

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen,

Teil 10: Literaturlauswertung -  
Tropfenverteilungen -  
Löschversuche

85

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

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

Forschungsbericht Nr.85

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 10: Literaturlauswertung -  
Tropfenverteilungen - Löschrersuche

von

Dipl.-Ing. Hermann Schatz

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe  
August 1993

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURAUSWERTUNG SPRINKLER	2
2.1 Allgemeine Angaben über Sprinkler	2
2.2 Brände und Sprinkler	8
2.3 Stapellagerung und Sprinkler	12
2.4 Lüftung und Sprinkler	15
2.5 Anzahl der ausgelösten Sprinkler	16
2.6 Brandversuche und Sprinkler	17
2.7 Sprinkler in kleinen Wohneinheiten	19
2.8 Tropfen und Sprinkler	19
3. VERSUCHSANLAGE UND MEBEINRICHTUNG	19
3.1 Phasen/Doppler-Teilchenanalysator	19
3.2 Versuchsaufbau Brand- und Löschversuche	20
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG	21
4.1 Tropfenverteilungen	21
4.2 Auslösezeiten der Brandmelder und Sprinkler	28
4.3 Temperaturen	29
4.4 Brand- und Löschversuche	30
4.5 Wasserbeaufschlagung bei Brandeinwirkung	32
5. ZUSAMMENFASSUNG	34
6. LITERATURVERZEICHNIS	35
7. TABELLEN UND BILDER	46

## 1. EINLEITUNG

Die Installation ortsfester Löschanlagen zum Schutz von Einrichtungen und gelagerten Gütern ist in der heutigen Zeit eine nicht mehr wegzudenkende Forderung. Das hohe Brandrisiko durch die Anhäufung von unterschiedlichen Stoffen im Produktions- und Lagerbereich sowie die große horizontale und vertikale Ausdehnung der Lagergebäude stellen im Schadenfall die anrückenden Feuerwehren vor sehr große Probleme. Durch das schnelle Auslösen einer Löschanlage, wobei in den meisten Fällen Sprinkler zum Einsatz gelangen, können oft die Schäden in Grenzen gehalten werden.

Die verschiedenartigen Materialien der gelagerten Stoffe können, wenn sie in Brand geraten, nicht nur für die Einsatzkräfte der Feuerwehr eine große Gefahr bedeuten, sondern auch für die Umwelt, da oft giftige Stoffe mit den Brandgasen in die Umgebung gelangen.

Der Löscherfolg einer ortsfesten Löschanlage hängt vor allem davon ab, wie schnell sie anspricht und ob das Löschwasser in ausreichender Menge an den Brandherd gelangen kann. Vom Verband der Sachversicherer (VdS) werden hierzu Richtlinien für Sprinkleranlagen herausgegeben.

Ein längerfristiges Forschungsvorhaben befaßt sich mit Untersuchungen über die Brandausbreitung und über das Löschverhalten mit Sprinklern bei in Brand geratenen lagermäßig gestapelten Stoffen, um somit bei Änderung von Parametern weitere Erkenntnisse über den Branablauf und den Löscheinsatz zu erhalten.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet in Abschnitt 2 eine Weiterführung der Auswertung des in- und ausländischen Schrifttums über Sprinkler, die sich zum Teil auf eine Reihe von Fachaufsätzen und Forschungsberichten bezieht, die nicht durchgängig als aktuell bezeichnet werden können. Es wird jedoch hiermit das Ziel verfolgt, bei der Bearbeitung des mehrjährigen Forschungsvorhabens auch die

Vielzahl der vorhandenen Fachliteraturarbeiten zu berücksichtigen, auf deren Bewertung zunächst aus Gründen der Aktualität im Zusammenhang mit der Planung und Durchführung von Brand- und Löschversuchen im natürlichen Maßstab verzichtet werden mußte. Die gesamte für die Auswertung verwendete Originalliteratur ist in der Dokumentation der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhanden und der Öffentlichkeit zugänglich.

In den folgenden Abschnitten der vorliegenden Arbeit wird über Untersuchungen berichtet, bei denen ohne Brandeinwirkung Tropfenverteilungen von 4 unterschiedlichen Sprinklertypen gemessen wurden. Mit 2 dieser untersuchten Sprinkler wurden Brand- und Löschversuche im natürlichen Maßstab an Regallageranordnungen durchgeführt. Der Löscheinsatz mit diesen Sprinklern erfolgte in einer 1-Sprinkleranordnung und in einer 4-Sprinkleranordnung.

## 2. LITERATURAUSWERTUNG SPRINKLER

### 2.1 Allgemeine Angaben über Sprinkler

Pike /1/ nennt als Alternative für Halonanlagen in Computerräumen auch Sprinkleranlagen und weist auf den guten Löscherfolg dieser Systeme hin.

Brunt /2/ beschreibt die Einrichtung von 6 Naß- und Trockensprinklersystemen in einem Gefängnis, wobei es besonders wichtig erscheint, daß die Sprinkler gegen Mißbrauch geschützt werden und sich keine Personen daran erhängen können.

Kench /3/ führt einige Großbrände an und gibt Methoden zur Vorbeugung und Brandbekämpfung an, wobei Sprinkler hervorgehoben werden. Zusätzlich verweist er auf den guten Löscherfolg mit Sprinklern, wobei die zu schützenden Flächen  $150 \text{ m}^2$  und die Gangbreiten  $2,5 \text{ m}$  nicht übersteigen sollten.

Besnard /4/ berichtet in kurzer Form über die Sprinklerung der in einigen europäischen Ländern geltenden Bereichsflächen.

Heesacker /5/ stellt eine transportable Sprinkleranlage vor, die in Übereinstimmung mit den Richtlinien der NFPA auf einem Anhänger montiert ist. Diese Anlage kann zu Trainingszwecken sowohl als Naß- als auch als Trockenanlage benutzt werden.

Bubyr und Zabraznov /6/ geht in einem kurzen Abschnitt darauf ein, wie eine Verbesserung von Löschanlagen mit Sprinklern erreicht werden kann.

Reif /7/ beschreibt u.a. Sprinkleranlagen als eine brandschutztechnische Vorkehrung, die in einem Kernkraftwerk zur Sicherheit beiträgt.

Ramachandran /8/ führt Studien an, die belegen, daß durch den Einsatz von Sprinklern Brandschäden in beträchtlichem Maße reduziert werden. In Tabellen sind z. B. die jährlichen Verluste und die Amortisationskosten für verschieden geschützte Bereiche angegeben.

Boyd /9/ erwähnt, daß für den Brandschutz in einem 30-stöckigen Versicherungshochhaus die einzige Sprinklertrockenleitung durch ein komplettes, den NFPA-Richtlinien entsprechendes Sprinklersystem ersetzt wurde. Der Druck in den Rohrleitungen beträgt im 29. Stock  $4,5 \times 10^5$  Pa.

McGahan /10/ berichtet, daß ein Brand eine Verladestation eines Ölkonzerns zerstörte und daraufhin diese Station mit Sprinklern ausgerüstet wurde, die von oben und von der Seite schützen. Als Zusatz zum Löschmittel wurde AFFF verwendet. Die Wasserbeaufschlagung beträgt zwischen 100 l/min und 5000 l/min.

Domecq /11/ berichtet über verschiedene Normen für die Installation von automatischen Sprinkleranlagen.

In /12/ wird die Verordnung über die Sprinklerung von Tiefgaragen erwähnt, wenn über der Garage ein anderes genutztes Gebäude vorhanden ist. Es wird dafür plädiert, Sprinkleranlagen für diese Garagen abzuschaffen. Andererseits weisen Untersuchungen nach, daß Sprinkleranlagen diesbezüglich für den Sach-, aber auch für den Personenschutz ihre Berechtigung haben.

Decovic und Labeda /13/ erwähnen Brandmeldeanlagen sowie Anwendungsbeispiele und Funktionsweisen von ortsfesten Löschanlagen mit unterschiedlichen Löschmitteln.

Lundsgaard /14/ gibt eine Zusammenfassung der dänischen Richtlinien bezüglich der Sprinkleranlagen und deren Einbau wieder und vergleicht sie mit den deutschen Richtlinien.

Rasmussen /15/ stellt fest, daß die Anzahl der Brände zugenommen hat, die Brandschäden jedoch weniger geworden sind. Er führt dies auf den Einsatz von Brandmelde- und Sprinkleranlagen sowie den schnellen Einsatz der Feuerwehr zurück.

Neuenschwander /16/ führt das Versagen von Sprinkleranlagen u.a. auf schlecht eingeschweißte Muffen, Blindscheiben oder Pfropfen in Düsenöffnungen zurück. Deshalb ist die Überwachung bei der Montage und die Wartung nach der Fertigstellung von besonderer Bedeutung.

Usemann /17/ zählt die Sprinkleranlagen zu den Brandschutzeinrichtungen. Die Richtlinien für den Einbau sind beim VdS (Form 3003) und beim DIN (Blatt 14489) erhältlich. Die Konstruktion und die Einsatzbereitschaft bezügl. der Wasserversorgung werden für den Betrieb als maßgebend angesehen.

Kincaide /18/ erwähnt die jährlich durchzuführenden Inspektionen von Sprinkleranlagen nach den Richtlinien der NFPA.

Sotis /19/ hebt hervor, daß beim Bau neuer Industriegebäude mit brennbaren Materialien in der Konstruktion oder im Inneren des

Gebäudes Decken-und/oder Zwischenebenensprinkler installiert werden sollten, wobei besonders auf die ausreichende Wasserversorgung geachtet werden muß. Außerdem müssen Gefahrenquellen berücksichtigt und Kontrollen der Anlage vorgenommen werden.

