Übergreifen der Flammen verhindern. Je nach Sprinklertyp mußten bis zu 20 mm/min Wasser eingesetzt werden.

Bill /63/ beschreibt den Verlauf eines Versuchsbrandes in einem

Wohnzimmer, in dem 3 Sprinkler angebracht waren. Es wurde der Massenverlust einzelner Möbelstücke mittels einer Absaughaube sowie Temperaturen, Gasgeschwindigkeiten und Auslösezeiten der Sprinkler gemessen und mittels eines Modells bestimmt. Dabei ist es sehr schwierig, die Wärmeentwicklung beim Auslösen des ersten Sprinklers festzustellen.

Vincent und Kung /64/ vergleichen in 12 Großversuchen mit 2 verschiedenen Zündpositionen 4 europäische und amerikanische Sprinklertypen. Als Brandmaterial wurden Kunststoffbecher in Kartons bis 3 m Höhe und nichtbrennbare Stoffe in Kartons bis 6,1 m Höhe bei einer Sprinklerhöhe von 9,1 m eingesetzt. Bei den Versuchen wurden 27 Temperaturen, der Massenverlust beim Auslösen des ersten Sprinklers bei ca. 1 min, des 2ten Sprinklers nach ca. 2 min und des letzten Sprinklers nach bis zu 16 min sowie die Wasserrate und der entstandene Schaden ermittelt. Durch eine Gegenüberstellung werden die einzelnen Unterschiede verdeutlicht. Im allg. schneiden dabei die Spraysprinkler etwas besser ab.

Stahl /65/ berichtet über Brandversuche an Lagerbehältern aus Kunststoff und gibt die abgeleiteten Konzepte für die Regal- und Blocklagerung wieder. Eine Aussage über den Brandablauf und den Energieausstoß erlaubt die Absaughaube bei FMRC. Die Löschbarkeit z. B. mit Sprinklern wird über den sogenannten Wasserapplikator bestimmt, wodurch man die notwendige Wasserbeaufschlagung erhält. Auf einer Regalanordnung werden 4 verschiedene Kästen auf Paletten angeordnet. Die Wasserbeaufschlagungen reichen von 4,5 mm/min bis zu 20,8 mm/min. Eine 3,05 m über dem Brandgut installierte Sprinkleranlage mit 4 Sprinklern wird als Auslösung des Wasserapplikator verwendet. Insgesamt werden 7 Versuche ausführlich beschrieben. Die Einstufung der Kleinladungsträger (KLT) wurde in die Brandgefahrenklasse 4.4 vorgenommen und auf andere Lagerhilfen aus Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) übertragen.

Mawhinney /66/ erwähnt ein sowohl experimentelles als auch theo-



retisches Untersuchungsprogramm für feine Wasserspray-Systeme in Maschinenräumen, wobei Düsenpositionen, Tropfengrößen und Ausflußraten vorgegeben sowie Ventilation, Druck, Temperatur und Gaskonzentrationen überwacht werden. Die Versuche fanden in einem Raum der Größe 6,1 m x 6,1 m x 3,6 m statt. Im Gegensatz zur Einzelauslösung von Sprinklern wird das Wasserspraysystem als ganzes eingesetzt. Anhand von Bildern wird der Aufbau verdeutlicht.

## 2.7 Einflußgrößen von Sprinklern

Büssem /2/ erwähnt den Tauchtest zur Bestimmung einer Zeitkonstanten, des RTI-Wertes und der Wärmeleitfähigkeit bei Sprinklern sowie eine vorgegebene Strahlkraft, um die Löschfähigkeit zu gewährleisten.

Yao /9/ berichtet von 17 Brandversuchen unter einem Industriekalorimeter bei FMRC zur Bestimmung von RDD-Werten (Required Delivered Density). Dabei wurden Lageraufbauten bis zu einer Höhe von 7,4 m, konvektive Wärmeleistungen des Brandes von 0,2 MW bis 2 MW und Wasserbeaufschlagungen bis zu 25,5 mm/min getestet. Der Brand selbst beeinflusste das Ansprechverhalten der Sprinkler. Die Beschreibung der Meßapparatur und Bilder verdeutlichen die Untersuchungen.

Diericks, Briers und Rombouts /31/ geben für ESFR-Sprinkler ein 4mal schnelleres Ansprechverhalten als bei klassischen Sprinklern an. Der RTI-Wert beträgt 29. Er wird definiert wie folgt:  $RTI=(mc/hA)u^{1/2}$ , mit m=Masse, c=Wärmeoeffizient, h=Wärmeoeffizient, A=Oberfläche des Schmelzlotes und u=Anströmgeschwindigkeit. Weiterhin werden die Absaughaube, das sogenannte Industriekalorimeter sowie Brandversuche mit Paletten zur Klassifizierung von Produkten bei vorgegebenen Wasserbeaufschlagungen beschrieben.

Ingason /43/ führt sowohl Großversuche als auch "plunge tests"

mit 3 mm und 8 mm Glasfaßsprinklern mit und ohne Farbschichten auf, bei denen bei Zunahme der Farbschichtdicke auch der RTI-Wert zunimmt. Ebenso können dadurch die Sprüheigenschaften verändert werden. Einzelne Meßwerte und Parameter werden in Tabellen angegeben.

Persson /49/ weist auf die mit ESFR-Sprinklern durchgeführten Versuche zur Bestimmung von RDD-Werten hin. Diese hängen von der Intensität eines Brandes zum Zeitpunkt der Wasseraufgabe ab. Insgesamt wurden 18 Versuche unter einer Absaughaube, dem sogenannten Industriekalorimeter (Fire Product Collector, FPC), durchgeführt.

Wagner /51/ erwähnt die von FMRC entwickelten Kriterien zur frühen Unterdrückung eines Brandes, nämlich den RTI-Wert, den ADD-Wert und den RDD-Wert und beschreibt die zugehörige Testapparatur sowie das Industriekalorimeter zur Durchführung entsprechender Versuche.

Bei Ingason /57/ werden mit den beiden Testarten, dem "plunge test" bzw. dem "ramp test" die thermische Empfindlichkeit eines Sprinklers wie der RTI-Wert, der C-Wert (Conduction) und der CHP-Wert (Change of phase) bestimmt. Die Versuche werden bei 3 unterschiedlichen bzw. 2 ansteigenden Temperaturen durchgeführt. Anhand der Messungen wird ein 2- und ein 3-Parameter-Modell entwickelt. Außerdem wird der Einfluß des Sprinklergehäuses überprüft sowie die Strömungsverhältnisse und die Wärmeleitung am Glasfaß beschrieben.

Bill /63/ gibt ebenso den "plunge test" zur Bestimmung des thermischen Ansprechverhaltens sowie einen Wärmeleitungsfaktor für niedrige Temperaturen und Volumenströme an.

Chow /67/ beschreibt die thermische Beanspruchung von über 100 Glasfaßsprinklern mit dem "plunge test" und dem "ramp test", die mit den physikalischen Größen ausführlich beschrieben werden. Das Ansprechverhalten der Sprinkler variiert unter den verschie-

denen Bedingungen, die ebenfalls dem Bericht entnommen werden können. In beiden Tests werden die Geschwindigkeiten von 0,2 m/s bis 1 m/s und die Temperaturen von 120 °C bis 200°C variiert und die Ansprechgeschwindigkeit gemessen, die bis zu 937 s dauerte, was aus einer Tabelle ersichtlich ist. Ebenso werden RTI-Werte, Zeitkonstanten und Geschwindigkeiten in Tabellen aufgeführt. Anhand dieser Ergebnisse können Sprinkler besser beschrieben werden.

Ingason /68/ berichtet ausführlich über das thermische Verhalten und die Bestimmung von Parametern bei Sprinklern. Der RTI-Wert wird mittels Wärmezufuhr durch erzwungene Konvektion bestimmt, wobei z. B. der Durchmesser des Glasfäßchens einen Einfluß hat. Der Anteil der Wärmestrahlung ist gering. Beim "plunge test" werden jeweils unterschiedliche Temperaturen und Glasfaßdurchmesser sowie eine konstante Anströmgeschwindigkeit der Luft vorgegeben. Beim "ramp test" beträgt die Temperatur eines Wasserbades 30 °C und wird um 2 °C/min oder 10 °C/min erhöht. Die Ansprechzeit und die -temperatur sind ein Maß für den verwendeten Sprinkler. Die Stege der Sprinkler spielen beim Test eine größere Rolle als bei einem Löscheinsatz. Weitere Parameter werden erfaßt, Berechnungen mit unterschiedlichen Modellen durchgeführt und die Ergebnisse mit den Versuchen verglichen. Tabellen und Bilder geben darüber nähere Auskunft.

In /69/ wird über Versuche in Schweden berichtet, die Aufschluß geben sollen über die zum Löschen erforderliche Wasserbeaufschlagung (Required Delivered Density, RDD) im Gegensatz zur tatsächlichen Wasserbeaufschlagung (Actual Delivered Density, ADD) bei einem Brand mit Paletten, der unter einer Absaughaube, dem sogenannten Industriekalorimeter, stattfand.

## 2.8 Tropfen und Sprinkler

Hoffmann und Galea /45/ beschreiben die Ausdehnung von Feldmodellen auf die Wechselwirkung zwischen Bränden und Sprinkler. Es

müssen dabei z. B. die Wassermenge, die Anzahl und die Position der Sprinkler, das Sprayverhalten und die Tropfengröße beachtet werden. Mit partiellen Differentialgleichungen sowie Euler- und Lagrange Näherungen werden Berechnungen durchgeführt. Es wird in diesem Zusammenhang sehr ausführlich über die verwendeten Parameter und über die praktischen Ausführungen berichtet, die in 2 verschiedenen großen Brandräumen mit den Zündquellen Bett bzw. Papierkorb durchgeführt wurden. Die Tropfengröße des Sprinklers betrug 1 mm. Die Modellrechnung wurde mit dem Brand verglichen und die Ergebnisse in Bildern dargestellt.

Ingason /57/ erwähnt Anstrengungen, anhand von Feldmodellen und Brandversuchen Vorhersagen sowohl über die Brände selbst als auch über das Auslösen von Sprinklern treffen zu können. Dazu gehören die Wechselwirkungen zwischen einem Sprinklerspray und den heißen Brandgasen. Teilweise stimmen die Ergebnisse zwischen Veruch und Modell gut überein.

Bill /70/ benötigt zur numerischen Simulation die Wechselwirkung zwischen einer Heptanflamme und einem Sprinkler. Zwischen 100 kW und 400 kW werden zur Brandsimulation eines Polsterstuhls benötigt. Die Sprinkler werden für die Berechnungen in unterschiedlichen Höhen angenommen. Weiterhin müssen für die Koppelung von Momenten, Massen und Energien z.B. der Tropfendurchmesser, der Einsprühwinkel, die Geschwindigkeit und der Wasserstrom bekannt sein. Die Übereinstimmung von Messungen und Voraussagen werden als gut bezeichnet.

Kunkelmann /71/ befaßt sich mit der rechnerischen Simulation eines Tropfenschwarmes in einer Heißgasströmung. Mit der Stoffwärme- und Impulsbilanz wird ein Monoschwarm gleicher Tropfengröße mit einer Heißgasströmung gekoppelt. Randbedingungen haben dabei einen wesentlichen Einfluß bei der Berechnung. So besitzen z. B. größere Tropfen einen höheren Impuls als kleinere, diese dagegen verdampfen schneller. Die Wechselwirkung zwischen einem Brand und Tropfen aus einem Sprinkler wird ausführlich behandelt und zusätzlich mit Bildern verdeutlicht.

Müller /72/ erwähnt einen Vergleich von berechneten und gemessenen Ergebnissen für max. Schutzflächen und Tropfenradien. Für einen Löscherfolg sollte die Energiefreisetzungsbeschleunigung kleiner sein als die Energiefreisetzungsverzögerung. Die Tropfen bewirken eine Reduktion der Abbrandrate bis die Verbrennungstemperatur die Entzündungstemperatur unterschreitet, was als theoretische Löschezit bezeichnet wird.

Wang /73/ verknüpft in einem Rechenmodell für den Löschvorgang mit Sprinklern Größen wie das Raumverhältnis, die Flammenkonfiguration und die Leistungsfähigkeit der Sprinkler. Die Leistungsfähigkeit hängt von der Auslösetemperatur, dem Trägheitsindex, dem Wärmeleitfaktor am Sprinkler sowie der Tropfenverteilung, der Wasserbeaufschlagung, dem Eindringvermögen, der Düsengröße und dem Betriebsdruck ab.

Covelli /74/ beschreibt das Verhalten von fallenden Tropfen in aufsteigenden heißen Rauchgasen. Es werden dabei die momentane Fallgeschwindigkeit, die Wärmeübertragung und der Stoffaustausch am Einzeltropfen berücksichtigt. Weiterhin sollen die Energie- und die Massenbilanz, die Modellierung der Brandquelle, die Integration der Impulsgleichung sowie die Temperatur und die Luft-einmischung berücksichtigt werden. Die Simulation ergibt eine Tropfentemperatur von 75 °C und eine Abkühlung der Gase in der Nähe der Decke. Bei Vernebelung von Tropfen unter einen Durchmesser von 1 mm ist bei vollentwickelten Bränden keine Löschung mit Düsen möglich.

Unoki /75/ führt in einem Modell die Wechselwirkungen von Sprinklern mit der Auftriebsströmung eines Brandes an. Dabei wird das Durchdringen der Brandgase und die Kühlwirkung berücksichtigt. Ziel ist es, die Wärmefreisetzung am Brandherd zu verhindern. Anhand von Versuchen mit Holzkrippen werden diesbezüglich einige Parameter ermittelt.

Kunkelmann /76/ stellte eine Literaturübersicht über die Brandausbreitung sowie über die Wechselwirkungen des Tropfenschwar-

mes eines Sprinklers mit einer Heißgasströmung zusammen. Dabei werden z. B. Wasserbeaufschlagungen simuliert, die Arbeitsweise von Feld- und Zonenmodellen, das Ausbreiten einer Flammenfront, die Kühlwirkung von Sprühnebeln, die Durch- und Eindringfähigkeit von Tropfen sowie der Einfluß der Tropfengröße behandelt.

Pietrzak /77/ beschreibt ein mathematisches Modell, bei dem ein Brandherd nach dem Flammenübersprung mit einem Wasserspray gelöscht wird. Durch eine Wärme- und Stoffbilanz werden dabei auch Randbedingungen bzgl. des Wassers wie z. B. die Wasserbeaufschlagung, der Tropfendurchmesser, die Löschzeit und der Sprühwinkel berücksichtigt. Die Ergebnisse werden mit Brandversuchen verglichen.

Nach Jackman, Nolan und Morgan /78/ ist zur Bestimmung von Wechselwirkungen zwischen den Sprinklertropfen und den heißen Rauchgasen z. B. der Tropfendurchmesser, die Tropfengrößenverteilung, die Tropfengeschwindigkeit und der Impuls nötig. Bei diesen Betrachtungen werden auch Arbeiten anderer Autoren mit einbezogen. Zur Messung derartiger Parameter wurden ein gepulster Laser und eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Bei über 10000 Einzelmessungen wurden u.a. Angaben über Tropfencharakteristiken, Austrittswinkel, Kollisionen, Drücke, Verdampfung oder auch die Wechselwirkung mit den Gasen erfaßt. Die Daten sind für Modelle nutzbar.