Blessing /20/ berichtet von 44 Bränden in den Jahren 1979 bis 1983, die jeweils einen Schaden von mehr als 500000 Dollar verursachten. Es konnte festgestellt werden, daß geschlossene Ventile, schlechte Pumpen und Rohre und zu geringer Wasserdruck den Wassermangel hervorriefen. Regelmäßige Kontrollen können dies verhindern.

Baker /21/ stellt die Vor- und Nachteile von Sprinkleranlagen in Hochhäusern einander gegenüber und geht auf die Richtlinien der NFPA ein. Weiterhin stellt er ein theoretisches Modell für die Untersuchungen von zuverlässig arbeitenden Sprinkleranlagen für hohe Gebäude vor.

Ward /22/ führt zum Schutz von Computeranlagen sowohl Gas- als auch Wasserlöschanlagen an. Letztere werden jedoch nur dann eingesetzt, wenn auch im übrigen Gebäude Sprinkler installiert sind oder evtl. Glutbrände auftreten können.

Crez /23/ beschreibt die Brandschutzeinrichtungen in einem 35-stöckigen Hotelgebäude. Dazu gehören Branddetektoren, Feuerlöscher und die installierte Sprinkleranlage, für die als Wasserspeicher ein Schwimmbad im 30-sten Stockwerk eingerichtet ist.

Petersen /24/ berichtet von einem umgestürzten Eisenbahnwagen auf einer Fähre, wobei Salzsäure auslief. Mit der vorhandenen Sprinkleranlage wurde der größte Teil der Salzsäure aus der Fähre ausgespült.

Platt /25/ weist auf die Problematik, aber auch auf die Vorteile von Sprinkleranlagen hin. Ebenso berichtet er von Überlegungen, wie der Einsatz von Sprinklern gefördert werden könnte.



Lavelle /26/ bezweifelt den Schutz durch die auf den Bahnsteigen installierten Sprinkler für Züge, die in Melbourne in Tunnels fahren, weil die Düsen durch einen ausgebrochenen Brand im Zug nicht auslösen könnten.

In /27/ wird von 254 Bränden in New York berichtet, wobei in 251 Fällen die automatischen Sprinkleranlagen auslösten. In 10% der Fälle wurde zusätzlich ein Strahlrohr zur Unterstützung eingesetzt.

Cote /28/ erwähnt die ersten Sprinkler von Carey (1806), das erste System mit perforierten Leitungen (1852), das von Harrison entwickelte automatische System (1864), das Sprinklerpatent von Parmelee (1874) und die weitere Entwicklung sowie die Richtlinien der NFPA mit den Gefahrenklassen und Sprinklersystemen.

Wäse /29/ beschreibt Schutzmaßnahmen für 3 Ausstellungshallen, bei denen zunächst die Sprinkleranlage fehlte. Diese wurde mit dem Bewußtsein installiert, daß sie zwar wegen der großen Höhe der Gebäude einen Brand nicht unbedingt kontrollieren, sondern den Funktionserhalt der Stahlkonstruktion durch Kühlung bewirken sollte. Die Auslösetemperaturen wurden deshalb bei 1/4 der Sprinkler auf 69 °C und bei 3/4 der Sprinkler auf 93 °C festgelegt. Zusätzlich wurden Brandmelder und Abzüge eingebaut.

Cassee /30/ erwähnt die Installation von Sprinklern in Wohnhäusern in den USA. Außerdem werden Rohrleitungen aus Kunststoff, schnell ansprechende und Großtropfensprinkler sowie Einbauten mit Kombination von Sprinkler und Rauchabzug vorgestellt.

Williamson und Young /31/ berichten von einem neuen Parlamentsgebäude mit einer Fläche von 69700 m<sup>2</sup> in Australien, das voll gesprinklert ist, wobei mehrere Sprinklerarten installiert wurden. Als zusätzliche Maßnahmen wurde das Gebäude in 4 Sektionen aufgeteilt und Rauchmelder installiert.

Foletti /32/ betrachtet Sprinkleranlagen sowohl zum Schutz von Gebäuden mit hohen Brandbelastungen als auch für den Personenschutz. In dem Bericht wird aufgezeigt, wie eine Firma ihre Produktions- und Lagerräumlichkeiten vor einem möglichen Brandfall durch eine Sprinkleranlage schützt.

Sanz Septien /33/ geht auf den Personenschutz in Krankenhäusern und dabei insbesondere auf die Sprinkleranlagen, die Löschwasserversorgung, die Branddetektoren und die Verhaltenspläne für das Personal ein.

In /34/ wird über die besonderen Brandschutzmaßnahmen der Ind Coope Brauerei berichtet, die verschiedene Systeme zum Schutz des Verpackungsmaterials, der Abfüllstationen, Büros, Labors und Restaurants installieren ließ. Dazu gehören Detektoren, Halon- und CO<sub>2</sub>-Anlagen sowie Sprinklersysteme und das ausgebildete Personal.

Für Isenburg /35/ werden ortsfeste automatische Sprinkleranlagen zum Löschen eines Brandes in der Entstehungsphase benötigt, insbesondere was Krankenhäuser und Heime betrifft. Der Sprinklerschutz sollte möglichst überall vorhanden sein und den Brandrisiken angepaßt werden. So gibt es je nach Brandrisiko Schutzflächen von 21 m<sup>2</sup>, die mit 2,5 mm/min, 12 m<sup>2</sup>, die mit 5 mm/min und 9 m<sup>2</sup>, die in Abhängigkeit von der Materialmenge höher beaufschlagt werden müssen.

In /36/ wird in mehreren Beiträgen ausführlich über Brandschutzmaßnahmen, u. a. Sprinkleranlagen in Industrieanlagen berichtet. Bauliche Unterteilungen werden als sinnvoll angesehen, weil dadurch nicht so viele Sprinkler auslösen und somit direkt über dem Brandherd das Wasser nicht knapp wird.

Für die Jahre 1981 bis 1985 werden die Verluste durch Brände 4mal höher beziffert, wenn keine Sprinkleranlagen installiert waren. Deshalb sollten möglichst überall, z. B. in Kanälen und Räumen, Sprinkler vorhanden sein und auch entsprechend gewartet werden.

Von FM wurden jedes Jahr etwa 1400 Ventile vorgefunden, die geschlossen waren. Weiterhin werden für speziell zu schützende Bereiche auch andere Löschmittel erwähnt.

In /37/ wird ebenfalls darauf hingewiesen, daß Abtrennungen nötig sind, damit nicht durch das Öffnen vieler Sprinkler das Wasser an einem einzelnen Sprinkler knapp wird. Außerdem wird erwähnt, daß bei vorhandenen Sprinkleranlagen weniger Schäden auftraten. Vor allem sollte die Lagerung nicht zu hoch sein, keine Gänge zugestellt und brennbare Gase gesondert gelagert werden. In Tabellen werden die Brandverluste in Großbritannien aufgezeigt.

## 2.2 Brände und Sprinkler

In /38/ wird von einem Brand in einem gesprinklerten Bekleidungs- und Verteilzentrum berichtet. Die über 1000 ausgelösten Sprinkler im Decken- und Zwischenebenenbereich konnten gegen den Brand nichts ausrichten, da das Löschwasser in offene Boxen und nicht auf den Brandherd gelangte. Es entstand deshalb ein Schaden von 14 Mio Dollar.

Bamert /39/ berichtet über einen Brand mit einer Staubexplosion in einer Spanplattenfabrik. Die installierte Sprinkleranlage konnte mit über 50 geöffneten Sprinklern im Bereich der Pressen den Brand kontrollieren.

Laughlin /40/ beschreibt einen von einem leerstehenden Gebäude ausgehenden Brand, der auf weitere Gebäudeteile übergriff. Die Sprinkler waren zum Teil wegen Reparaturarbeiten außer Betrieb, in anderen Gebäudeteilen wurden sie überlaufen. Einstürzende Wände behinderten die Löscharbeiten, für die 1,3 Mio Gallonen Wasser benötigt wurden. Es entstand ein Sachschaden von 35 Mio Dollar.

In /41/ wird von einem im MGM Hotel in Las Vegas ausgebrochenen Brand berichtet, in dem nur Teilbereiche mit Sprinklern aus-

gerüstet waren. Es war anhand der Wasser- bzw. Brandschäden deutlich zu erkennen, welche Bereiche gesprinklert bzw. nicht gesprinklert waren. Die meisten der 85 Personen kamen durch Rauchvergiftung ums Leben.

In /42/ wird ebenfalls über den Brand im nur teilweise gesprinklerten MGM Hotel berichtet. In Bereichen, die durchgehend unter Aufsicht waren, wurden keine Sprinkler gefordert und installiert. Die Räumlichkeiten und der Brandverlauf werden ausführlich beschrieben. Es waren 85 Tote und 600 Verletzte zu beklagen. Es entstand ein Sachschaden von über 50 Mio Dollar.

Bell /43/ gibt eine ausführliche Beschreibung der Räumlichkeiten eines in Brand geratenen Gebäudes, in dem Teile der Treppenhäuser mit hängenden Sprinklern geschützt und im Hauptgebäude Rauch- und Wärmeabzüge installiert waren. Insgesamt hatte man doch zu wenig für den Brandschutz getan, da es 26 Tote und 24 Verletzte gab.

In /44/ wird u. a. in einem kurzen Bericht ein in einem Papierlager in einem Krankenhaus ausgebrochener Brand erwähnt, der durch die vorhandene Sprinkleranlage gelöscht wurde. Es entstand nur ein Schaden von 6000 Dollar.

Arbogast /45/ erwähnt einen Brand in einem voll gesprinklerten Möbelwarenlager. Die anrückende Feuerwehr bemerkte, daß aus den Sprinklern kein Wasser austrat und stellte fest, daß die Leitung gebrochen war. Zusätzlich fehlten Sprinkler. Trotz Einspeisung durch die Feuerwehr konnte der Brand nicht gelöscht werden.

In /46/ wird von einem durch eine heruntergefallene Deckenleuchte verursachten Brand in einem Modehaus berichtet. Die Verkaufs- und Lagerräume sowie die Schaufenster waren mit Sprinklern geschützt. Durch eine Sprinkleranlage und den Einsatz der Feuerwehr konnte der Brand gelöscht werden. Eine Sprinklertrockenanlage hatte nicht ausgelöst.

In /47/ wird über Brände in Gebäuden berichtet, die mit Sprinkleranlagen ausgerüstet waren. Es wurde aufgezeigt, daß in diesen Fällen nur wenig Personen zu Schaden kamen.

In /48/ wird ein Pflegeheim erwähnt, in dem in einem Zimmer am Ende eines Flures ein Brand ausbrach. Da Sprinkler nur in den allgemein zugänglichen Räumen wie Küche, Speiseraum und Vorraum und nicht in den Zimmern installiert waren, kamen im Flur Personen ums Leben.

Richardson /49/ verweist auf einen Brand in einem Einkaufszentrum, in dem die Feuerwehr über einen Hydranten Wasser in fünf Sprinklersysteme einspeiste, um den Brand zu löschen. Es entstand dennoch ein Schaden von 1 Mio Dollar.

Ostendorf /50/ geht auf ein Brandgeschehen in einem Kunststoffwerk ein, bei dem die alarmierte Feuerwehr ein bereits überall brennendes Gebäude vorfand. Es wurde festgestellt, daß die Ventile der Sprinkleranlage geschlossen waren und der Brand wegen vorhandener Farben, Lacke und Verdünnung schnell um sich greifen konnte. Zwei Personen wurden verletzt und es entstand hoher Sachschaden.

Johanson /51/ berichtet von einem Brand in einer Strohverbrennungsanlage, der dazu führte, daß zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden mußten, wie Abtrennung und Sprinklerung von Räumen.

Marschalk /52/ hält die in Cobb County installierten Brandmelder, Kunststoffleitungen und schnell ansprechenden Sprinkler für die besten Schutzkomponenten. Als Beispiel führt er den Brand in einem Hotel an, bei dem die Melder auslösten, die Sprinkler öffneten und der Brand gelöscht wurde, ohne daß die Feuerwehr alarmiert werden mußte. Mobil Homes werden in den USA ebenso ausgerüstet.

McAnulty /53/ beschreibt, daß ein altes Gebäude zu einem neuen mit Atrium versehenen Gebäude umgebaut und mit einer Sprinkleranlage

ausgerüstet wurde. Ein Brand in diesem Gebäudekomplex konnte mit den aktivierten Sprinklern und der alarmierten Feuerwehr erfolgreich bekämpft werden.

Bulgakov /54/ erwähnt 3 Brände, bei denen die installierten Sprinkleranlagen wegen Wassermangels bzw. zu geringen Drücken unwirksam waren.

Best /55/ berichtet von einem Brand in einem Einkaufszentrum, der durch einen elektrischen Defekt entstand. Die Sprinkleranlage, die nicht in allen Bereichen installiert war, half dennoch, die weitere Ausbreitung des Brandes zu verhindern. Trotzdem wurden 13 Geschäfte zerstört und 32 beschädigt. Der Schaden betrug 15 Mio Dollar.

In /56/ wird von einem durch ein gasbetriebenes Heizgerät entstandenen Brand an Woll- und Syntetikfasern in einem Textilunternehmen berichtet, der weder mit Handfeuerlöschern noch mit Sprinklern, sondern erst durch die Feuerwehr gelöscht werden konnte. Der Schaden betrug 60000 Dollar. Ebenso verhielt es sich mit einem Ofenbrand, wobei ein Schaden von 100000 Dollar entstand.

Timoney /57/ beschreibt in einem längeren Bericht Einzelheiten über den durch einen Kurzschluß entstandenen Brand in einem Pflegeheim. Die vorhandene Melde- und Sprinkleranlage funktionierte nicht. Es kamen 2 Personen ums Leben.

Corbett /58/ berichtet von einem durch brennenden Müll verursachten Brand in einem alten Lagergebäude aus Holz. Da die Sprinkleranlage nicht betriebsbereit war, konnte der Brand auf benachbarte Gebäude übergreifen. Es entstand ein Sachschaden von 10 Mio Dollar.

LeBlanc und Redding /59/ beschreiben in einem ausführlichen Bericht über Großbrände u. a. auch ein Kraftwerk mit Sprinkleranlage, bei dem eine Ölpumpe einen Brand verursachte und einem

Schaden von 2 Mio Dollar verursachte. Zusätzlich wird über eine Holzstaubexplosion berichtet, die eine Möbelfirma mitsamt der Sprinkleranlage vernichtete. Es gab Verletzte und einen Schaden von über 11,6 Mio Dollar.

In /60/ wird über ein großflächiges Gebäude mit 65 Sprinkler-Naßanlagen berichtet, bei dem auf dem Flachdach ein Brand ausbrach. Da die Sprinkler wie üblich 300 mm unterhalb der Decke installiert waren, wurden sie nach dem Auslösen abgeschaltet, da sie keinen Nutzen brachten. 500 Feuerwehrleute benötigten 3 Tage, um den Brand zu löschen. Der Schaden betrug 138 Mio Dollar.

Butterworth /61/ berichtet von einem Brand in einem einstöckigen 34 Jahre alten Gebäude mit einer Grundfläche von über 6300 m<sup>2</sup>, das 4 verschiedene Firmen beherbergte. Starker Qualm trat auf und explodierende Staplertanks ließen das Dach einstürzen. Der sich schnell ausbreitende Brand mußte durch die Feuerwehr gelöscht werden, da sich herausstellte, daß bereits Jahre zuvor die Sprinkleranlage abgekoppelt worden war.

Steenbock und Wienandt /62/ erwähnen einen durch einen Schweißbrenner verursachten Brand in einer Produktionshalle, in der Pressen standen, die Öldämpfe verursachten. Da die vorhandene Sprinkleranlage keinerlei Wirkung zeigte, mußte die Feuerwehr den Brand löschen.

### 2.3 Stapellagerung und Sprinkler

Burns /63/ beschreibt einen Großbrand, bei dem Funken eines Gabelstaplers heruntergefallene Behälter mit brennbaren Flüssigkeiten gezündet hatten. Das Lagergebäude mit einer Grundfläche von ca. 112000 m<sup>2</sup> und einer Lagerhöhe von ca. 5,8 m war voll gesprinklert. Der Sachschaden betrug dennoch 113 Mio Dollar, weil das Löschwasser nicht den Boden erreichen konnte und insgesamt zu wenig Wasservorrat vorhanden war.

Best /64/ gibt einen ausführlichen Bericht über einen Brand in einem einstöckigen Warenverteilzentrum (K-Mart) mit einer Grundfläche von ca. 330 m mal 360 m, in dem eine Sprinkleranlage installiert war. Brandwände teilten das Zentrum in 4 Teile. Auf doppelreihigen Gestellen mit einer max. Höhe von 4,5 m befanden sich unterschiedliche Lagerartikel der Gefahrenklassen I bis IV nach NFPA. Ein Arbeiter bemerkte neben seinem Gabelstapler einen Feuerball, der aus einem mit Vergaserreiniger gefüllten Karton herauskam und versuchte zu löschen. Der schnell um sich greifende Brand überlief die Sprinkleranlage und es entstand ein Schaden von über 100 Mio Dollar.

Aresu de Seui /65/ erwähnt ebenfalls den Brand im K-Mart Zentrum, bei dem ein Gabelstapler einen heruntergefallenen Karton mit flüssigem Reiniger entzündete. Die Deckensprinkleranlage, mit einer Auslösetemperatur von 140 °C und für einen Volumenstrom von 16,3 l/min Wasser ausgelegt, wurde überlaufen.

In /66/ werden Sprinkleranlagen als bester Schutz für Läger genannt. Brände entstehen meist durch Unachtsamkeit beim Rauchen, durch Funkenflug, Elektrizität und anderes mehr. Es ist sehr wichtig, die gelagerten Stoffe (fest, flüssig) zu kennen. Gefährliche Aerosole sollten in getrennten Abschnitten lagern. Die Lagerung muß nach den Richtlinien erfolgen und dabei die zu schützenden Flächen, die Höhen, die Gangbreiten, die Sprinkler, die Wasserausflußrate, der Wasservorrat usw. berücksichtigt werden. Zwischenebenensprinkler sind bei mehr als 7,6 m Höhe zu installieren.

Bei Bylinkin /67/ werden Vorschriften, Normen und Empfehlungen für Hochregalläger erwähnt, vollautomatische Sprinkler vorgestellt und die Funktionsweise beschrieben.

In /68/ werden zum Schutz von großflächigen und hohen Lägern automatische Detektoren und Sprinkler empfohlen. Für die Jahre 1897 bis 1969 werden Prozentanteile genannt, bei denen Sprinkler nützlich waren. Zusätzlich sollen ein ausreichender Wasservorrat, die



nötigen Kontrollen, die entsprechenden Wasserbeaufschlagungen von 7,5 bis 30 mm/min oder auch Zusätze wie AFFF verwendet werden. Verschiedene Länder unternehmen Anstrengungen zur Verbesserung der Brandsicherheit.