Jackman, Nolan, Gardiner und Morgan /79/ entwickeln die physikalischen Eigenschaften und die Wechselwirkungen zwischen Wassertropfen und Heißgasströmungen. Anhand von Gleichungen mit bestimmten Anfangsbedingungen werden für mehrere Sprinklertypen bei unterschiedlichen Drücken die Tropfenbewegungen, der Wärme- und Massentransport sowie Wechselwirkungen, d.h. Profile der auftriebsbehafteten Rauchgasströmung bestimmt. So wird z. B. angegeben, wieviele Tropfen einer vorgegebenen Anzahl den Ursprung der Rauchsicht erreichen, den Gasstrom verlassen, mitgerissen werden oder verdampfen. Experimentelle Ergebnisse werden zum Vergleich herangezogen.

Alpert /80/ gibt einen Überblick über die Entwicklung eines Sprinklersprays auf eine nach oben gerichtete Flamme mit einer Rauchgasströmung und das Auslöseverhalten von Sprinklern. Zahlreiche Parameter wie z.B. die Wärmefreisetzung, die Sprinklerhöhe und der Tropfendurchmesser gehen in die Simulation ein. Mittels Gleichungen und Bildern wird u.a. die Durchdringung des Sprühkegels in die Brandgassäule verdeutlicht.

### 3. VERSUCHSANLAGE FÜR BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

In Bild 1 ist der Aufbau der Versuchsanordnung dargestellt. Dieser befindet sich in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). Über die Wasserversorgung gelangt das Löschwasser in einen Vorratsbehälter, aus dem über eine Pumpe und diverse Einbauten das Wasser zu den im Bild angedeuteten Sprinklern gelangt. Eine ausführliche Beschreibung befindet sich in /81/.

Weitere Literaturlauswertungen und Ergebnisse früherer Untersuchungen befinden sich in den Berichten /82, 83, 84, 85/. Bei den vorliegenden Untersuchungen befinden sich die Sprinkler in einer Höhe von 7,40 m über dem Hallenboden unter einem Dach mit den Abmessungen 5 m x 5 m, das am Rande mit Rauchschürzen von 0,4 m versehen ist. Die 4 installierten Sprinkler wurden in einem Abstand von 3 m zueinander angeordnet.

Die Brandlast bestand aus Wellpappkartons, die auf EURO-Paletten angeordnet wurden. Die Abmessung je einer Palette betrug 120 cm x 80 cm und die je eines Kartons 58 cm x 37 cm x 34 cm (LxBxH), so daß auf der Palettenfläche je 4 und insgesamt auf jeder Palette 8 Kartons gelagert werden konnten. Als zu verpackendes Lagergut wurden nichtbrennbare Stahlblechkanister mit einem Volumen von ca. 30 l und als Stoßschutzmaterial Kunststoffteilchen (Chips) verwendet, um eine gängige Verpackungsart zu simulieren.

Die Paletten mit den gefüllten Kartons wurden auf den Regalen I,

II und III angeordnet, wie in Bild 1 zu erkennen ist. In jedem Regal wurden auf jeder Ebene 4 Paletten gelagert. In der Höhe wurden je 3 Paletten übereinander gestapelt (Stapel a,b,c,d), so daß insgesamt in den 3 Regalreihen 288 Wellpappkartons gelagert wurden. Die genauen Abmessungen des gesamten Aufbaus können dem Bild 1 entnommen werden.

Die Zündstelle befand sich, wie Bild 1 zeigt, unmittelbar neben der Ecke der Palette des Stapels b in der Ebene 1 im Regal II zentral unterhalb der Sprinkleranordnung. Als Zündmaterial wurden 0,5 l Spiritus in einer Zündwanne mit den Abmessungen 20 cm x 30 cm verwendet.

Das gesamte Regal befand sich auf einer Waagekonstruktion mit den Abmessungen 5 m x 5 m. Die Tragkraft der Waage beträgt  $8 \cdot 10^4$  N, ihre Ansprechempfindlichkeit liegt bei 1 N. In einem Abstand von 6,80 m über der Waageplattform befinden sich die Sprinkler.

Um die bei den Versuchen versprühte Löschmittelmenge bestimmen zu können, wurden 25 Auffangwannen mit einer Kantenlänge von 0,8 m bei den Kaltversuchen auf die Waageplattform und bei den Brandversuchen unter die Waageplattform gestellt, wie in Bild 1 angedeutet.

Für den Löscheinsatz wurden je 4 gleiche Sprinkler unterschiedlichen Typs (Typ G, E und P) an den Stellen S1 bis S4 installiert. Die Auslösetemperatur betrug  $68^\circ$  C bzw.  $74^\circ$  C. Der senkrechte Abstand der Sprinkler zur Brandgutoberseite betrug 3,65 m. Neben jedem Sprinkler wurde in einem Abstand von etwa 2 cm an den Meßstellen TS0 bis TS4 mit Thermoelementen der zeitliche Temperaturverlauf ermittelt.

Als Löschmittel wurde einerseits normales Leitungswasser und andererseits Leitungswasser mit einem Zusatz von "Quellkörpern" verwendet.



In Sprinklerhöhe wurden zentral ein opt. Melder und ein Ionisationsmelder angeordnet, die nach dem Auslösen entfernt wurden, damit sie durch den Brand nicht zerstört wurden.

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG

##### 4.1 Kaltversuche

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen beschrieben, die sich mit der Wasserbeaufschlagung bzw. -verteilung von verschiedenen Sprinklern (Typ G, E, P) auf einer vorgegebenen Fläche von 16 m<sup>2</sup> befassen. Bei diesen Kaltversuchen wird das aus handelsüblichen Sprinklern aus unterschiedlichen Höhen austretende Wasser bzw. das Wasser-Quellkörper-Gemisch in den bereits erwähnten Wannen aufgefangen. Die ermittelten Meßwerte werden mittels eines Computers weiter verarbeitet.

Die jeweilige Höhen der Sprinkler zur beaufschlagten Fläche betragen 0,9 m, 1,5 m, 3,0 m bzw. 3,5 m, 4,7 m und 6,8 m. Die eingestellten Volumenströme variierten je nach Sprinklertyp zwischen ca. 60 l/min und annähernd 500 l/min. Die zuletzt durchgeführten Messungen ergänzen die bereits früher durchgeführten, bei denen eine genaue Einstellung der Volumenströme noch nicht möglich war.

##### 4.1.1 Wasserbeaufschlagung und -verteilung

Tabelle 1 gibt für 3 handelsübliche Sprinkler den aus unterschiedlichen Höhen aufgefangenen Anteil des Wassers bzw. des Wasser-Quellkörper-Gemisches wieder. Die Viskosität des verwendeten Gemisches betrug 25 mPa s. Als zusätzliche Parameter wurden die austretenden Volumenströme variiert. Zum Vergleich wurden einige Werte aus einem früheren Bericht entnommen /81/.

Bei einem Volumenstrom von ca. 60 l/min zeigt sich beim Sprink-

ler Typ G mit zunehmender Höhe von 0,9 m auf 6,8 m eine Verringerung des auf der vorgegebenen Fläche aufgefangenen Wasseranteils von 95 % auf 42 %. Dies bedeutet, daß ab einer Höhe von ca. 3 m ein größerer Anteil über die Wannens hinaus versprüht wird.

Bei höheren Volumenströmen von ca. 90 l/min bis ca. 160 l/min ist bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m bereits eine Abnahme des austretenden Volumenstromes um ca. 20 % zu erkennen. Höhen bis zu 6,8 m lassen den aufgefangenen Wasseranteil auf ca. 50 % absinken. Durch die Zumischung von Quellkörpern wurde bei einem Volumenstrom von ca. 160 l/min und der Höhe von 6,8 m ebenfalls etwa die Hälfte des austretenden Gemisches aufgefangen.

Die Messungen der Wasserbeaufschlagung mit dem Sprinkler Typ E bei höheren Drücken von 5 bar wie in /81/ bzw. 3,5 bar zeigen, daß durch das mittenbetonte Sprühbild auch aus größeren Höhen von 6,80 m wesentlich mehr Wasser auf der vorgegebenen Wannensfläche auftrifft. Dies ist besonders bei den Volumenströmen über 350 l/min der Fall, bei denen dieser Sprinklertyp normalerweise betrieben wird.

Für den Sprinkler Typ P wurden für die eingestellten Höhen von 0,9 m bis 6,8 m bei einem Volumenstrom von ca. 120 l/min Wasseranteile von 92 % bis 44 % gemessen. Eine Zunahme des Volumenstroms auf ca. 160 l/min bewirkte, daß bei einer Höhe von 0,9 m nur 79 % und damit weniger Wasseranteile auf der Fläche auftrafen wie zuvor. Bei den anderen Höhen bis 6,8 m entsprechen die Werte denen bei den Volumenströmen von ca. 120 l/min.

Die Tabelle zeigt weiterhin, daß durch die Zumischung von Quellkörpern bei diesem Sprinkler (Typ P) und einem Volumenstrom von ca. 120 l/min bzw. ca. 160 l/min bei den durchgemessenen Höhen immer höhere Wasser-Quellkörper-Gemischanteile auf der Meßfläche auftrafen. Dies ist sicherlich auf die gegenüber dem Wasser erhöhte Viskosität und der dadurch bedingten geringeren Sprühweite des Wasser-Quellkörper-Gemisches zurückzuführen. Beim Sprinkler

Typ G konnte dies aufgrund eines anderen Sprühbildes nicht festgestellt werden.

Die Bilder 2 bis 9 zeigen jeweils die mit den Sprinklern der Typen G, E und P aufgenommenen Wasserbeaufschlagungen in Abhängigkeit vom Radius, wenn der jeweilige Sprinkler zentral über der Meßfläche an der Stelle S0 in unterschiedlichen Höhen von 0,9 m bis 6,8 m über dem Wannensfeld installiert ist.

Da ein Sprinkler kein symmetrisches Sprühbild liefert, wurden auf gleichen Radien um den Sprinkler Mittelwerte für die Wasserbeaufschlagung ermittelt, so daß die entsprechende Kurve beim gemittelten Wert der zentralen Auffangwanne erst bei einem Radius von 0,2 m beginnt. Die jeweilige Kurve endet bei einem Radius von 2,6 m, obwohl auch größere Reichweiten erzielt werden können.

In den Bildern ist jeweils für einen Sprinklertyp und einen vorgegebenen Volumenstrom die Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aufgetragen. Als Parameter wurde die Sprinklerhöhe über den Auffangwannen gewählt.

In Bild 2 ist für den Sprinkler Typ G bei einem Volumenstrom von 60 l/min die Wasserbeaufschlagung aus 4 unterschiedlichen Höhen aufgetragen. Bei der Höhe von 0,9 m zeigt sich ein deutliches Maximum von ca. 9 mm/min bei einem Radius von ca. 0,7 m. Danach erfolgt bis zu einem Radius von 2,5 m eine deutliche Abnahme auf ca. als 1 mm/min. Bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m liegt das Maximum mit ca. 5 mm/min deutlich niedriger, wird aber von den wenig abfallenden Werten bis zu einem Radius von 2,5 m ausglich, so daß die gesamte aufgefangene Menge gleich bleibt (Tabelle 1). Bei Höhen von 3,5 m bis 6,8 m wird deutlich, daß bis zu einem Radius von 2,5 m wesentlich weniger Wasser auf der vorgegebenen Meßfläche auftritt. Dies bedeutet, daß ein Teil des versprühten Wassers bei gleichen Bedingungen eine größere Reichweite besitzt.

Wird wie in Bild 3 der versprühte Volumenstrom auf 90 l/min erhöht, so kann festgestellt werden, daß alle gemessenen Werte angestiegen sind. Das Maximum bei einer Sprinklerhöhe von 0,9 m liegt jetzt bei ca. 11 mm/min. Die Kurve bei einer Höhe von 1,5 m liegt bis zu einem Radius von 2,5 m nur wenig unterhalb der Marke von 5 mm/min. Bei Sprinklerhöhen über 3,5 m ist zu erkennen, daß mit zunehmendem Radius auch die Wasserbeaufschlagungen geringfügig zunehmen. Die aufgefangene Wassermenge ab einer Höhe von 1,5 m ist bereits deutlich geringer als bei einem Volumenstrom von 60 l/min (Tabelle 1), d. h. das Wasser wurde weiter nach außen versprüht.

Eine weitere Erhöhung des Volumenstromes auf 120 l/min wie in Bild 4 hat zur Folge, daß bei einer Sprinklerhöhe von 0,9 m die Wasserbeaufschlagung deutlich zunimmt, die aufgefangene Wassermenge jedoch abnimmt (Tabelle 1). Außerdem ist zu erkennen, daß bei Höhen über 1,5 m die Wasserbeaufschlagung mit zunehmendem Radius ebenfalls zunimmt.

Bild 5 zeigt bei einem Volumenstrom von ca. 160 l/min und einer Sprinklerhöhe von 0,9 m ein noch ausgeprägteres Maximum mit ca. 23 mm/min. Auch die Zunahme der Wasserbeaufschlagung bei Sprinklerhöhen von 1,5 m bis 6,8 m mit zunehmendem Radius ist deutlich zu erkennen.

Es kann festgestellt werden, daß eine Erhöhung des Volumenstromes bei gleicher Sprinklerhöhe jeweils eine Erhöhung der Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius zur Folge hat, während eine Zunahme der Sprinklerhöhe bei gleichem Volumenstrom bei diesem Sprinkler eine zunehmende Wasserbeaufschlagung zu größeren Radien hin bewirkt.

Bild 6 zeigt die Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius für den Sprinkler Typ E. Bei den Sprinklerhöhen 0,9 m bis 3,5 m lagen die Volumenströme zwischen 445 l/min und 485 l/min (5 bar) und bei den Höhen 4,7 m und 6,8 m bei ca. 360 l/min (3,5 bar). Die eingezeichneten Kurven zeigen zentral unterhalb des Sprink-

lers zum Teil eine Wasserbeaufschlagung von mehr als 100 mm/min, die bis zu einem Radius von 0,5 m zunächst steil und danach langsamer abfällt. Dies bedeutet, daß dieser Sprinkler eine ausgeprägte Mittenbetonung besitzt, die auch bei größeren Sprinklerhöhen erhalten bleibt.

Bild 7 gibt für den Sprinkler Typ P bei einem Volumenstrom von ca. 120 l/min die Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius wieder. Wie bereits beim Sprinkler Typ G ist auch hier bei einer Sprinklerhöhe von 0,9 m ein Maximum bei 0,7 m vorhanden. Bei Sprinklerhöhen von 1,5 m und höher sind bei diesem Radius die kleinsten Werte zu verzeichnen. Bei Sprinklerhöhen bis ca. 3,0 m liegt ein Maximum bei einem Radius von ca. 1,3 m. Bei noch größeren Höhen nimmt die Wasserbeaufschlagung mit zunehmendem Radius zu, d. h. der Sprinkler besitzt eine größere Reichweite.