Ward /69/ führt in seinem Bericht Brände auf, bei denen Sachschäden von mehr als 5 Mio Pfund Sterling auftraten. Eine Tabelle schlüsselt bei den Bränden unter 200000 Pfund auf, wo die Brandursachen lagen. Außerdem wird die Raumhöhe und die Lagerhöhe (4,3 m bis 13 m) sowie der Brandstoff aufgeführt. In 3 Tabellen werden zusätzlich für 20 gesprinkelte Gebäude die Brandursachen festgehalten.

Corbett /70/ gibt einen kurzen Bericht über einen Brand in einem Lager mit Aerosolbehältern, bei dem der Schaden 100 Mio Dollar betrug. Er verweist darauf, daß Aerosole von anderen Stoffen getrennt, nicht höher als max. zwei Paletten übereinander gelagert und mit bis zu 250 mm/min Wasser gesprinkelt werden sollten.

Best /71/ beschreibt einen Brand in einem Gebäudekomplex, der nicht in allen Bereichen gesprinkelt war, wobei ein Gesamtschaden von 93 Mio Dollar entstand. Neben dem genauen Brandverlauf wird über den Einbau von Sprinklern diskutiert, wodurch evtl. weniger Verluste zustande gekommen wären.

Mönch /72/ erwähnt einen durch Schweißarbeiten entstandenen Brand in einem Hochregallager mit der Länge von 60 m, der Breite von 30 m und der Höhe von 17 m. Der Brand konnte mit der Sprinkleranlage nicht vollständig gelöscht werden, so daß die Feuerwehr eingreifen mußte.

Rydermann und Tuovinen /73/ befassen sich mit Brandrisiken in Palettenlagern. Hier spielt die Stapelhöhe im Lager und die Effektivität einer Sprinkleranlage einschließlich der Tropfengröße eine bedeutende Rolle. ESFR-Sprinklersysteme werden für Lager als geeignet betrachtet.

Isner /74/ berichtet von einem Gebäude der Farbenindustrie mit den Abmessungen 131 m mal 128 m mal 8,5 m, in dem 1,5 Mio Gallonen leicht entzündliche Materialien in Plastikbehältern und Kannen in Kartons auf Regalen ca. 4,9 m hoch gelagert waren. Eine Sprinkleranlage war installiert. Durch einen Funken eines Staplers wurde die auslaufende Flüssigkeit eines heruntergefallenen Behälters gezündet. Obwohl die Sprinkleranlage auslöste, brannte das Gebäude ab. Nach diesem Brand kam man zu dem Ergebnis, daß die Grundwassergefährdung höher einzuschätzen war als die Gefahr durch das kontrollierte Abbrennen des Gebäudes.

#### 2.4 Lüftung und Sprinkler

Hübner, Kühl und Martin /75/ geben eine kurze Beschreibung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen und vergleichen entsprechende Richtlinien. So gibt es z. B. in der DIN 18232 keinen Hinweis auf die Kombination von Rauchabzügen und Sprinklern. Die VdS-Richtlinien erwähnen das Öffnen nach dem Auslösen von Sprinklern. In der Literatur sind kritische Äußerungen darüber zu finden.

Edwards /76/ berichtet von einem Brand in einem Nachtclub mit daneben liegendem Atrium. Es wurde nicht genug Wärme freigesetzt, um die Sprinkler auszulösen, aber es öffneten 2 von 5 Rauchabzügen. Es wird angegeben, daß bei einer Gebäudehöhe von 30 m bei einem sich langsam entwickelnden Brand zum Auslösen der Sprinkler 12,9 MW und bei einem sich schnell entwickelnden Brand 17,75 MW benötigt werden. Außerdem ist im Atrium auf den Einbau von Läden und auf Balkone zu achten.

In /77/ werden die Brandschutzmaßnahmen für die unterschiedlich großen Räume von 280 m<sup>2</sup> bis 18600 m<sup>2</sup> eines Einkaufszentrums genannt. Bereits baulicherseits sind Brandabschnitte, Wände, Vorhänge und eine Sprinkleranlage für den gesamten Bereich der Läden vorhanden. Ein Gebäudeteil besteht aus einem Atrium, in dem Rauchklappen eingebaut wurden. Melde- und Fluchtwegesysteme ergänzen

diese Maßnahmen.

## 2.5 Anzahl der ausgelösten Sprinkler

Mönch /72/ berichtet von einer Spinnerei mit den Abmessungen 55 m x 30 m x 17 m mit einer nachträglich ausgerüsteten Sprinkleranlage, bei der durch Auslösen von 6 Sprinklern ein Brand gelöscht werden konnte.

Bei Pike /1/ wird erwähnt, daß 66,6 % der Brände mit einem Sprinkler, 15,6 % mit zwei, 94 % mit max. sechs und 97 % mit max. zehn Sprinklern gelöscht werden konnten.

Kench /3/ erwähnt, daß 70 % der Brände in gesprinklerten Gebäuden mit weniger als 5 Sprinkler, 90 % mit weniger als 18 und 95 % der Brände mit weniger als 30 Sprinklern gelöscht werden.

In /44/ wird ein weiterer Brand in einem teilweise mit Sprinklern ausgerüsteten Bürogebäude erwähnt. Dabei lösten 13 Sprinkler aus, und es entstand ein Schaden von 900000 Dollar.

In /78/ wird von einem durch einen propanbetriebenen Gabelstapler verursachten Brand in einem einstöckigen Gebäude berichtet. Bei der vorhandenen Sprinkleranlage lösten 6 Sprinkler aus. Der Sachschaden betrug 375000 Pfund Sterling.

In /79/ wird von einer Explosion in einer chemischen Fabrik berichtet. Eine Brandwand und 36 ausgelöste Sprinkler konnten das Feuer kontrollieren. Bei diesem Unglück kamen 2 Personen zu Tode. Es entstand ein Schaden von 1 Mio Dollar. Bei einem weiteren Brand in einem Lagergebäude konnten 56 ausgelöste Sprinkler einen Brand bis zum Eintreffen der Feuerwehr halten. Der Schaden betrug 300000 Dollar.

In /80/ ist in einem kurzen Bericht ein Brand in einer Kleiderfabrik erwähnt, der durch das Auslösen von 13 Sprinklern unter

Kontrolle gebracht werden konnte. Der Gesamtschaden betrug 500000 Dollar. Ein anderer durch einen Funken entstandener Brand in einer Reifenfabrik konnte mit 2 Sprinklern gelöscht werden.

In /81/ wird über ein durch Brandstiftung verursachtes Feuer in der Damenoberbekleidungsabteilung eines Geschäftes berichtet, das mit 2 Sprinklern gelöscht wurde. Der Schaden betrug 45000 Dollar. Weiterhin wird über einen Brand in einer Garne verarbeiteten Fabrik durch Überhitzung einer Maschine berichtet. Trotz Auslösen von 65 Sprinklern konnte der Brand erst durch die Feuerwehr vollständig gelöscht werden. Der Schaden betrug 100000 Dollar. In einer Metallfabrik konnten durch Funkenflug entzündete Lacke durch das Auslösen von 2 Sprinklern innerhalb von 3 min gelöscht werden. Der Schaden betrug dennoch 100000 Dollar.

Ward /69/ führt in seinem bereits erwähnten Bericht Brände an, wobei er neben den Ursachen für die Schadenshöhen bis 200000 Pfund bzw. 10 Mio Pfund auch die Anzahl der ausgelösten Sprinkler mit 1 bis 15 bzw. 3 bis 127 Sprinkler angibt.

In /82/ wird von einem Brand in einem Müllcontainer berichtet, der über ein Vordach in ein Gebäude übersprang und 2 Sprinkler auslöste. Der Schaden betrug 151000 Dollar. Bei einem weiteren Brand in einem Lagerhaus öffneten 14 Sprinkler. Der Schaden betrug 200000 Dollar.

## 2.6 Brandversuche und Sprinkler

In /83/ werden zahlreiche Untersuchungen beschrieben, die aufgrund der Entwicklung und Lagerung von Produkten mit größeren Brandgefahren in Lägern bei FM durchgeführt wurden. Brennende Kartons in Regalen mit einer Höhe von 6,7 m konnten mit Sprinklern nicht kontrolliert werden. Trotz Sprinklereinsatz gerieten Testbrände in Gängen mit einer Breite von 2,4 m außer Kontrolle. Gemischte Lagerungen waren ebenfalls nicht zu löschen. Bei Paletten

bis 6,2 m Höhe konnten die Zwischenräume mit Sprinklern geschützt werden. Aerosole mit Wasser auf 8 Paletten konnten durch Sprinkler gelöscht werden, Aerosole mit Alkohol oder Petroleum dagegen nicht, trotz Einsatz von Decken- und Zwischenebenensprinklern. Das bedeutet, daß derartige Stoffe getrennt in kleinen Mengen gelagert werden sollten. Höhere Lagerung, andere Sprinkler usw. bedürfen einer sorgfältigen Planung und strengen Kontrollmaßnahmen.

In /84/ wird über Brandtests an Lageraufbauten bei FM berichtet. Ein Brand ist nicht nur von den gelagerten Stoffen abhängig, sondern auch von der Geometrie des Lageraufbaus wie der Höhe, der Gangbreite oder den Zwischenräumen. Bei horizontaler Brandausbreitung können Deckensprinkler oft nichts ausrichten, so daß Zwischenebenensprinkler verwendet werden müssen. Die Auslösetemperatur von 141 °C verhindert, daß zu viele Sprinkler öffnen und dadurch zu wenig Wasser senkrecht nach unten gelangt. Vor allem sollten jedoch feuerwiderstandsfähige Bauteile verwendet werden.