Bild 8 zeigt die entsprechenden Kurven für den Sprinkler Typ P bei einem Volumenstrom von 160 l/min. Die Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei 120 l/min, haben jedoch etwas höhere Werte.

In Bild 9 ist die Wasserbeaufschlagung für den Sprinkler Typ P in Abhängigkeit vom Radius für ein Wasser-Quellkörper-Gemisch bei einem Volumenstrom von ca. 160 l/min aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß unabhängig von der Sprinklerhöhe die Beaufschlagung im Mittenbereich bis zu einem Radius von ca. 1 m höher ist als ohne Quellkörper (Bild 8). Dies bedeutet, daß die Tropfen des Gemisches durch die höhere Viskosität verstärkt im zentralen Bereich auftreffen. Eine Vergleichskurve mit Quellkörpern für den Sprinkler Typ G bei einer Höhe von 6,8 m weicht nur wenig von der ohne Quellkörper ab (Bild 5).

## 4.2 Brand- und Löschversuche

### 4.2.1 Auslösezeiten der Brandmelder und Sprinkler

Bei den durchgeführten Brand- und Löschversuchen wurden die Auslösezeiten der Brandmelder und der Sprinkler gemessen. In der Tabelle 2 sind neben dem entsprechenden Versuch und Sprinklertyp die bei den Untersuchungen ermittelten Auslösezeiten der beiden Brandmelder und der jeweils eingesetzten Sprinkler aufgelistet. Die Auslösezeiten lagen für den opt. Melder zwischen 1 min 10 s und 2 min. Bei dem i.a. etwas früher ansprechenden Ionisationsmelder wurde später ein Defekt festgestellt, so daß die Werte nur bedingt verwertbar sind.

Die Auslösezeiten der Sprinkler lagen zwischen 4 min und 7 min. Eine Abhängigkeit vom Sprinklertyp kann nicht abgeleitet werden, da bei diesen 4 Versuchen der Typ E sowohl als erster als auch als letzter auslöste. Die Unterschiede im Auslöseverhalten hängen vielmehr von der Brandausbreitung, den Strömungsverhältnissen der aufsteigenden heißen Brandgase und der Wärmefreisetzung des jeweiligen Brandes ab. Es ist weiterhin festzustellen, daß bei allen 4 Versuchen mit 4 Sprinklern der Sprinkler an der Stelle S3 als erster oder als einziger öffnete. Durch die Geometrie des Aufbaus wurde bei diesen Versuchen offensichtlich eine Vorzugsrichtung für die Strömungsverhältnisse der aufsteigenden Brandgase geschaffen.

Beim Löscheinsatz selbst können folgende Situationen entstehen. Das versprühte Löschmittel eines geöffneten Sprinklers kann die Umgebung so stark abkühlen, daß der Brand wie beim Versuch Reg2 gelöscht wird. Es ist auch möglich, daß ein weiterer Sprinkler auslöst, wenn der Brand zunächst nicht eingedämmt werden kann. In diesem Fall steigt die Temperatur wieder an wie bei den Versuchen Reg1 und Reg3. Außerdem besteht aber auch die Möglichkeit, daß heiße Brandgase durch das Auslösen des ersten Sprinklers stärker in Richtung weiterer Sprinkler gelangen, so daß diese beinahe gleichzeitig auslösen wie beim Versuch Reg4.

#### 4.2.2 Temperaturen

In der Tabelle 3 sind neben dem Versuch, dem Sprinklertyp und der Brandlast die einzelnen Temperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4 (Bild 2) eingetragen. Die Temperaturen betreffen jeweils den Auslösezeitpunkt eines Sprinklers und können zu einem anderen Zeitpunkt durch Brandeinwirkung höhere oder durch Kühlwirkung niedrigere Werte erreichen. Die in Klammern stehenden Temperaturwerte an den Meßstellen TS0 bis TS4 in der gleichen Zeile der Tabelle 3 wurden jeweils zu dem in Tabelle 2 angegebenen Zeitpunkt eines ausgelösten Sprinklers ermittelt. Es ist daraus zu erkennen, daß aufgrund der herrschenden Temperaturen evtl. auch andere Sprinkler zuerst oder auch weitere Sprinkler zusätzlich hätten auslösen können. Es ist außerdem wie bei früheren Versuchen in /84/ deutlich zu erkennen, daß der Sprinkler Typ E jeweils bei einer wesentlich niedrigeren Temperatur auslöste als die anderen Sprinkler.

Die Bilder 10 bis 13 zeigen den Temperaturverlauf an den Meßstellen TS0 bis TS4 unterhalb des Daches und an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal für die 4 durchgeführten Versuche. Die Temperaturen unterhalb des Daches zentral über der Brandlast an der Stelle TS0 zeigten bei Versuchsbeginn die höchsten Werte. Ein dort installierter Sprinkler hätte aus diesem Grund bei 3 der 4 Versuche sicherlich zuerst ausgelöst. Sprinkler waren jedoch nur an den Stellen S1 bis S4 installiert.

Bild 10 gibt den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit für den Versuch Reg1 mit den Sprinklern Typ G wieder. Nach dem Zünden stieg die Temperatur unterhalb des Daches an den Meßstellen TS0 bis TS4 zunächst langsam und nach einer Versuchszeit von über 4 min steil an. Das Auslösen des ersten Sprinklers S3 bei einer Temperatur von 221 °C hatte wenig Erfolg, so daß nacheinander noch die Sprinkler S2 und S4 auslösten, wodurch die Temperatur kurzzeitig abfiel. Jedoch bereits nach einer Versuchszeit von 6 min begann die Temperatur an den Meßstellen TS3 und TS0 wieder steil anzusteigen, d. h. der Brand war von den

Sprinklern wenig beeindruckt, so daß es notwendig wurde, den Brandherd nach ca. 6 min 50 s mit einem Strahlrohr einzudämmen, nachdem er auf das gesamte Regal übergegriffen hatte. Durch die starke Sichtbehinderung konnten kleinere Brandnester erst später abgelöscht werden. Im Bild 10 ist dies an den erneuten Temperaturanstiegen der Kurven zu erkennen. Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal liegen hier nicht vor.

Bild 11a zeigt den Temperaturverlauf für den Versuch Reg2, bei dem Sprinkler vom Typ E installiert waren. Bei diesem Versuch dauerte die Entwicklungsphase des Brandes länger. Erst nach ca. 6 min 30 s begannen die Temperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4 unterhalb des Daches anzusteigen. Der Sprinkler an der Stelle S3 löste bereits bei Erreichen einer Temperatur von 88 °C aus. Dieser Einsatz hatte sofort einen Temperaturabfall an den 5 Meßstellen auf unter 20 °C zur Folge. Der Brand war gelöscht.

Bild 11b zeigt für den Versuch Reg2 die Temperaturen T1 bis T5 im Regal. Es ist zu erkennen, daß über der Zündstelle die Temperatur nach 1 min 30 s auf ca. 800 °C ansteigt, während in einer Höhe von 2,1 m an der Meßstelle T2 max. 240 °C und bei T3 ca. 130 °C erreicht wurden. Der Brand hatte bei diesem Versuch nicht auf das Regal III übergegriffen, was auch an den niedrigen Temperaturen T4 und T5 von weniger als 40 °C zu erkennen ist.

Bild 12a zeigt die Temperaturkurven für den Versuch Reg3 mit Sprinkler vom Typ P. Bei diesem Versuch wurde zum Löschen ein Wasser-Quellkörper-Gemisch verwendet. Nach der Zündung steigen die Temperaturen unter dem Dach langsam, aber bereits nach ca. 3 min 30 s steil an. Beim Erreichen einer Temperatur von 180 °C löste der Sprinkler S3 aus und die Temperatur fiel an dieser Stelle auf ca. 50 °C ab. An der Meßstelle TS0 sank die Temperatur ebenfalls sofort, wogegen an der Meßstelle TS2 erst nach dem Auslösen des Sprinklers S2 und an der Meßstelle TS4 nach dem Auslösen des Sprinklers S4 ein steiler Abfall zu erkennen ist. Zwischen der 7ten und 10ten Minute stiegen jedoch alle Temperaturen wieder steil an. Das bedeutet, daß der Brand nicht ge-



löscht war, obwohl dies aufgrund der Sichtverhältnisse zunächst zu vermuten war. Der Brand mußte jedoch anschließend mit einem Strahlrohr abgelöscht werden.

Bild 12b zeigt für den Versuch Reg3 die Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal. Der Brand breitete sich zunächst im Stapel b des Regals II aus. Nach dem Auslösen des Sprinklers S3 nach einer Versuchszeit von 4 min 19 s ist festzustellen, daß der Brand auf das Regal III übergegriffen hat, was an dem steilen Temperaturanstieg an der Meßstelle T4 zu erkennen ist. Nach einer Versuchszeit von ca. 5 min sinken die Temperaturen etwas ab, steigen jedoch trotz des Auslösens von 2 weiteren Sprinklern wieder an. Dies bedeutet, daß die 3 ausgelösten Sprinkler den Brand nicht beherrschen konnten.

Bild 13a zeigt den Temperaturverlauf für den Versuch Reg4 mit den Sprinklern vom Typ E. Wie beim Versuch Reg2 waren dem Löschwasser Quellkörper zugemischt. Die Temperaturen an den Meßstellen TS0 bis TS4 unter dem Dach steigen wie beim Versuch Reg2 zunächst langsam und anschließend steil an. Der Löschein-satz durch 2 direkt hintereinander öffnende Sprinkler an den Stellen S3 und S4 ließ die Temperaturen unterhalb des Daches sofort auf unter 30 °C abfallen, d. h. der Brand war gelöscht. Ein Unterschied zu Versuch Reg2 konnte beim Löschein-satz durch das Wasser-Quellkörper-Gemisch nicht festgestellt werden.

Bild 13b zeigt für den Versuch Reg4 die Temperaturkurven an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal. Der Brand entwickelte sich ähnlich schnell wie beim Versuch Reg3. Nach einer Versuchszeit von ca. 4 min wurden bereits Temperaturen bis zu 800 °C gemessen, die nach dem Auslösen der beiden Sprinkler ebenso wie die Temperaturen an den Meßstellen im Bereich der Sprinkler sofort steil auf unter 30 °C abfielen.

Die Bilder 14a und 14b zeigen anhand des Versuches Reg2 den Regalausschnitt während des Brandes. In Bild 14a ist die Brandausbreitung nach einer Versuchszeit von 5 min 8 s zu sehen. Die

Flammen breiteten sich zunächst langsam aus. Bild 14b zeigt die fortgeschrittene Entwicklung des Brandes nach einer Versuchszeit von 6 min 36 s. Die Flammen schlugen weit über die Oberkante des Stapels hinaus. Der Löscheinsatz erfolgte bei diesem Versuch nach weiteren 21 s durch den auslösenden Sprinkler S3.

Es kann festgestellt werden, daß der jeweilige Brand mit den Sprinklern Typ G (Reg1) bzw. Typ P (Reg3) ohne bzw. mit Quellkörpern nicht gelöscht werden konnte, wogegen der Löscheinsatz mit dem Sprinkler Typ E (Reg2, Reg4) in beiden Fällen erfolgreich war.

#### 4.2.3 Ergebnisse der Brand- und Löschversuche

Bei den Brandversuchen erfolgte der Löscheinsatz durch das selbständige Auslösen der jeweils installierten Sprinkler. Die Zeitdauer des Löscheinsatzes richtete sich nach der optischen Beurteilung des Brandes, der als gelöscht oder als kontrolliert betrachtet wurde, wenn keine Flammen mehr erkennbar waren oder kleine Flammen sich nicht vergrößerten oder weiter ausbreiteten. Die Beurteilung ist dabei durch die starke Brandrauchbildung und Wasserdampfentwicklung sehr schwierig.

Die Tabelle 4 zeigt für jeden Versuch die zugehörige Brandlast, die eingesetzten Sprinkler, die jeweiligen gesamten Löschmittelmengen, die aufgefangenen Löschmittelanteile in den Wannen und die Löschdauer.

Der erste Versuch (Reg1) wurde mit den Sprinklern vom Typ G an den Stellen S1 bis S4 durchgeführt. Der aus den Sprinklern austretende Volumenstrom zeigte keinen erkennbaren Löscherfolg. Nach einer Löschdauer von insgesamt 4 min 8 s mit 3 Sprinklern und einer Gesamtlöschwassermenge von 1134 l war der Brand vielmehr wieder so angewachsen, daß er mit dem Strahlrohr gelöscht werden mußte. Die Brandlast im Regal wurde zerstört. Die aufgefangene Wassermenge in den Wannen konnte wegen des Strahl-

rohreinsatzes nicht mehr bestimmt werden.

Beim zweiten Versuch (Reg2) wurden Sprinkler vom Typ E verwendet. Die aufsteigenden heißen Brandgase lösten den Sprinkler S3 unterhalb des Daches erst nach einer Branddauer von ca. 7 min aus, jedoch bei einer wesentlich niedrigeren Temperatur als zuvor. In einer Zeit von ca. 5 min strömten 2753 l Wasser aus, das ausreichte, um den Brand zu löschen. Dabei trafen 22% des Löschwassers auf dem Wannenfeld auf.

Beim dritten Versuch (Reg3) wurde der Sprinkler Typ P verwendet. Der Versuchsaufbau wurde beibehalten, aber dem Löschwasser wurden ca. 2‰ an Quellkörpern zugesetzt, was eine Viskosität des Gemisches von ca. 25 mPa s ergab. Hier reichte eine Löschmittelmenge von 1609 l aus 3 Sprinklern trotz Quellkörperzumischung nicht aus, um den Brand wesentlich zu beeinflussen. Der Lageraufbau mußte mit dem Strahlrohr abgelöscht werden, damit kein weiterer Schaden verursacht werden konnte. Aus diesem Versuch wurde der Schluß gezogen, daß auch beim Sprinkler Typ G die Zumischung von Quellkörpern keinen Löscherfolg gehabt hätte.

Beim vierten Versuch (Reg4) wurden wieder Sprinkler Typ E eingesetzt und bei gleichem Versuchsaufbau wie zuvor dem Löschwasser ca. 2‰ an Quellkörpern zugesetzt. Das beinahe gleichzeitige Auslösen von 2 Sprinklern konnte den Brand nach einer Löschdauer von nur 2 min 13 s löschen. Insgesamt wurden 1962 l des Wasser-Quellkörper-Gemisches benötigt, wobei 37 % auf der Meßfläche auftrafen.