Woodward /85/ erwähnt Versuche in den USA, die das Installieren von automatischen Sprinkleranlagen in Krankenzimmern als sinnvoll erscheinen lassen. Auch in Großbritannien wurden bei Untersuchungen gute Erfahrungen gemacht. Als effektiv wird die Kombination von Brandmelde- und Sprinkleranlagen bezeichnet.

In /86/ werden 9 Brandversuche in Versuchsparkhäusern der Größe 12 m mal 11 m mal 2,5 m beschrieben. Bei den in Australien durchgeführten Untersuchungen mit mehreren Personenwagen wurde u. a. festgestellt, daß die eingesetzte Sprinkleranlage den Brand stark begrenzen und kontrollieren konnte. Sowohl die Brandgase als auch die Temperaturen waren mit weniger als 90 °C deutlich geringer als ohne Sprinkler mit über 400 °C. Entrauchungssysteme waren dagegen kaum wirksam. Die Wasserbeaufschlagung betrug zwischen 9,4 mm/min und 11,6 mm/min, die Ansprechzeit der Sprinkler zwischen 30 s und 330s.

## 2.7 Sprinkler in kleinen Wohneinheiten

Mattingly /87/ berichtet von einem Brand, der im Schlafzimmer in einem "residential home" ausgebrochen war. Ein installiertes Sprinklersystem konnte den Brand löschen, bevor die Feuerwehr eintraf. Es entstand nur geringer Sachschaden.

Smith /88/ gibt an, daß 70 % der Brandopfer in kleinen Wohneinheiten und 80 % der Brandopfer durch Brandrauch zu beklagen sind. Deshalb sollten Brandmelder und Sprinkler bereits bei der Planung vorgesehen werden. Um die Brandsicherheit zu verbessern, werden Untersuchungen und Demonstrationen in einem Wohnwagen durchgeführt.

## 2.8 Tropfen und Sprinkler

Reinhardt und Schulze /89/ erwähnen, daß Wassernebel durch die kleinen Tropfen und die große Oberfläche etwa das 1700-fache Volumen verdrängt. Bei Versuchen trat die Löschwirkung bei Verwendung von Wassernebel schneller ein als beim Einsatz von Sprinklern, bei denen außerdem die 2,5-fache Wassermenge benötigt wurde.

# 3. VERSUCHSANLAGE UND MEßEINRICHTUNG

## 3.1 Phasen/Doppler-Teilchenanalysator

Die Meßeinheit befindet sich bei der Firma Lechler und besteht aus einem Lasersender und einem -empfänger. Beide sind mit einem Personalcomputer und einem Drucker gekoppelt, über die Meßergebnisse ausgewertet bzw. ausgedruckt werden können. Von Bendig /90/ und in /91/ wird die Funktionsweise beschrieben. Das Meßprinzip dieses Tropfengrößenanalysators beruht auf dem sogenannten Doppler-Effekt, bei dem Laserlicht an den zu messenden Partikeln gestreut wird und dabei seine Frequenz und Phasenlage ändert. Bild 1 zeigt

den Aufbau der Meßanordnung.

Der Laserstrahl wird durch eine spezielle Optik in 2 Strahlen aufgespalten, die sich mit einem kleinen Winkel zueinander ausbreiten und an einem bestimmten Punkt im Raum treffen. Tropfen, die durch diesen Bereich fallen, streuen das Licht der beiden Laserstrahlen und verschieben gleichzeitig die Frequenz (Doppler-Effekt) und die Phase der Lichtsignale. Die Phasenverschiebung hängt mit der Tropfengröße und die Frequenzverschiebung mit der Geschwindigkeit der Partikel zusammen. Spezielle Aufnahmesysteme gestatten Messungen von bis zu 50.000 Teilchen je Sekunde.

### 3.2 Versuchsaufbau Brand- und Löschversuche

Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau der gesamten Versuchseinrichtung in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). Der Aufbau besteht aus der Wasserversorgung mit dem Sprinklersystem und einer Waagekonstruktion mit der darauf befindlichen Brandlast sowie einem darüber liegenden Dach mit Rauchschürzen. Weitere Einzelheiten können dem vorangehenden Bericht /92/ entnommen werden.

Die Brandlast bestand aus einer Anordnung von Gitterboxen, die zu je 4 Stück in der Fläche und in der Höhe gestapelt wurden. In diese Gitterboxen wurden 3 bzw. 5 Wellpappkartons pro Box eingesetzt, so daß insgesamt 48 bzw. 80 Kartons mit den Abmessungen 58 cm x 37 cm x 34 cm gelagert waren. Als Lagergut wurden nichtbrennbare Stahlblechkanister mit einem Volumen von 30 l mit Holz- wolle (HW) bzw. Polystyrolchips (PS) als Stoßschutzmaterial verpackt (Bild 3).

Die Zündquelle bestand aus einem Faserstreifen mit den Abmessungen 15 cm x 3 cm x 1,8 cm, der mit 50 ml Brennspritus getränkt und an der rechten unteren Ecke des linken Stapels gezündet wurde.

Die Brandlast wurde auf einem Waageboden mit den Abmessungen von 5 m x 5 m aufgebaut, um den Abbrand des Brandgutes bestimmen zu können. Das beim Löscheinsatz verwendete Löschwasser wurde unterhalb des Waagebodens auf einer Fläche von 4 m x 4 m in Wannen mit einer Kantenlänge von 0,8 m aufgefangen (Bild 4).

Für den Löscheinsatz wurden jeweils ein bzw. vier Sprinkler verschiedenen Typs mit den Auslösetemperaturen von 68 °C installiert. Über der Brandlast sind die Sprinkler in einem Abstand von 0,5 m und jeweils 3 m zueinander angeordnet (Bild 5). Direkt neben diesen Sprinklern in einem Abstand von max. 2 cm sind Temperaturmeßstellen angebracht, die kontinuierlich die Temperatur aufzeichnen.

Bei den beiden eingesetzten Brandmeldern handelt es sich um einen Ionisations- und einen optischen Melder, die direkt neben dem zentralen Sprinkler angeordnet sind und nach ihrem Auslösen entfernt werden, um eine Zerstörung zu vermeiden.

#### 4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG

##### 4.1 Tropfenverteilungen

Als Fortführung des letzten Berichtes /92/ wurden verschiedene Arten von Verteilungen gemessen wie die Anzahlhäufigkeitsverteilung, die einfache - und die kumulierte Volumenverteilung sowie die Geschwindigkeitsverteilung. Damit wurden für 4 verschiedene Sprinklertypen die Meßergebnisse vervollständigt. Auf den Bildern 6 bis 10 sind die jeweiligen Mittelwerte für den Sprinkler Typ B, auf den Bildern 11 bis 15 für den Sprinkler Typ C, auf den Bildern 16 bis 20 für den Sprinkler Typ E und auf den Bildern 21 bis 25 für den Sprinkler Typ F dargestellt. Die Meßwerte wurden aus einer Sprinklerhöhe von 1,5 m über der Meßstrecke aufgenommen.

Bild 6 zeigt für den Sprinkler Typ B die gemittelte Anzahlhäufigkeitsverteilung für die beiden Drücke von 0,5 und 5 bar. Bild 7



gibt die einfache Volumenverteilung und Bild 8 die kumulierte Volumenverteilung wieder. Es kann festgestellt werden, daß beim kleineren Druck bzw. Volumenstrom etwa 14 % der Tropfen eine Größe von ca. 150  $\mu\text{m}$  besitzen, das sind etwa 0,2 % des Volumens. Beim höheren Druck besitzen etwa 18 % eine Größe von ca. 130  $\mu\text{m}$ , das sind etwa 1,5 % des Volumens. Die Anzahl der Tropfen wird, wie auch Tabelle 1 zeigt, mit zunehmendem Radius kleiner.

Eine Größe von ca. 500  $\mu\text{m}$  haben beim kleineren Druck noch ca. 3 % und beim größeren Druck noch ca. 0,8 % der Tropfen. Dies entspricht etwa 1,6 % bzw. 5 % des Volumens, wie Bild 7 zeigt.

Beim kleineren Druck sind eine Anzahl von etwa 96 % der Tropfen kleiner als ca. 1 mm, was in Bild 8 einem Volumen von ca. 50 % entspricht. Beim größeren Druck sind 99,9 % der Tropfen kleiner als 1 mm, d.h. 96 % des Volumens. Noch etwa 97 % der Tropfen sind kleiner als 500  $\mu\text{m}$ , was einem Volumen von ca. 68 % entspricht. Das heißt, die Anzahl der Tropfen ist stark angestiegen, was auch Tabelle 1 zeigt.

Die kumulierte Volumenverteilung in Bild 8 zeigt weiterhin, daß beim kleineren Druck etwa 50 % der Tropfen kleiner als ca. 1 mm sind und 90 % kleiner als ca. 2 mm. Beim größeren Druck sind 50 % kleiner als ca. 0,4 mm und 90 % kleiner als ca. 0,8 mm. Das heißt, daß eine Erhöhung des Druckes von 0,5 bar auf 5 bar die Tropfen auf weniger als die Hälfte verkleinert, was auch aus der Tabelle 1 ersichtlich ist.