Sowohl aus den Versuchen Reg1 und Reg3 mit Wasser als auch aus den Versuchen Reg2 und Reg4 mit dem Wasser-Quellkörper-Gemisch kann aufgrund der Zumischung von Quellkörpern nicht darauf geschlossen werden, daß durch die Zumischung ein besserer Löscherfolg eintrat. Einerseits wurde der Brand mit oder ohne Quellkörper mit dem Sprinklern Typ G und Typ P nicht gelöscht und andererseits in beiden Versuchen mit dem Sprinkler Typ E gelöscht. Die geringere verbrauchte Löschmittelmenge kann nicht als Kriterium dienen, da das Auslösen der Sprinkler bei diesem Versuch

(Reg4) viel früher erfolgte. Wie bereits bei früheren Untersuchungen kann auch hier festgestellt werden, daß mit dem Sprinkler Typ E mit einem genügend großen Volumenstrom ein Brand im Regallager erfolgreich bekämpft werden kann.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Untersuchungen mit einer ortsfesten Löschanlage haben gezeigt, daß der erfolgreiche Einsatz von Sprinklern im Lagerbereich von vielen Einflußgrößen abhängt. Dazu gehören einerseitsgeometrische Faktoren bei der Lagerung und Zündung des Brandgutes und andererseits der Einfluß der unterschiedlichen Sprinkler beim Löscheinsatz.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Auswertung der in- und ausländischen Literatur auf dem Gebiet des Brandschutzes mit Sprinklern fortgeführt und in einzelne Abschnitte aufgegliedert. Dabei wird über Sprinkler allgemein, Brände, Stapellagerung, Lüftung, Anzahl, Brandversuche, Einflußgrößen und Tropfengrößen von Sprinklern berichtet. Die betreffende Literatur ist an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhanden und für jedermann zugänglich.

In einem weiteren Abschnitt der Arbeit werden Kaltversuche beschrieben, bei denen mit handelsüblichen hängenden Sprinklern verschiedener Typen aus Höhen von 0,9 m bis 6,8 m Wasserbeaufschlagungen ermittelt wurden. Die Volumenströme pro Sprinkler reichten dabei von ca. 60 l/min bis nahezu 500 l/min.

Außerdem werden Brand- und Löschversuche der Forschungsstelle beschrieben, die an Regallagern durchgeführt wurden. In einem Ausschnitt eines Regallagers, bestehend aus 3 Regalen mit ca. 3 m Höhe, wurden auf Paletten gelagerte Pappkartons mit Kunststoff-Chips als Stoßschutzmaterial als Brandgut eingesetzt. Die Sprinkler befanden sich als Viereranordnung in einer Höhe von 3,65 m über der Brandgutoberseite. Als Zusatzstoff wurden dem

Löschwasser teilweise sogenannte Quellkörper beigemischt, was bei diesen Versuchen für den Löscherfolg weder einen positiven noch einen negativen Einfluß hatte. Die Auslösezeiten der Sprinkler lagen zwischen ca. 4 min und 7 min. Bei diesen Versuchen zeigte sich, daß ein hoher Impuls der Tropfen vorhanden sein muß, um erfolgreich löschen zu können.



- / 11/ Melinek, S.J. : Effectiveness of sprinklers in reducing fire severity  
Building Research Establishment  
Fire Research Station,  
Borehamwood WD6 2BL  
Fire Safety Journal 21 (1993) S.299-311
- / 12/ Sprinklers - the real story  
Fire Prevention (1993), S.18-28
- / 13/ Young, R. : Learning the lesson  
Fire Prevention (1993), S.29-31
- / 14/ Usemann, K.W. Löschverhalten von Sprinkleranlagen  
Becker, W.H.K. : Bundesbaublatt (1993) Nr.7, S.550-557
- / 15/ Young, R.A. : Sprinklers, the new technology  
Fire Engineers Journal 52 (1992) Nr.164,  
S.29-31
- / 16/ Andrzejewski, A : La corrosion des reseaux de protection incendie par sprinklers  
RGS (1992) Nr.111, S.47-52
- / 17/ Leech, D. : Risk surveyor examines how automatic sprinklers can limit school fires  
Fire 85 (1992) Nr.1050, S.15-16
- / 18/ Lambrecht, V. : Verbesserung des Brandschutzes in Lagern durch nichtautomatische Löschanlagen  
Die BG (1993) Nr.4, S.220-224
- / 19/ Le sprinkleur sa fiabilité, son efficacité  
Face au Risque (1993) Nr.297, S.43-49,51
- / 20/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 10: Literaturlauswertung -  
Tropfenverteilungen - Löschversuche  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1993) Nr.85, 74 S.
- / 21/ Steinhaus, F.R.: Löschanlage, Bausteine des Umweltschutzes  
Brandschutz, Deutsche Feuerwehrzeitung 47  
(1993) Nr.9, S.651-654
- / 22/ Sprinklers provide the edge in L.A. Riod  
Record 69 (1992) Nr.5, S.15-16
- / 23/ Elliot, T. Philadelphia blaze shows sprinklers are  
Butters, T. : vital  
Fire. Overseas Supplement 84 (1991)  
Nr.1032, S.1-2

- / 24/ Maurno, D.A. : New protection criteria and a better plastic pallet  
Record 69 (1992) Nr.6, S.9-12
- / 25/ Briers, E. : Classification des stockages de grande hauteur  
ANPI Magazine (1992) Nr.112, S.66-69
- / 26/ Sprinklers et entrepots  
Face au Risque (1992) Nr.285, S.69-74
- / 27/ Berghoff, U. : Stand der europäischen Normung bei CEN, Perspektiven  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen, Nov.1992, 10 S.
- / 28/ Grisoni, N. : Stockages a hauts risques la nouvelle technique offensive des sprinklers ESFR  
RGS (1992) Nr.115, S. 52,54
- / 29/ ESFR: expanding applications and benefits  
Fire Engineers Journal 53 (1993) Nr.168, S.28-32
- / 30/ Gibson, R. : Warehouse protection  
Fire Surveyor 21 (1992) Nr.1, S.5-8
- / 31/ Diericks, H.M. Sprinklers  
Briers, E. ANPI Magazine. Dossier Technique 109  
Rombouts, J.u.a.: (1992) Nr.90, S.3-24
- / 32/ Friedman, R. : An international survey of computer models for fire and smoke  
Journal of Fire Protection Engineering 4 (1992) Nr.3, S.81-92
- / 33/ Hadjisophocleous: Computer model for fire simulations and G.V. and recreations  
Waterfog fire systems for ships  
Fire Research News NRC-CNRC (1992) Nr.65
- / 34/ Hinkley, P.L. : Sprinkler operation and the effect of venting: studies using a zone model  
BRE Building Research Establishment Report  
CI/SfB 66 (68.54)(K23) (1992)
- / 35/ Ingason, H. Interaction between sprinklers and fire  
Olsson, S. : vents  
Full scale experiments  
Brandforsk project 406-902  
Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, SP Report 1992:11



- / 36/ Hinkley, P.L. Experiments at the multifunctioneel  
Hansell, G.O. trainingcentrum, Ghent, on the interaction  
Marshall, N.R. between sprinklers and smoke venting  
Harrison, R. : Building Research Establishment Report  
CI/SfB (68.54) (K23), (1992)
- / 37/ Hagen, E. : Testergebnissen beweisen Rauchabzüge und  
Sprinkler müssen sich ergänzen  
Beratende Ingenieure (1992) Nr.5, S.26,30
- / 38/ Mawhinney, J.R.: Canadian studies examine aspects of  
automatic sprinklers in buildings  
Fire 86 (1993) Nr. 1060, S.29-30
- / 39/ Nugent, D.P. Technical report international foam-water  
Hall, E.L. : sprinkler research project  
Forschungsbericht der SchirmerEngineering  
Corporation (1992)
- / 40/ Stephens, J. : Improving sprinkler fire control with  
lower water pressures  
Fire Prevention (1993), S.32-36
- / 41/ Madrzykowski, D. A sprinkler fire suppression algorithm  
Vettori, R.L. : Journal of Fire Protection Engineering 4  
(1992) Nr.4, S.151-164
- / 42/ Ingason, H. : Response characteristics of sprinkler  
heads mounted in a paint box  
Swedish National Testing and Research  
Institute, Brandforsk Project 726-911,  
SP Report 1992:28
- / 43/ Ingason, H. : Response characteristics of glas bulb  
sprinkler heads mounted in a spray booth  
Fire Technology 29 (1993) Nr.4, S.317-331
- / 44/ Chow, W.K. Water penetration ratio of a sprinkler  
Wong, M.K. water spray  
Fire Science and Technology - Proceedings  
of the First Asian Conference  
International Academic Publishers  
Hefei, China, 1992, S.467-474
- / 45/ Hoffmann, N.A. On the Eulerian-Eulerian approach to  
Galea, E.R. : fire-sprinkler modelling  
Journal of Fire Protection Engineering  
3 (1991) Nr.4, S.123-136
- / 46/ Kim, A. : Protection of glazing in fire separations  
by sprinklers  
National Fire Laboratory, NRCC-Canada,  
Interflam '93, S.83-91

- / 47/ Seeger, P.G. : Rack storage fire suppression by sprinklers  
First International Conference on Fire Suppression Research, Schweden  
Stockholm and Boras: May 5-8, 1992
- / 48/ Wighus, R. : Extinguishment of enclosed gas fires with water spray  
Fire Safety Science-Proceedings of the Third International Symposium (1991)  
S.997-1006
- / 49/ Persson, H. : Commodity classification - a more objective and applicable methodology  
Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut  
Brandteknik, SP Rapport 1993:70  
und  
Sprinkler protecting of warehouses - a new method for classification of commodities  
Sixth International Fire Conference Interflam '93, Fire Safety Proceedings  
S.489-497
- / 50/ Klein, W. : Labortechnische Bestimmung Qualität des Wasseraustritts bei Sprinklern  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen, Nov.1992, 4 S.
- / 51/ Wagner, M. : Methoden zur Bestimmung der erforderlichen Wasserbeaufschlagung (internat. Vergleich)  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen, Nov.1992, 24 S.
- / 52/ Ingason, H. : Foam sprinklers as a replacement for halon in engine rooms  
Persson, H. : Swedish National testing and Research  
Ryderman, A. : Institute, Fire Technology, SP Report 1992:37
- / 53/ Pryzbyla, L. : The results are in on flammable liquids  
Gandhi, P. : in plastic containers  
Fire Journal (1990) S.38-39, 41-43
- / 54/ Kokkala, M.A. : Fixed water sprays against open liquid pool fires  
First International Conference on Fire Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.129-159

- / 55/ Cousin, C.S. : Recent work on fire control using fine water sprays at the fire research station  
First International Conference on Fire Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.229-245
- / 56/ Mulhaupt, R. : Fire protection for flammable and combustible liquids in warehouses  
First International Conference on Fire Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.393-399
- / 57/ Ingason, H. : Investigation of sprinkler response models and the interaction between sprinklers and fire vents  
Forschungsbericht der Lund University, Sweden, SE-LUTVDG/TVBB-1008 (1992)
- / 58/ Short-range research program improvements  
Record 70 (1993) Nr.1, S.9-12
- / 59/ Lougheed, G. Automatic sprinkler protection for  
Mawhinney, J. : compact  
Fire Research News (1993) Nr.67, 4 S.
- / 60/ Georgi, D. : Brandversuche an Lagerhilfen aus Polypropylen - Auswirkungen auf die Sprinklerrichtlinien -  
Schadensprisma 22 (1993) Nr.2, S.29-32
- / 61/ Smith, A.C. The effect of ventilation on the water  
Ryan, M.W. spray pattern of automatic sprinkler  
Pro, R.W. u.a. : heads  
Forschungsbericht des United States Department of the Interior RI-9459 (1993), 20 S.
- / 62/ Stephens, J. : Using sprinklers in bus garages  
Fire Prevention (1992) Nr.253, S.26-29
- / 63/ Bill, R.G. : Thermal sensitivity limits of residential sprinklers  
Fire safety Journal 21 (1993) Nr.2, S.131-152
- / 64/ Vincent B.G. Comparison of european conventional and  
Kung, H.C. : U.S. spray sprinklers  
Journal of Fire Protection Engineering 5 (1993) Nr.1, S17-28
- / 65/ Stahl, K.H. : VdS-Brandversuche mit Kunststoff-Lagerbehältern  
VFDB-Zeitschrift Forschung und technik im Brandschutz 43 (1994) Nr.1, S.15-23

- / 66/ Mawhinney, J.R.: Fine water spray fire suppression project  
First International Conference on Fire  
Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.109-127
- / 67/ Chow, W.K. : Thermal responses of sprinkler heads in  
hot air stream with speed less than 1 m/s  
Fire Science and Technology 12 (1992)  
Nr.1, S.7-22
- / 68/ Ingason, H. : Thermal response models for glass bulb  
sprinklers  
An experimental and theoretical analysis  
Brandforsk Project 618-911  
Swedish National Testing and Research  
Institute, Fire Technology, SP Report  
1992:12
- / 69/ Heat release rate governs industrial  
sprinkler design  
Fire and Flammability Bulletin,  
Oct.(1992) S.2-3, ISSN:0952-2727
- / 70/ Bill, R.G. : Numerical simulation of actual delivered  
density (ADD) measurements  
Fire Safety Journal 20 (1993) S.227-240
- / 71/ Kunkelmann, J. : Brandausbreitung bei verschiedenen  
Stoffen, die in lagemäßiger Anordnung  
gestapelt sind.  
Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen  
eines Tropfenschwarmes mit einer  
Heißgasströmung.  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1991) Nr.80, 111 S.
- / 72/ Müller, Th. : Löschverhalten von Sprinklern,  
theoretische Betrachtungen - Simulation  
der Löschwirkung von Sprinklern  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen,  
Nov.1992, 7 S.
- / 73/ Wang, M. : Untersuchung der Löscheffizienz von  
Sprinklern  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen,  
Nov.1992, 8 S.
- / 74/ Covelli, B. : Thermodynamik und Geschwindigkeit der  
Tröpfchen im Brandgeschehen  
VdS - Fachtagung Feuerlöschanlagen,  
Nov.1992, 25 S.

- / 75/ Unoki, J. : Fire extinguishing time by sprinkler  
Fire Safety Science-Proceedings of the  
First International Symposium (1986)  
S.1187-1196  
Berlin:Springer Verlag ISBN 3-540-16585-1
- / 76/ Kunkelmann, J. : Brandausbreitung bei verschiedenen  
Stoffen die in lagermäßiger Anordnung  
gestapelt sind  
Teil 10. Weiterführende Literaturüber-  
sicht über die Brandausbreitung sowie  
über die Wechselwirkungen des  
Tropfenschwarmes eines Sprinklers mit  
einer Heißgasströmung  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1993) Nr.84, 58 S.
- / 77/ Pietrzak, L.M. : Recent research and future requirement  
for modelling fire suppression  
effectiveness  
First International Conference on Fire  
Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.261-281
- / 78/ Jackman, L.A. : Characterization of water drops from  
Nolan, P.F. : sprinkler sprays  
Morgan, H.P. : First International Conference on Fire  
Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.159-185
- / 79/ Jackman, L.A. : Mathematical model of the interaction of  
Nolan, P.F. : sprinkler spray drops with fire gases  
Gardiner, A.J. : First International Conference on Fire  
Morgan, H.P. : Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.209-227
- / 80/ Alpert, R.L. : Modeling of sprinkler spray suppression  
of fires  
First International Conference on Fire  
Suppression Research, Sweden  
Stockholm, Boras: May 1992, S.245-260
- / 81/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.  
Teil 9. Messung und Simulation der  
Wasserbeaufschlagung, Flüssigkeits-  
verteilungen, Bestimmung von  
Tropfengrößen  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1992) Nr.85, 53 S.