Die Geschwindigkeitsverteilung auf Bild 9 zeigt, daß beim Sprinkler Typ B unabhängig vom Druck die meisten Tropfen eine Geschwindigkeit von ca. 2 m/s besitzen. Einzelne Tropfen erreichen beim kleineren Druck maximale Geschwindigkeiten von 6,9 m/s und beim höheren Druck 9,2 m/s, die jedoch im Bild nicht mehr als Balken erkennbar sind. Eventuell auftretende negative Geschwindigkeiten können durch Verwirbelungen mit Rückströmung erklärt werden.

In Bild 10 ist bei der Größe-Geschwindigkeits-Verteilung (Size-Velocity-Distribution) zu erkennen, daß die Geschwindigkeit mit der Tropfengröße ansteigt und zu größeren Tropfen hin etwas streut. Tropfen unterhalb einer Größe von 0,45 mm haben beim höheren Druck in etwa die gleiche Geschwindigkeit von ca. 2,5 m/s. Eine Zunahme des Druckes hat eine höhere Geschwindigkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Tropfengröße zur Folge.

Bild 11 zeigt für den Sprinkler Typ C für die beiden Drücke von 0,5 bar und 5 bar die Anzahlhäufigkeitsverteilung und Bild 12 die einfache Volumenverteilung. Auch hier liegt die größte Anzahl der Tropfen in der gleichen Größenordnung wie beim Sprinkler Typ B. Der Volumenanteil ist jedoch mit 0,1 % bzw. 1 % noch geringer geworden.

Eine Größe von ca. 500  $\mu\text{m}$  haben beim kleineren Druck noch ca. 6 % und beim größeren Druck noch ca. 1,6 % der Tropfen, also doppelt so viele wie beim Sprinkler Typ B. Der Volumenanteil ist etwa wie beim Sprinkler Typ B geblieben, wie aus Bild 12 deutlich zu ersehen ist.

Beim kleineren Druck sind etwa 91 % der Tropfen kleiner als ca. 1 mm, was in Bild 13 einem Volumen von ca. 25 % entspricht. Beim größeren Druck sind dies mehr als 99 %, was einem Volumen von ca. 80 % entspricht. Etwa 93 % der Tropfen sind kleiner als 500  $\mu\text{m}$ , was einem Volumen von ca. 34 % entspricht.

Aus der kumulierten Volumenverteilung auf Bild 13 wird außerdem deutlich, daß beim kleineren Druck etwa 50 % der Tropfen kleiner als 1,5 mm und etwa 90 % kleiner als 2,73 mm sind. Beim größeren Druck sind etwa 50 % kleiner als ca. 0,63 mm und etwa 90 % kleiner als 1,15 mm. Es ist zu erkennen, daß gegenüber dem Sprinkler Typ B die Tropfen etwas größer sind. Ein höherer Druck bedeutet aber auch hier eine Verkleinerung der Tropfen und eine Zunahme der Tropfenanzahl.

Die Geschwindigkeitsverteilung auf Bild 14 zeigt für den Sprinkler Typ C einen deutlichen Anstieg der Geschwindigkeit für die meisten Tropfen von ca. 1,3 m/s beim niedrigeren auf ca. 3,6 m/s beim höheren Druck. Einzelne Tropfen erreichen Geschwindigkeiten von bis zu 5,1 m/s bzw. 6,8 m/s.

Bei der Size-Velocity-Distribution auf Bild 15 ist zu erkennen, daß im Gegensatz zum Typ B beim kleineren Druck auch Tropfen der Größe über 1,8 mm auftreten und beim größeren Druck auch Tropfen der Größe über 1,4 mm. Es ist wie zuvor ein Anstieg der Geschwindigkeit mit zunehmender Tropfengröße festzustellen, wobei die Streuung wesentlich größer geworden ist.

Bild 16 zeigt die Anzahlhäufigkeitsverteilung für den Sprinkler Typ E. Wie bei den beiden vorherigen Sprinklern haben die meisten Tropfen beim kleineren Druck eine Größe von ca. 150  $\mu\text{m}$  und beim größeren Druck eine Größe von ca. 160  $\mu\text{m}$ . Das sind wie auf Bild 17 mit der einfachen Volumenverteilung beim Sprinkler Typ B ca. 0,2 % bzw. ca. 1,6 % des Volumens.

Eine Größe von 500  $\mu\text{m}$  haben beim kleineren Druck noch ca. 4,6 % und beim größeren Druck noch ca. 2 % der Tropfen. Dies entspricht auf Bild 17 einem Volumenanteil von ca. 2 % bzw. 6 % und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie zuvor.

Beim kleineren Druck sind ca. 93,5 % der Tropfen kleiner als 1 mm. Dies entspricht bei der kumulierten Volumenverteilung auf Bild 18 etwa 35 % des Volumens. Beim größeren Druck sind dies auch beim Sprinkler Typ E über 99 % der Tropfen mit einem Volumenanteil von ca. 95 %. Etwa 92,5 % der Tropfen sind kleiner als 500  $\mu\text{m}$ , was einem Volumen von ca. 48 % entspricht.

Bild 18 zeigt ebenso, daß beim kleineren Druck 50 % der Tropfen kleiner sind als ca. 1,2 mm und 90 % kleiner als ca. 2,1 mm. Beim größeren Druck sind 50 % kleiner als ca. 0,51 mm und 90 % kleiner als ca. 0,84 mm. Der höhere Druck bewirkt auch hier eine Abnahme

der Tropfengröße in der gleichen Größenordnung wie bei den Sprinklern der Typen B und C.

Die Geschwindigkeitsverteilung auf Bild 19 unterscheidet sich deutlich von den vorherigen. Der Geschwindigkeitsbereich ist breiter geworden und erstreckt sich beim niedrigeren Druck bis 9,4 m/s und beim höheren Druck bis über 20 m/s. Die meisten Tropfen haben eine Geschwindigkeit von ca. 3,3 m/s beim kleineren bzw. ca. 11,5 m/s beim größeren Druck.

Bei der Size-Velocity-Distribution auf Bild 20 ist gegenüber den Sprinklern B und C sehr deutlich bei allen Tropfengrößen eine Zunahme der Geschwindigkeit festzustellen. Bei größeren Tropfen von mehr als 1,5 mm bzw. 1,2 mm streuen die Werte, wobei beim höheren Druck eine Abnahme der Geschwindigkeit zu verzeichnen ist.

Auf Bild 21 ist die Anzahlhäufigkeitsverteilung für den Sprinkler Typ F aufgetragen. Die meisten Tropfen haben beim kleineren Druck eine Größe von ca. 260 µm und sind damit größer als bei den vorgenannten Sprinklern und beim höheren Druck eine Größe von ca. 130 µm. Das entspricht bei der einfachen Volumenverteilung auf Bild 22 einem Volumen von 0,5 % bzw. 2,9 %.

Eine Größe von 500 µm haben beim niedrigeren Druck noch ca. 5 % und beim höheren Druck noch ca. 0,7 % der Tropfen. Dies entspricht einem Volumenanteil von ca. 1,9 % bzw. von ca. 6 % der Tropfen. Sie weichen damit nur geringfügig von den Meßwerten der anderen Sprinkler ab.

Beim kleineren Druck sind etwa 90 % der Tropfen kleiner als 1 mm und haben nach Bild 23 ca. 23 % des Volumens. Beim größeren Druck sind dies über 99 % der Tropfen mit einem Volumen von ca. 92 % und ca. 98 % der Tropfen mit einem Volumenanteil von ca. 69 %, die kleiner sind als 500 µm.

Weiterhin ist aus der kumulierten Volumenverteilung auf Bild 23 zu

erkennen, daß beim niedrigeren Druck 50 % kleiner sind als 1,5 mm und ca. 90 % kleiner als 2,7 mm. Beim höheren Druck sind ca. 50 % kleiner als ca. 0,4 mm und 90 % kleiner als 0,85 mm. Bei diesem Sprinklertyp werden beim niedrigeren Druck die größten und beim höheren Druck die kleinsten Tropfen erzeugt.

Die Geschwindigkeitsverteilung auf Bild 24 entspricht in etwa denen der Sprinkler B und C. Die meisten Tropfen haben eine Geschwindigkeit zwischen 0,5 m/s und 2 m/s beim niedrigen Druck und ca. 3,5 m/s beim höheren. Maximale Einzelwerte liegen über 10 m/s.

Bei der Size-Velocity-Distribution auf Bild 25 haben die kleinsten Tropfen von ca. 0,1 mm beim niedrigeren Druck gegenüber den anderen Sprinklertypen auch die kleinste Geschwindigkeit, die mit zunehmender Tropfengröße bis auf über 4 m/s, vereinzelt bis zu ca. 6 m/s, ansteigt. Beim höheren Druck liegt die Geschwindigkeit bei allen Tropfengrößen zwischen 2,5 und 5 m/s, d. h. viel gleichmäßiger als bei den anderen Sprinklertypen.

In der Tabelle 1 ist die Anzahl der aus einem Sprinkler austretenden Wassertropfen in Abhängigkeit vom Radius aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß die Tropfendurchmesser unabhängig vom Sprinklertyp bei den niedrigen Drücken von 0,5 bar im Mittel zwischen 0,9 mm und 1,25 mm und bei den höheren Drücken von 5 bar im Mittel zwischen 0,35 mm und 0,53 mm liegen. Die Tropfenanzahl steigt bei den höheren Drücken um ein Vielfaches an.

Aus der Tabelle geht weiterhin hervor, daß beim Sprinkler Typ B mit zunehmendem Radius unabhängig vom Druck der Tropfendurchmesser im Mittel zunimmt, daß aber beim höheren Druck der Tropfendurchmesser im Mittel um mehr als die Hälfte kleiner wird.

Die Anzahl der Tropfen ist jeweils bei den kleineren Radien wesentlich höher als bei den größeren und beim höheren Druck um ein Vielfaches größer als beim niedrigeren Druck. Die größeren Tropfen fliegen etwas weiter als die kleineren.

Für den Sprinkler Typ C gilt die gleiche Aussage wie für den Sprinkler Typ B trotz der jeweils höheren Volumenströme bei jeweils gleichen Drücken. Lediglich die Unterschiede der einzelnen Tropfendurchmesser sind etwas größer. Auffallend ist, daß beim höheren Druck im mittleren Radienbereich um 1200 mm die kleinsten aber auch die meisten Tropfen auftreten.

Beim Sprinkler Typ E hat eine größere Austrittsöffnung bei gleichem Druck eine weitere Erhöhung des Volumenstromes zur Folge. Hier sind beim höheren Druck die Tropfen weniger als halb so groß wie beim niedrigen Druck. Die Anzahl der Tropfen ist jedoch beim höheren Druck sehr stark angestiegen, wobei jeweils bei größeren Radien sehr viel weniger Tropfen vorhanden sind.

Beim Sprinkler Typ F zeigt sich, daß bei den beiden Drücken und den gleichen Volumenströmen wie beim Sprinkler Typ B im Mittel die Tropfen beim niedrigeren Druck größer und die Anzahl der Tropfen sehr viel kleiner ist. Im Gegensatz zu den 3 anderen Sprinklern werden beim Typ F beim höheren Druck mit den kleinsten Tropfen die größten Weiten erreicht.

Es kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, daß die Geometrie eines Sprinklers eine wesentliche Rolle bei der Verteilung des austretenden Wassers spielt und eine Zulassung erreicht werden kann, indem die Größe der Tropfen oder die Anzahl der Tropfen variiert wird, so daß die geforderte Menge auf der Meßfläche auftrifft. Damit ist jedoch nicht ausgesagt, daß verschiedene zugelassene Sprinkler beim gleichen Brand auch gleich gut löschen. In /93/ wurde bereits auf den Einfluß der Geometrie eines Sprinklers hingewiesen. Flüssigkeitsverteilungen und Tropfengrößen dieser Sprinkler wurden in /92/ behandelt.

#### 4.2 Auslösezeiten der Brandmelder und Sprinkler

In der Tabelle 2 sind neben der jeweiligen Brandlast die bei den Versuchen ermittelten Ansprechzeiten der beiden Brandmelder und der Sprinkler S0 bis S4 aufgelistet. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei diesen Versuchen unabhängig vom Stoßschutzmaterial jeweils der Ionisationsmelder schneller auslöste (9 s bis 108 s) als der optische Melder (87 s bis 160 s).

Beim Einsatz eines zentralen Sprinklers an der Stelle S0 bei den ersten 3 Versuchen lagen die Auslösezeiten unabhängig von der Brandlast (HW, PS) und vom Sprinkler (Typ E und F) zwischen 6 min und 7 min und somit wesentlich niedriger als bei früheren Untersuchungen, bei denen keine Rauchschürzen am Dach angebracht waren oder gar kein Dach vorhanden war.

Beim Einsatz von 4 Sprinklern (Typ F) an den Stellen S1 bis S4 ist festzustellen, daß bei den vier durchgeführten Versuchen der der Zündstelle am nächsten gelegene Sprinkler S3 zuerst auslöste. Die Auslösezeiten mit weniger als 7 min bei Polystyrol und weniger als 8,5 min bei Holzwolle lagen ebenfalls noch unter den bei früheren Versuchen ermittelten.

Die beiden Versuche mit der Brandlast Polystyrol, bei denen eine höhere Wärmefreisetzung vorlag, bewirkten außerdem, daß sowohl bei einem Versuch das Auslösen des Sprinklers S4 als auch bei einem Versuch das Auslösen der Sprinkler S1 und S2 erfolgte.

Es zeigte sich auch, daß es in diesem Fall keine Rolle spielte, daß bei den Versuchen 4 und 5 in den Gitterboxen 80 Kartons (5 pro Box) und bei den Versuchen 6 und 7 in den Gitterboxen nur 48 Kartons (3 pro Box) und dadurch größere horizontale Zwischenräume vorhanden waren. Für das Auslösen der Sprinkler S3 und S4 ist neben der höheren Wärmefreisetzung die vertikale Brandausbreitung und für das Auslösen der Sprinkler S1 und S2 zusätzlich die horizontale Brandausbreitung von Bedeutung. In allen Fällen macht sich

das Ansammeln der heißen Brandgase unter dem Dach stark bemerkbar.

#### 4.3 Temperaturen

In der Tabelle 3 sind neben dem Sprinkler und der Brandlast die einzelnen Temperaturwerte der an den Stellen S0 bis S4 direkt neben dem jeweiligen eingesetzten Sprinkler installierten Thermoelemente eingetragen. Daraus ist zu erkennen, ob ein Sprinkler, wenn er an dieser Stelle installiert gewesen wäre, aufgrund der Temperatur hätte auslösen können. Diese angegebenen Temperaturen betreffen jeweils den Auslösezeitpunkt eines Sprinklers und können zu einem anderen Zeitpunkt auch höhere Werte erreicht haben.

Wie die Tabelle zeigt, sind die Temperaturwerte zum Auslösezeitpunkt nicht so hoch wie bei früheren Untersuchungen, was durch den besseren Wärmestau unterhalb des Daches mittels der Rauchschrüzen erklärt werden kann. Auch an den nicht mit einem Sprinkler besetzten Stellen waren die Temperaturen zum Zeitpunkt des Auslösen des jeweils ersten Sprinklers so hoch, daß vorhandene Sprinkler an diesen Stellen hätten auslösen können. Die Temperaturen in Klammern wurden jeweils zu dem Zeitpunkt des Auslösens eines Sprinklers erfaßt. Sie können entweder durch die weitere Brandeinwirkung auch höher oder durch die bereits eingesetzte Kühlwirkung eines zuvor ausgelösten Sprinklers auch wesentlich niedriger liegen.

Bild 26 zeigt die Temperaturkurven für den Versuch 2, bei dem der Sprinkler Typ E an der Stelle S0 zentral über der Brandlast verwendet wurde. Zunächst steigen die Brandgase unter das Dach und erwärmen diesen Bereich langsam. In Abhängigkeit von der Brandlast steigt nach wenigen Minuten die Temperatur steil an und löst den Sprinkler S0 aus. Die Temperatur fällt sofort ab und der Brand ist gelöscht. Auch an den anderen Meßstellen S1 bis S4 zeigt sich das gleiche Verhalten. Aufgrund der höheren Temperaturen hätten auch hier Sprinkler auslösen können.



Bild 27 zeigt die Temperaturkurven für den Versuch 6. Nach der Zündung steigen die Temperaturen an den Meßstellen S0 bis S4 zunächst langsam und anschließend schneller bis zu einem Maximum an, d.h. der Raum unter dem Dach wird durch die aufsteigenden Brandgase erwärmt. Es ist zu erkennen, daß der Sprinkler S3 erst nach Überschreiten der Maximaltemperatur auslöste. Die Sprinkler S1 und S2 lösten erst nach Überschreiten eines zweiten Temperaturmaximums aus, nachdem der Brand mit dem Sprinkler S3 nicht gelöscht werden konnte.

Obwohl die Temperatur am Sprinkler S4 am höchsten lag und auch zuerst erreicht wurde, löste dieser nicht aus. Die Temperatur an der Stelle S0 (ohne Sprinkler) lag ebenfalls über der Sprinklerauslösetemperatur von 68 °C. Nach ca. 9 min wurde der Löscheinsatz beendet. Der Brand war gelöscht und die Temperaturen fielen weiter ab.

#### 4.4 Brand- und Löschversuche

Der Löscheinsatz erfolgte durch das Auslösen der jeweils installierten Sprinkler. Die Dauer des Löscheinsatzes richtete sich nach der optischen Beurteilung des Brandes, der als gelöscht betrachtet wurde, wenn keine Flammen mehr oder nur noch kleine Flammen zu erkennen waren, die jedoch keinen weiteren Wellpappkarton mehr zünden und somit auch keinen Schaden mehr anrichten konnten. Durch die starke Rauchentwicklung und Wasserdampfbildung war eine diesbezügliche Beurteilung sehr schwierig. Die für die Brandausbreitung im Stapel installierten Thermolemente dafür heranzuziehen war jedoch wegen der Kühlwirkung des aus den Sprinklern austretenden Wassers nicht möglich.

In Tabelle 4 sind neben den Sprinklern und der Brandlast der Mittelwert der Wasserbeaufschlagung, die eingesetzten Löschwassermengen und der in den Wannen aufgefangene Prozentanteil des Löschwassers aufgelistet. Beim Einsatz eines zentralen Sprinklers vom

Typ F im ersten Versuch konnte der Brand nicht gelöscht werden, denn das meiste Löschwasser gelangte über die Stapel hinweg nach außen. Da der gesamte Stapel weiterbrannte, mußte er mit dem Strahlrohr abgelöscht werden und die Angabe des Wasserprozentanteils aus den Sprinklern war nicht möglich.