- / 82/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 7. Literaturlauswertung und  
Simulation der Wasserbeaufschlagung  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1990) Nr.74, 62 S.
- / 83/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 8. Literaturlauswertung Sprinkler  
Brandschutzforschung der Bundesländer  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1991) Nr.78, 60 S.
- / 84/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 10. Literaturlauswertung -  
Tropfenverteilungen - Löschversuche  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1993) Nr.85, 74 S.
- / 85/ Schatz, H. : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 11. Literaturlauswertung -  
Sprinklereinsatz bei Palettenlager  
Karlsruhe: Forschungsstelle für  
Brandschutztechnik (1994) Nr.87, 85 S.

## 7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1. Bei verschiedenen Volumenströmen in den Wannen aufgefangener Wasseranteil in Prozent für 3 verschiedene jeweils zentral angeordnete Sprinkler in verschiedenen Höhen.

Typ	Höhe m	Volumenstrom und Wasseranteil in Prozent									
		l/min	%	l/min	%	l/min	%	l/min	%	l/min	%
G	0,9	60	95	89	96	118	90	175	91		
	1,5	63	95	86	82	117	76	175	84		
	3,5	62	57	91	53	120	54	177	61		
	4,7			91	47			162	56		
	6,8	59	42	90	49			168	53		
	*6,8							159	49		
E	0,9							186	100	452	100
	1,5							163	84	445	97
	3,5							162	65	485	96
	4,7									354	71
	6,8									363	73
P	0,9					119	92	159	79		
	1,5					124	61	161	59		
	3,0					119	44	164	43		
	4,7					121	43	163	40		
	6,8					121	44	159	43		
P	*0,9							165	94		
	*3,0							166	50		
	*4,7							162	48		
	*6,8							161	53		

\* Wasser mit Zusatz "Quellkörper"

Tabelle 2. Ansprechzeiten der Brandmelder und Sprinkler

Vers.	Sprinkler Typ	Brand- last Anzahl Paletten- regal	Auslösezeit in min:s							
			Brandmelder				Sprinkler			
			Ion.	opt.	S0	S1	S2	S3	S4	
Reg1	G	4	Karton/ Chips	3:26	1:28	=	-	5:47	5:23	6:06
Reg2	E	4	Karton/ Chips	=	1:10	=	-	-	6:57	-
Reg3	P	4	Karton/ Chips	=	1:30	=	-	4:41	4:19	5:48
Reg4	E	4	Karton/ Chips	=	2:00	=	-	-	4:06	4:08

= Melder/Sprinkler nicht vorhanden  
 - Sprinkler nicht ausgelöst

Tabelle 3. Temperaturen beim Auslösen der Sprinkler

Versuch	Sprinkler Typ	Brandlast Paletten- regal	Temperaturen in °C															
			T S0		T S1		T S2		T S3									
			T	S0	T	S1	T	S2	T	S3								
Reg1	G	4	Karton/ Chips	(178)	(115)	(133)	221	(158)	(55)	(92)	173	(60)	(142)	(56)	(136)	(53)	(63)	119
Reg2	E	4	Karton/ Chips	(64)	(63)	(65)	88	(74)										
Reg3	P	4	Karton/ Chips	=	(118)	(152)	180	(159)	=	(87)	171	(62)	(124)	=	(67)	(23)	(65)	145
Reg4	E	4	Karton/ Chips	=	(76)	(74)	84	(83)	=	(77)	(78)	(47)	90					



Tabelle 4. Löschmittelmengen in Abhängigkeit vom Sprinklertyp

Vers.	Sprinkler Typ	Brandlast Paletten Karton/ Chips Anzahl	Sprinkler Anzahl ausgelöst	Lösch- mittel gesamt	Lösch- mittel in den Wannen	Lösch- dauer
				l	%	min:s
Reg1	G	4 36 288	3 (S3,S2,S4)	1134 und Strahlrohr	-	4:08
Reg2	E	4 36 288	1 (S3)	2753	22	4:57
Reg3	P	4 36 288	3 (S3,S2,S4)	1609 und Strahlrohr	-	9:52
Reg4	E	4 36 288	2 (S3,S4)	1962	37	2:13

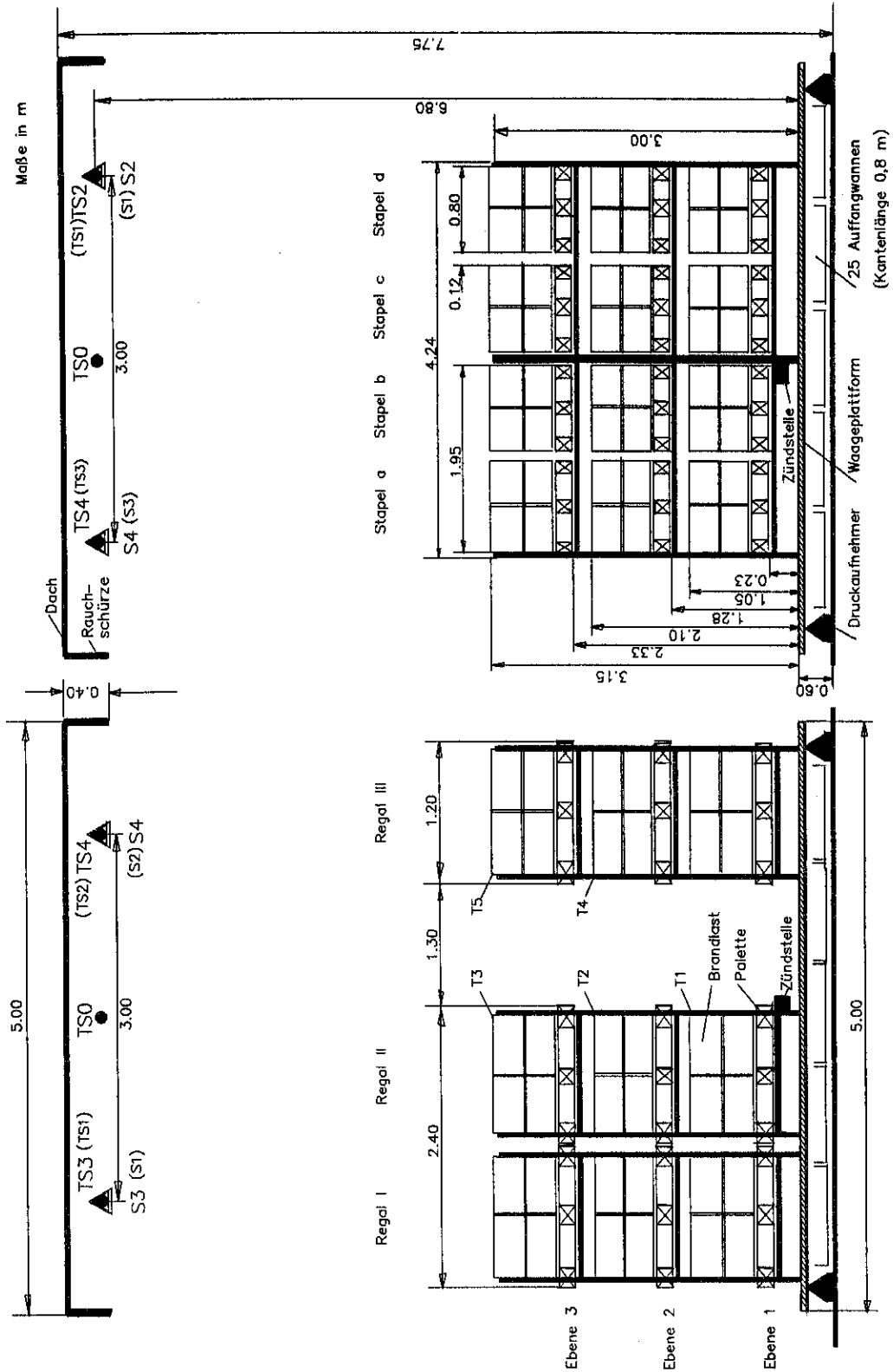


Bild 1. Aufbau der Versuchsanordnung

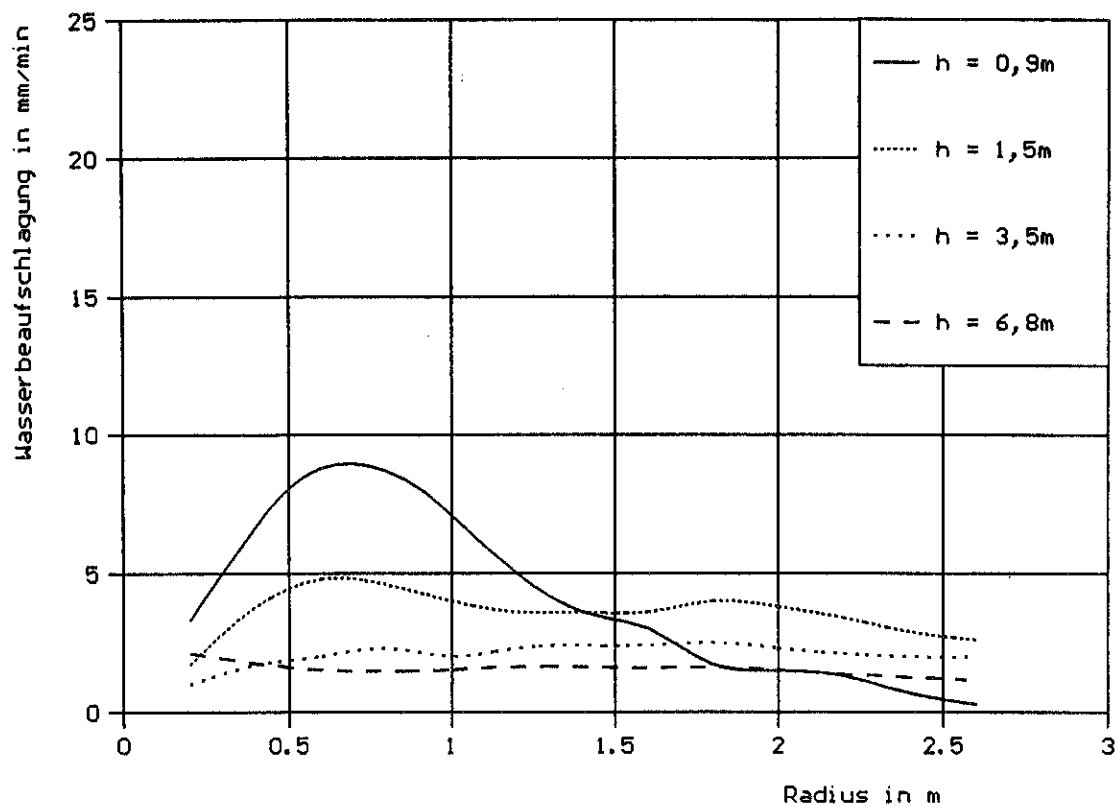


Bild 2. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 4 Höhen mit dem Sprinkler Typ G. Volumenstrom ca. 60 l/min

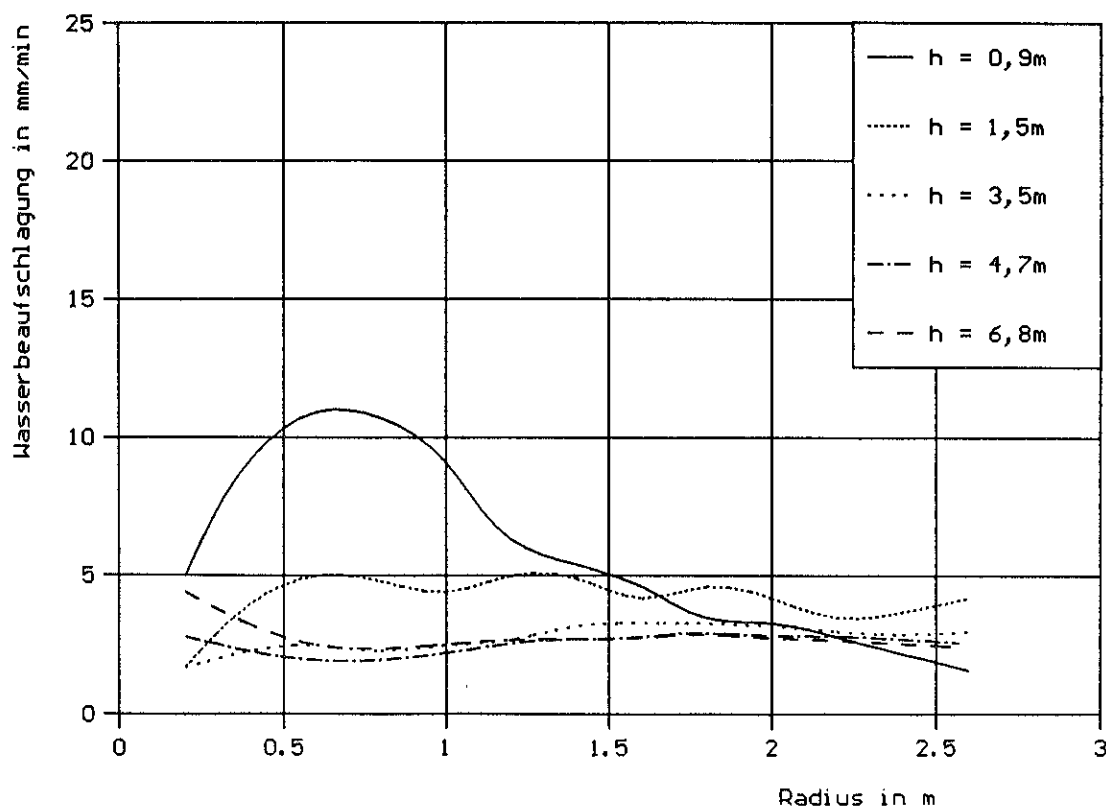


Bild 3. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 5 Höhen mit dem Sprinkler Typ G. Volumenstrom ca. 90 l/min

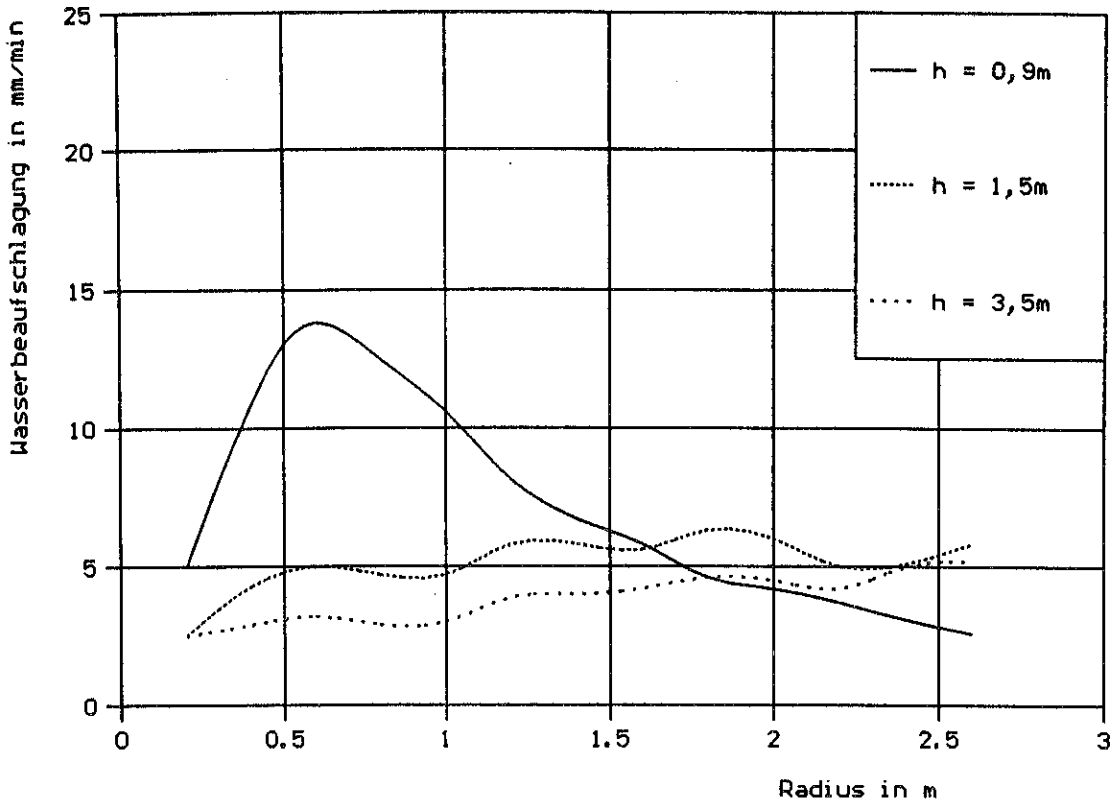


Bild 4. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 3 Höhen mit dem Sprinkler Typ G. Volumenstrom ca. 120 l/min

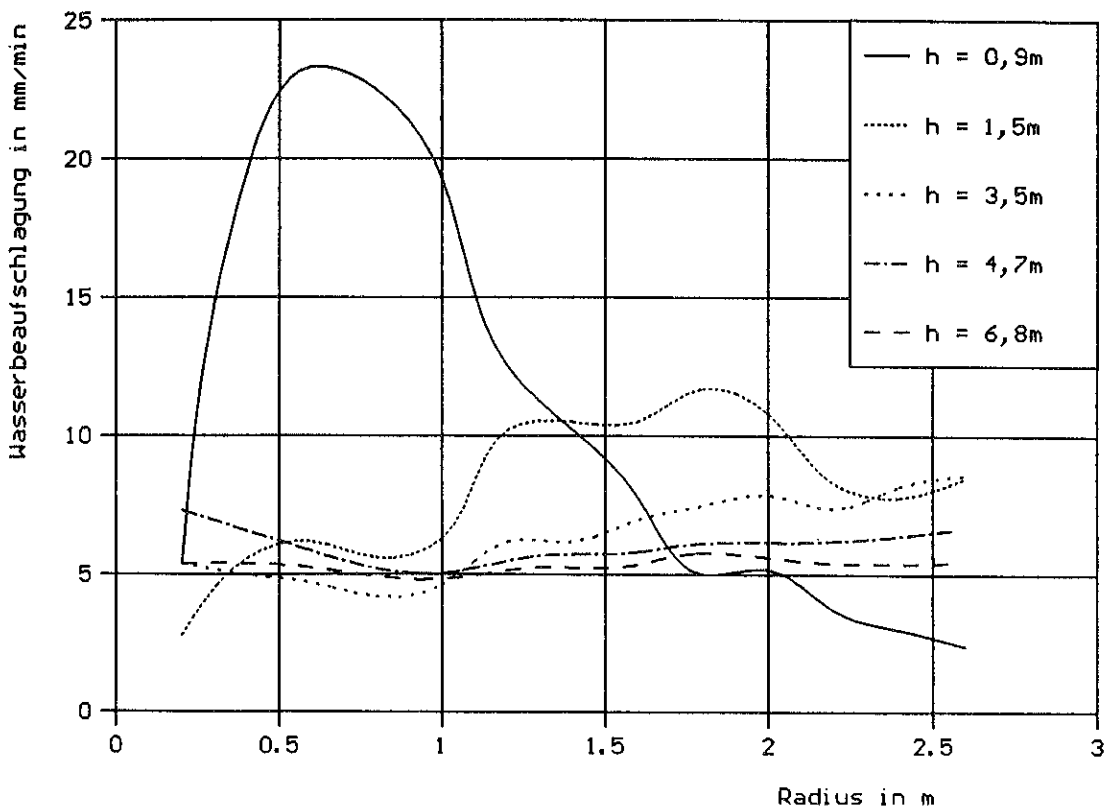


Bild 5. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 5 Höhen mit dem Sprinkler Typ G. Volumenstrom ca. 160 l/min

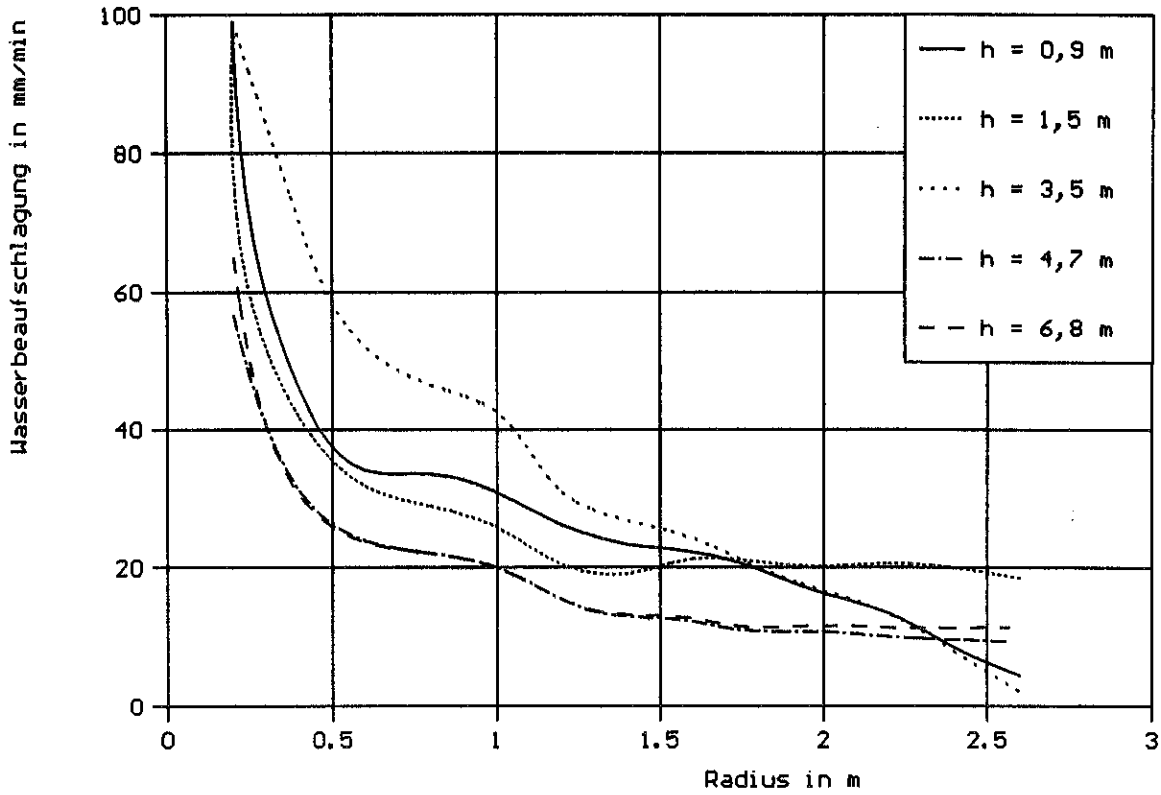


Bild 6. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 5 Höhen mit dem Sprinkler Typ E. Volumenstrom ca. 460 l/min bzw. 360 l/min

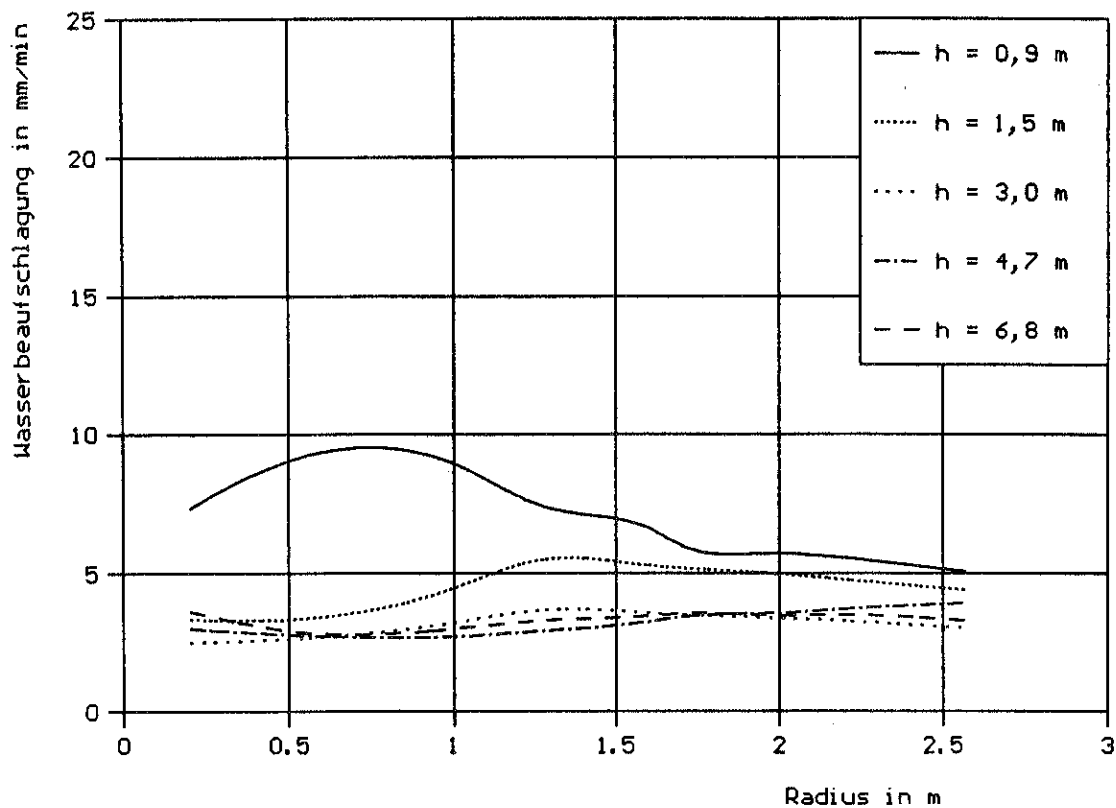


Bild 7. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 5 Höhen mit dem Sprinkler Typ P. Volumenstrom ca. 120 l/min

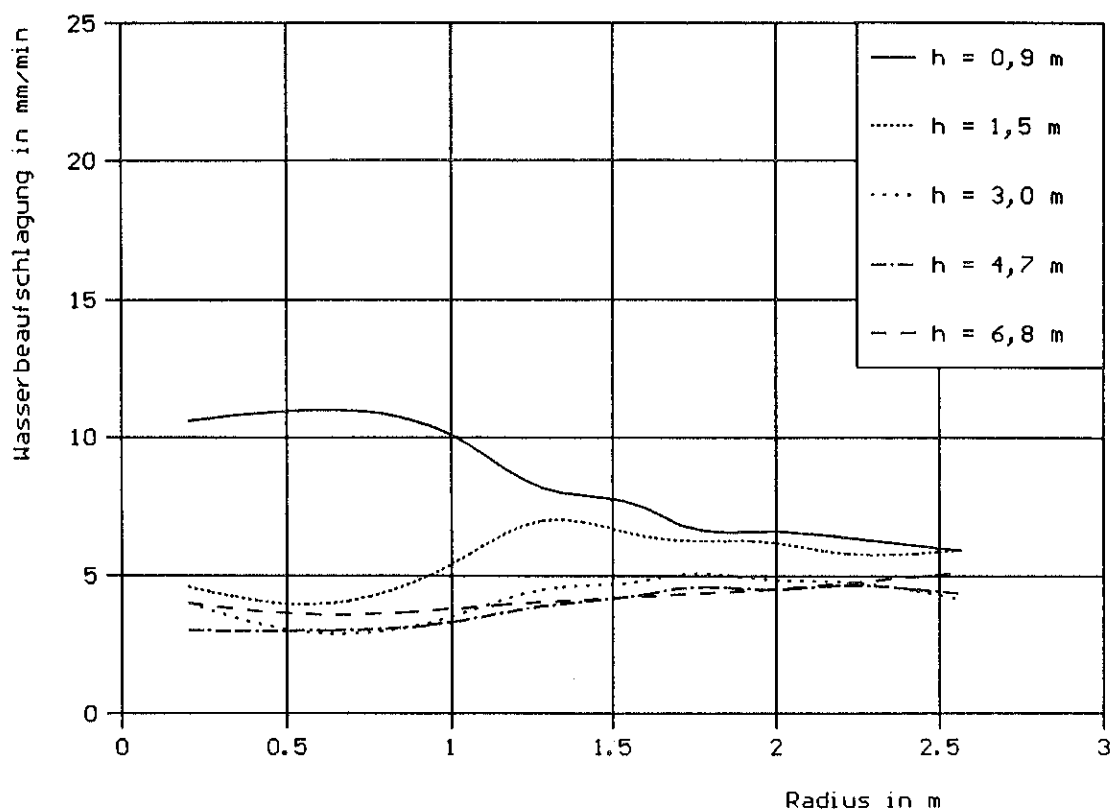


Bild 8. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 5 Höhen mit dem Sprinkler Typ P. Volumenstrom ca. 160 l/min

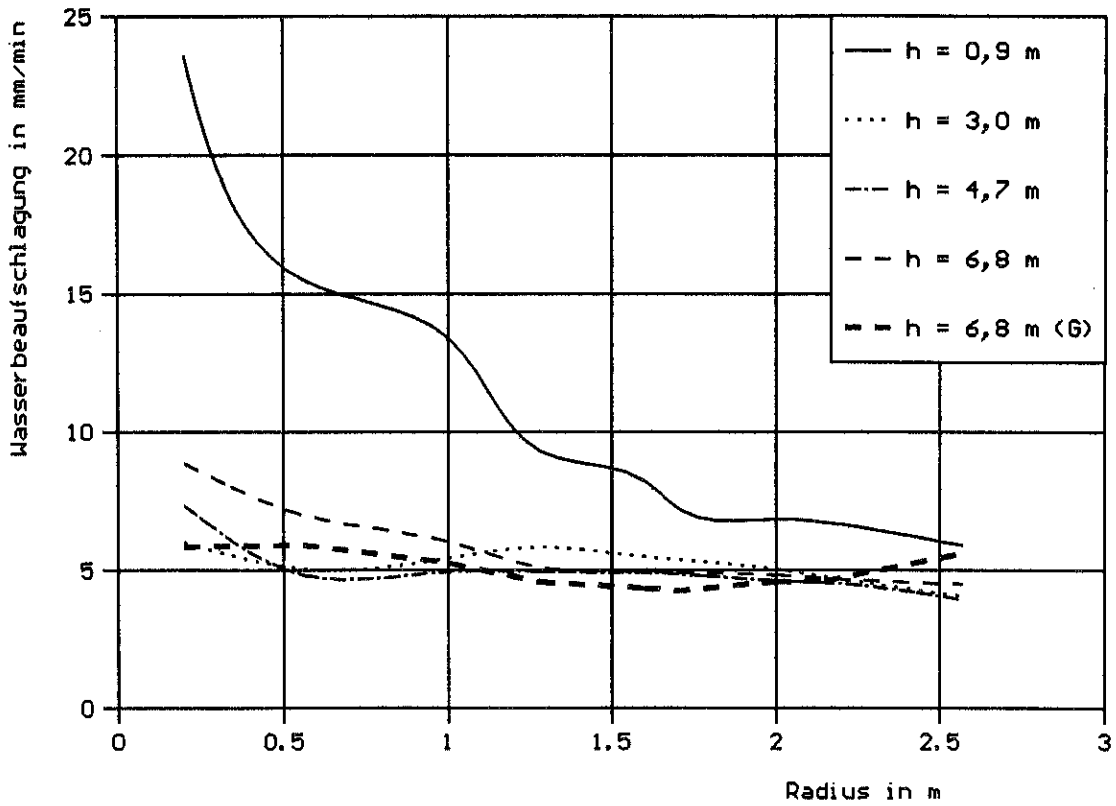


Bild 9. Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit vom Radius aus 4 Höhen mit dem Sprinkler Typ P (G).  
Volumenstrom ca. 160 l/min und Zusatz Quellkörper.

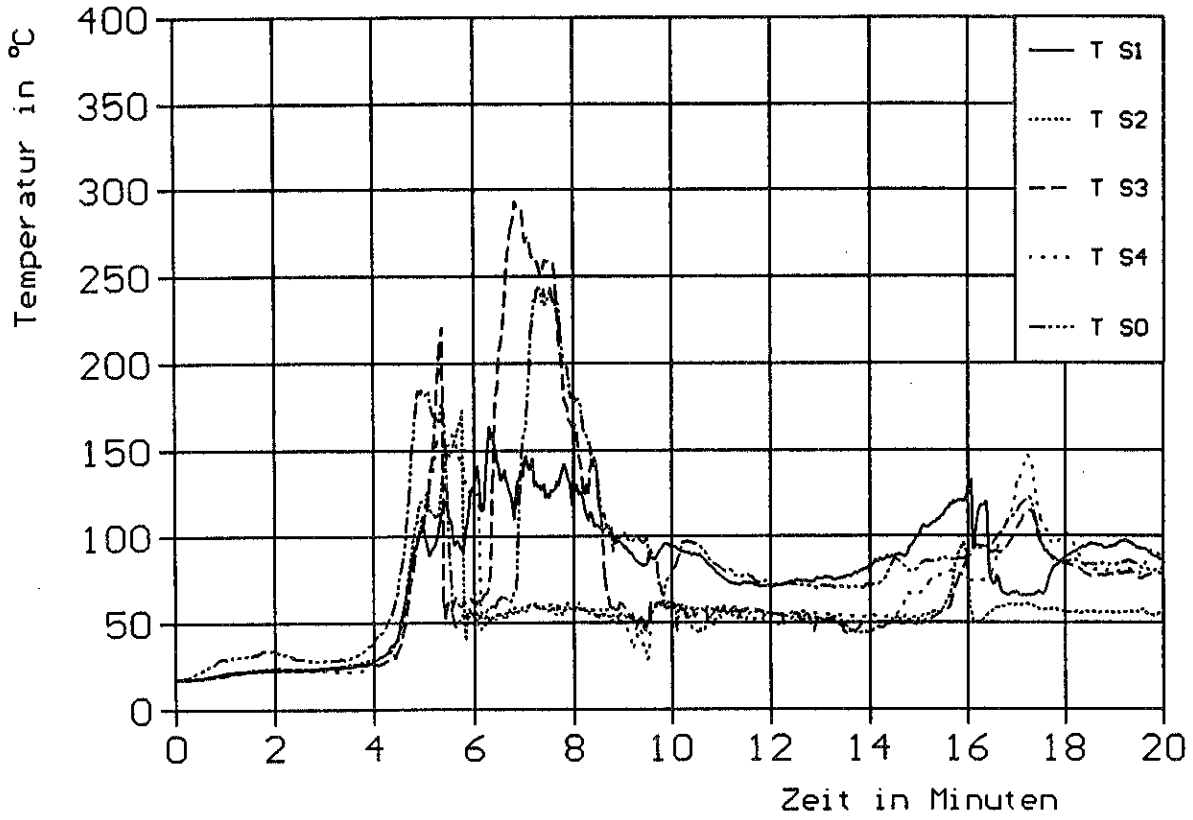


Bild 10. Versuch Reg1

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit an den Meßstellen TS0 bis TS4 in Sprinklernähe.

Temperaturen an den Meßstellen T1 bis T4 im Regal liegen nicht vor.



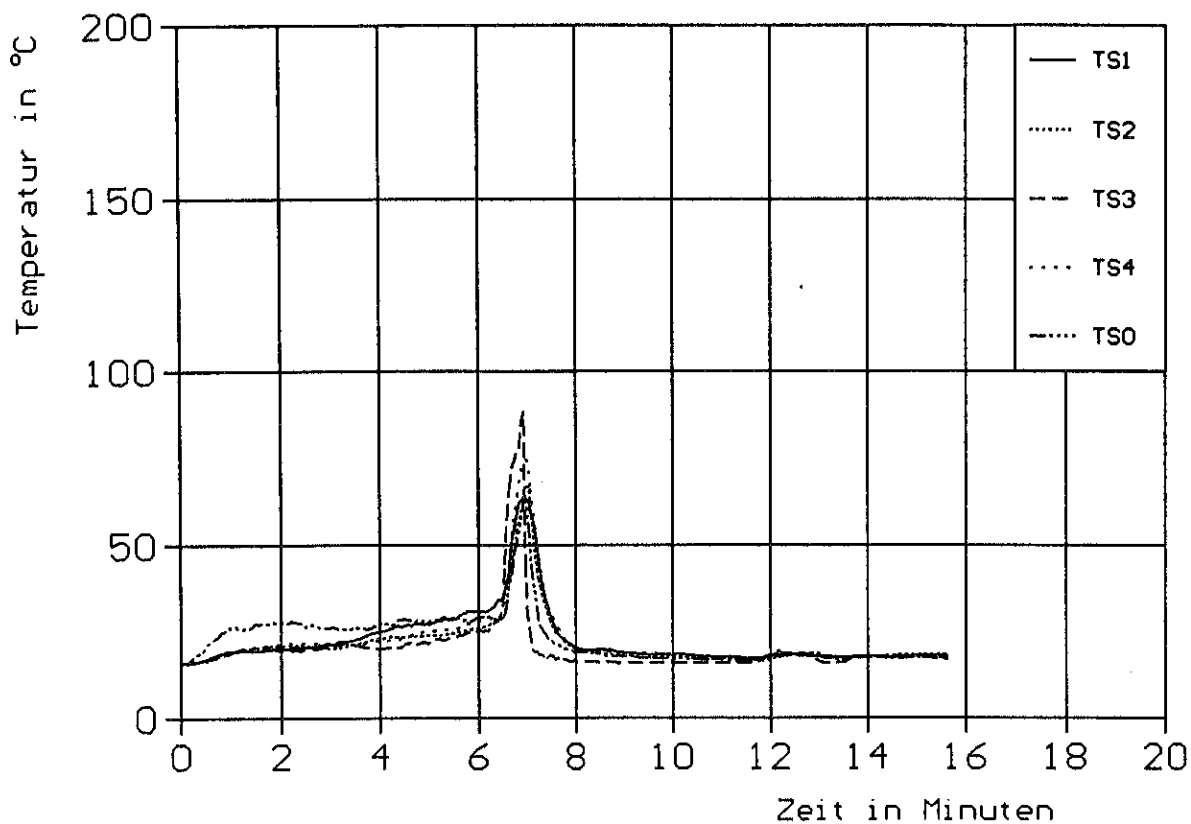


Bild 11a. Versuch Reg2

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen TS0 bis TS4 in Sprinklernähe.

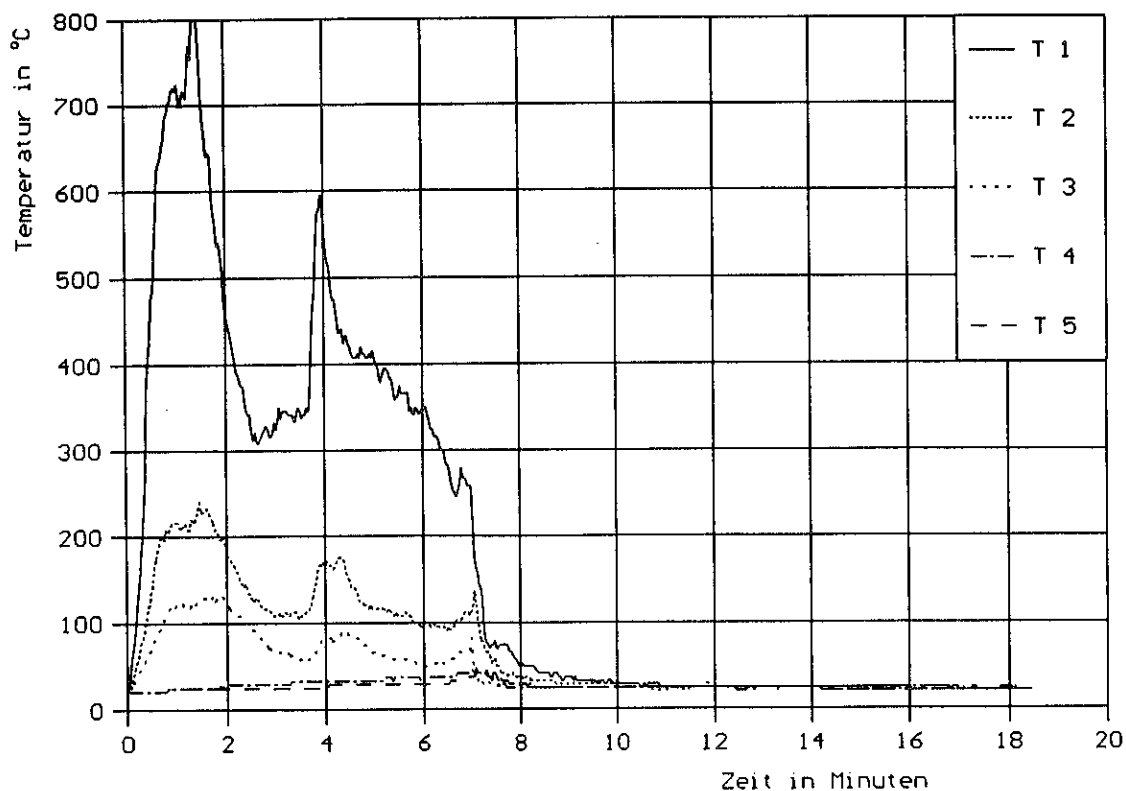


Bild 11b. Versuch Reg2

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal.

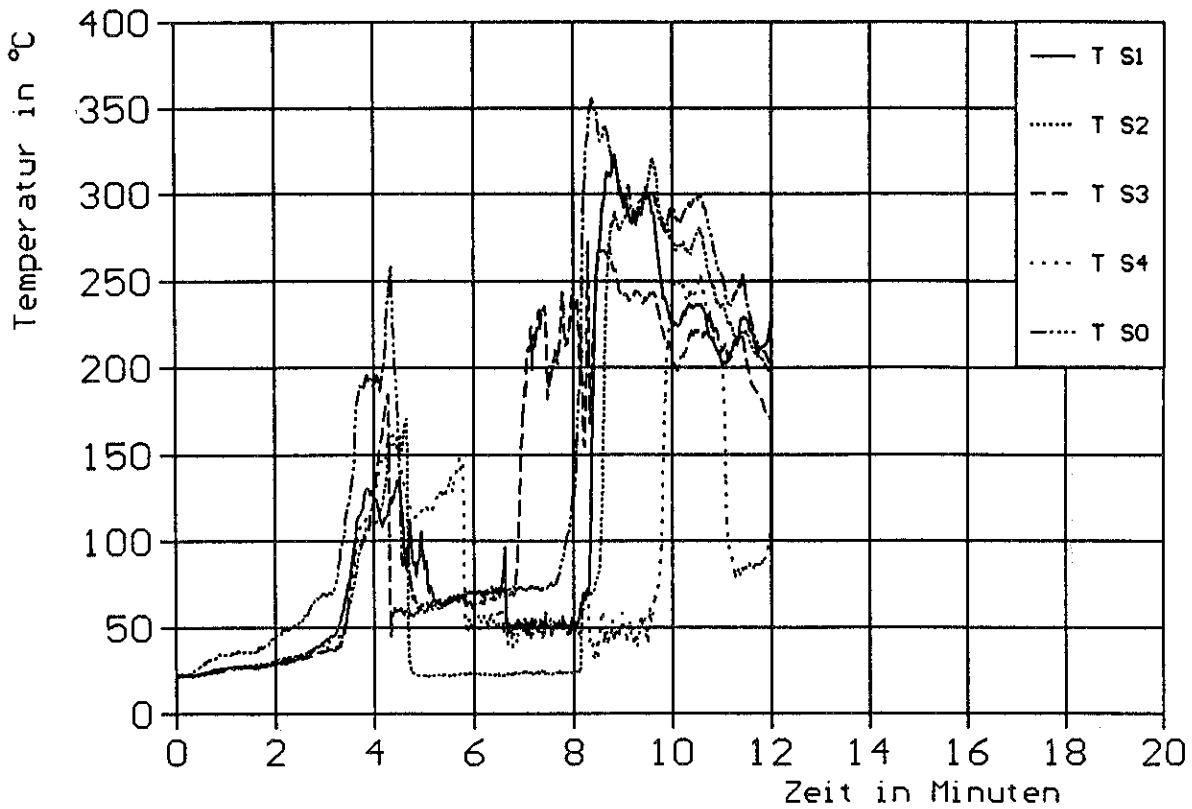


Bild 12a. Versuch Reg3

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen TS0 bis TS4 in Sprinklernähe.

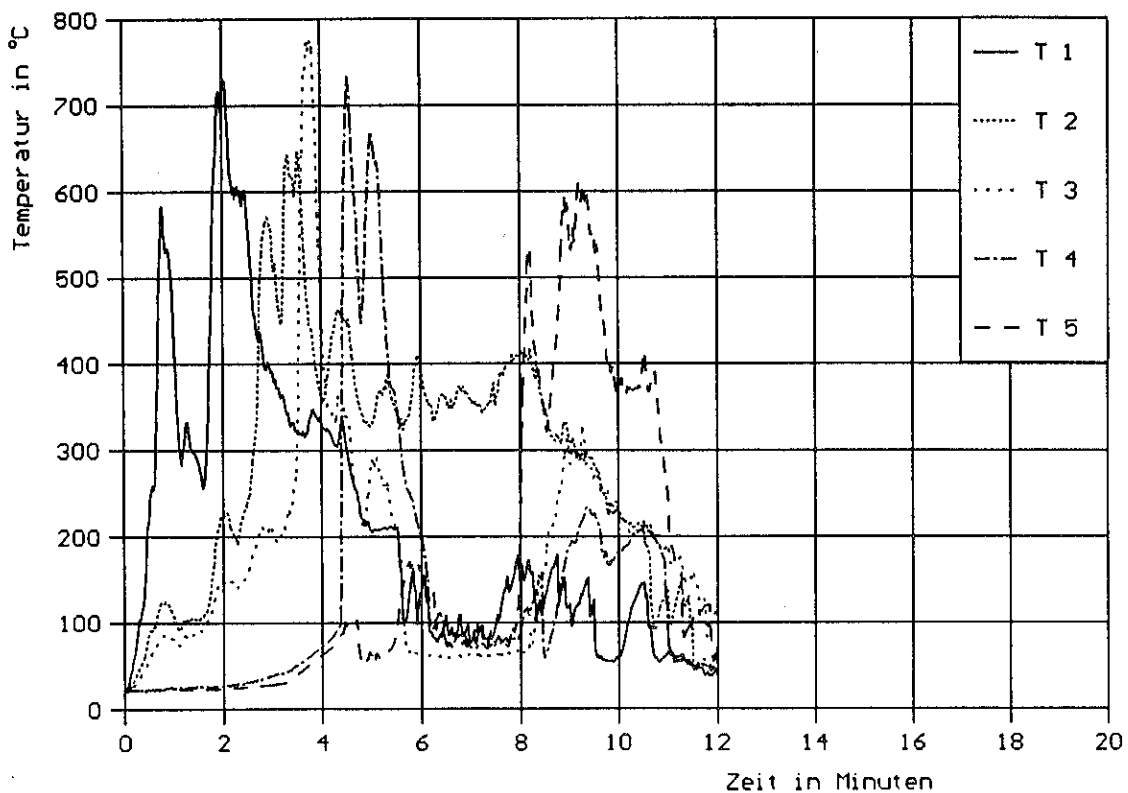


Bild 12b. Versuch Reg3

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal.

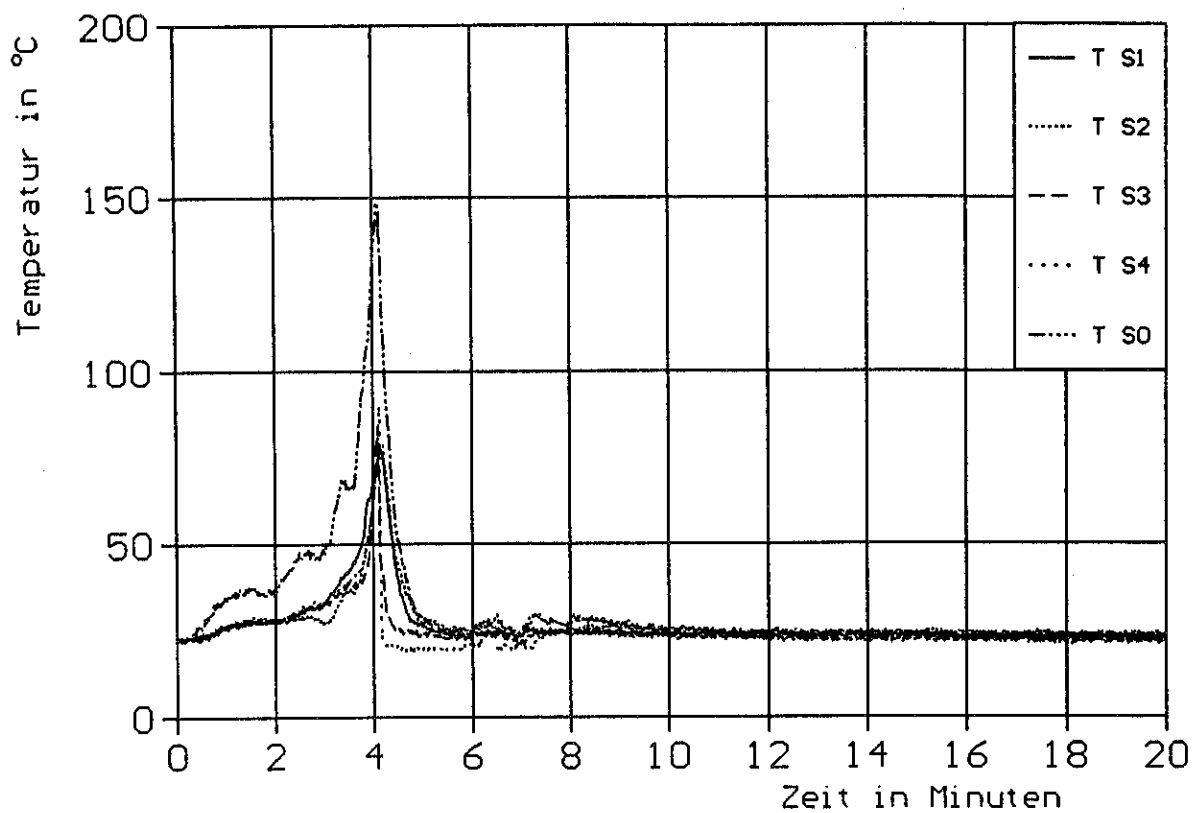


Bild 13a. Versuch Reg4

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen TS0 bis TS4 in Sprinklernähe.

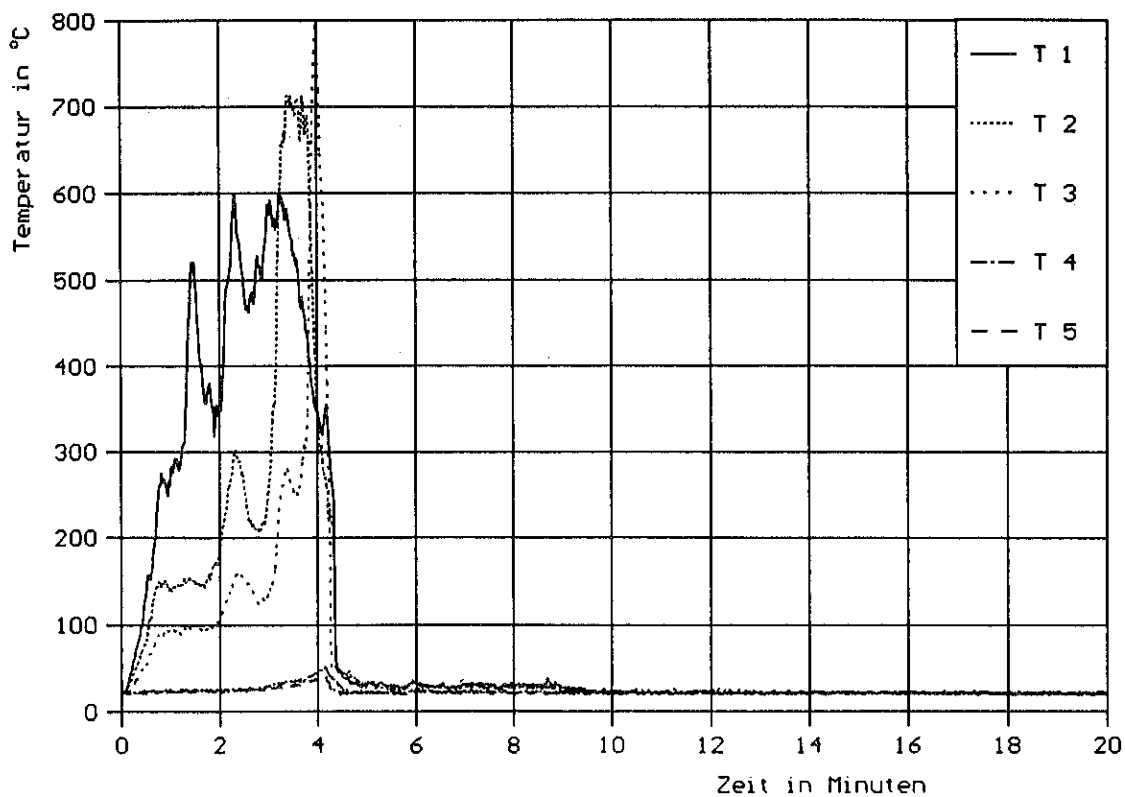


Bild 13b. Versuch Reg4

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit  
an den Meßstellen T1 bis T5 im Regal.

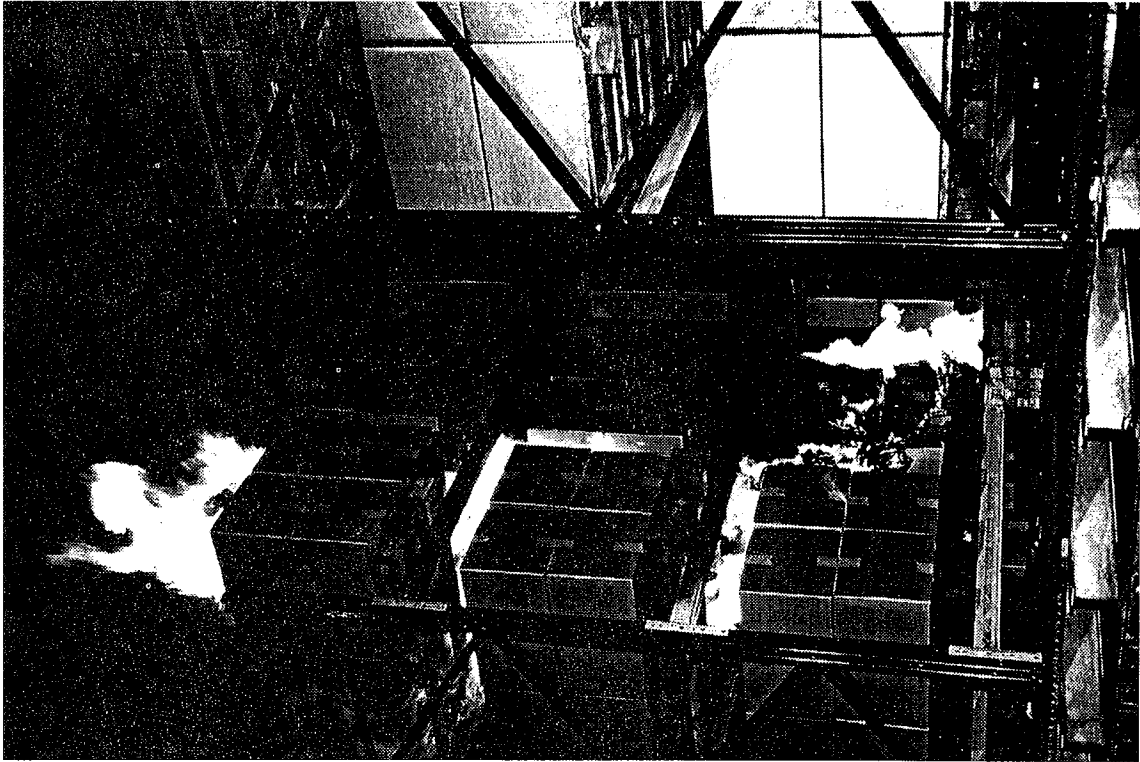


Bild 14b. Regalausschnitt Versuch Reg2  
Versuchszeit: 6 min 36 s.

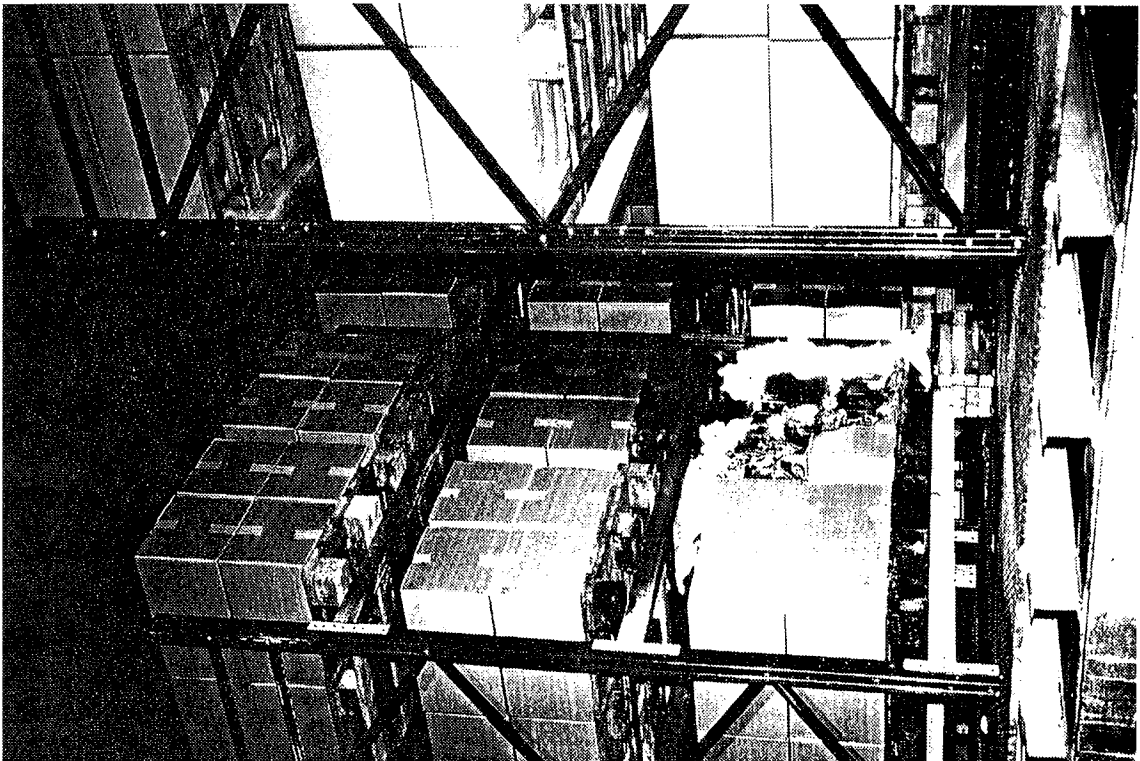


Bild 14a. Regalausschnitt Versuch Reg2  
Versuchszeit: 5 min 8 s.