Bei den beiden Versuchen mit dem Sprinkler Typ E und Polystyrol bzw. Holzwolle als Stoßschutzmaterial wurden bei gleichem Volumenstrom sehr unterschiedliche Wassermengen verbraucht. Dies ist damit zu erklären, daß beim Polystyrol nach dem Niederschlagen der Flammen und Kontrollieren des Brandes noch kleine Brandnester vorhanden waren, die auch noch gelöscht wurden, obwohl diese, wie bei der Holzwolle, auch keine weiteren Kartons hätten zünden können. Die Sprinkleranlage hätte bereits nach ca. 1 min abgeschaltet werden können. Mit 19 bzw. 20 verbrannten und 1 angebrannten Karton im linken vorderen Stapel (Lagerstapel I, Bild 3) war in beiden Fällen der Schaden als gleich einzustufen. Aufgrund des schnellen Ansprechens der Sprinkleranlage und des verwendeten Sprinklertyps E brannte jedoch nur dieser linke vordere Stapel ab.

Der Löscheinsatz bei den Versuchen 4 und 5 mit vier Sprinklern vom Typ F, wobei 2 bzw. 1 Sprinkler auslösten, benötigte jeweils eine sehr viel höhere Wassermenge als der Löscheinsatz bei den Versuchen 6 und 7, bei denen 3 bzw. 1 Sprinkler öffneten. Dies ist auf die dichtere Lagerung von 5 Kartons pro Gitterbox (Bild 3) zurückzuführen. In beiden Fällen brannten der vordere und hintere linke Stapel (Lagerstapel I und III, Bild 3) ab und im Falle des Polystyrols aufgrund der höheren Wärmefreisetzung im rechten vorderen Stapel (Lagerstapel II) noch 5 Kartons an.

Beim Versuch 6 mit 3 Kartons pro Gitterbox wurde nach dem Auslösen der Sprinkler eine geringere Wassermenge freigegeben. Es reichte dennoch ein kurzer Löscheinsatz aus, um größeren Schaden zu verhindern. Da der linke hintere Stapel (Lagerstapel III, Bild 3) bereits vor dem Auslösen mit der Sprinkleranlage gezündet wurde, konnte das Löschwasser der ausgelösten Sprinkler ein Abbrennen

nicht mehr verhindern. Das Übergreifen des Brandes auf den vorderen rechten Stapel (Lagerstapel II, Bild 3) erfolgte so spät, daß nur noch 2 Kartons anbrennen konnten, bevor das an diese Stelle gelangende Löschwasser den Brand löschen konnte.

Beim Versuch 7 konnte der Brand ebenfalls nur mit einem ausgelösten Sprinkler und insgesamt wenig Wasser gelöscht werden. Auch hier brannten der vordere und hintere linke Stapel (Lagerstapel I und III, Bild 3) ab. Beim rechten vorderen Stapel (Lagerstapel II, Bild 3) brannten noch vier Kartons an. Bei beiden Versuchen hat wohl die lockere Lagerung von 3 Kartons pro Gitterbox bei diesem Sprinkler den Löschvorgang begünstigt.

#### 4.5 Wasserbeaufschlagung bei Brandeinwirkung

Für den ersten Versuch wurde das Löschwasser des Sprinklers nicht gemessen, da der Brand unter zusätzlicher Verwendung eines Strahlrohres gelöscht wurde. Bei den Versuchen 2 und 3 gelangte, wie bereits für den zentral installierten Sprinkler Typ E bei früher durchgeführten Kaltversuchen /92/, nahezu das gesamte Löschwasser in die Auffangwannen.

Bei den Versuchen 4 bis 7 mit jeweils vier verwendeten Sprinklern vom Typ F wurden unabhängig von der Brandlast, der Anzahl der ausgelösten Sprinkler und der Gesamtmenge des Löschwassers nur zwischen 11 % und 21 % des ausgeströmten Wassers in den Auffangwannen gemessen, wobei maximal nur etwa 25 % des Löschwassers aufgrund der Position der Sprinkler über den Auffangwannen in diesen gesammelt werden kann. Etwa 75 % des Löschwassers treffen somit außerhalb der Wannen auf. Die Differenz der in den Wannen aufgefangenen Löschwassermenge zur theoretisch auffangbaren Löschwassermenge von ca. 25 % ist im wesentlichen von der Brandlast, dem Brandstadium beim Auslösen der Sprinklers und der Gesamtlöschzeit abhängig.

Ein Vergleich dieser beiden Sprinkler vom Typ E und Typ F zeigt

deutlich, daß es unabhängig von der Brandlast, sei es Holzwolle oder Polystyrol in jeweils 3 oder 5 Kartons pro Gitterbox, nur mit dem Sprinkler Typ E möglich war, den Brand auf einen Stapel zu begrenzen, wobei annähernd die doppelte Wassermenge benötigt wurde wie beim Einsatz des Sprinklers Typ F, bei dem in der gleichen zentralen Position des Sprinklers alle 4 Stapel und bei der Anordnung mit vier Sprinklern jeweils mindestens 2 Stapel abbrannten. Es bleibt festzustellen, daß ein schnelles Auslöseverhalten der Sprinkler, ein genügend großer Wasservolumenstrom und ein hoher Impuls der Tropfen vorhanden sein muß, um auf einen Brand einwirken zu können.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Ortsfeste Löschanlagen sind in Lagerbereichen weit verbreitet und im Falle eines Schadenfeuers sofort für die Brandbekämpfung verfügbar, wobei als Löschmittel meistens Wasser eingesetzt wird.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Auswertung der in- und ausländischen Literatur weitergeführt, um auf dem Gebiet des Brandschutzes einen möglichst umfassenden Überblick zu erhalten. Einzelne Abschnitte beschäftigen sich mit allgemeinen Angaben über Sprinkler, mit Bränden, bei denen Sprinkler erwähnt werden, mit Stapellagerung und Lüftung in Verbindung mit Sprinklern, mit Brandversuchen und Sprinklereinsatz, mit dem Einbau von Sprinklern in kleinen Wohneinheiten und mit Tropfen.

Weiterhin werden Messungen mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator an mehreren handelsüblichen Sprinklern beschrieben, wobei die Anzahl, das Volumen und die Geschwindigkeit der Tropfen des aus einem Sprinkler austretenden Wassers betrachtet werden. Es ist zu erkennen, daß die Sprinkler ihr Wasser jeweils anders verteilen, die Anzahl der Tropfen bei verschiedenen Sprinklern stark voneinander abweicht und die einzelnen Tropfen in Abhängigkeit von den Sprinklern unterschiedlich weit fliegen, was wiederum von ihrer Größe und Geschwindigkeit abhängt.

Zusätzlich werden Untersuchungen aufgeführt, bei denen Wellpappkartons in Gitterboxen gelagert und sowohl ein als auch vier Sprinkler für den Löscheinsatz installiert wurden. Der ausströmende Löschwasservolumenstrom variierte zwischen ca. 80 l/min und ca. 400 l/min. Die Untersuchungen zeigten deutlich, daß sowohl ein schnelles Auslösen eines Sprinklers, ein genügend großer Volumenstrom auf den Brandherd als auch ein hoher Impuls der Tropfen vorhanden sein muß, um einen Löscheinsatz erfolgreich zu gestalten.

## 6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Pike, C. : Computers - minimizing costly damage -  
direct and undirect  
Fire Protection 44 (1981) Nr.526, S.8-9,11
- /2/ Brunt, M.W. : Firesafety at the new Contra Costa Country  
detention facility  
Fire Journal 76 (1982) Nr.2, S.29-32,90
- /3/ Kench, R.L. : The special dangers of fire affecting  
storage  
Fire Prevention (1982) Nr.147, S.14-17
- /4/ Besnard, E. : Legal requirements for sprinklers in  
Europe  
Fire Prevention (1982) Nr.151, S.27-28
- /5/ Heesacker, N. : Companies tapped for training aid  
Fire Safety Today 49 (1982) Nr.7, S.22
- /6/ Bubyr, N. (Titel russisch) Verbesserungen der  
Zabraznov, V. : automatischen Löschanlagen  
Pozarnoe delo (1982) Nr.6, S.26-28
- /7/ Reif, Z. : (Titel serbokroatisch) Brandschutzsystem  
des Kernkraftwerks 'Krsko'  
Suvremeno vatrogastvo (1982) Nr.11/12,  
S.6-9
- /8/ Ramachandran, G.: Relation entre les grinnells et la  
resistance au feu  
R.G.S. 22 (1983) S.46,49-50

- /9/ Boyd, H. : Retrofitting for firesafety and energy conservation  
Fire Journal 77 (1983) Nr.2, S.68-70
- /10/ McGahan, C. : Groups join to protect tank farm  
Fire Service Today 50 (1983) Nr.9,  
S.22-23
- /11/ Domecq, L. : Extinction automatique a eau - les normes  
Face au Risque (1983) Nr.197, S.27,29
- /12/ Sprinklerung von Tiefgaragen: ja oder  
nein?  
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung 38  
(1984) Nr.5, S.146-147
- /13/ Decovic, J. (Titel serbokroatisch) Stationäre Lösch-  
Lebeda, I. : anlagen  
Suvremeno vatrogastvo (1984) Nr.1-2,  
S.10-16
- /14/ Lundsgaard, H. : (Titel dänisch) Amtliche Bestimmungen  
bezüglich Sprinkleranlagen  
Brandvaern 10 (1984) Nr.5, S.23-26
- /15/ Rasmussen, S, : (Titel dänisch) 222 Brände mit Sachschäden  
von mehr als 1 Mio DKr in 1983  
Brandvaern 10 (1984) Nr.6, S.12-18
- /16/ Neuenschwander, H.: Vertrauen ist gut - kontrollieren besser.  
Wartung und Instandhaltung von Sprinkler-  
anlagen  
BVD/SPI Bulletin (1984) Nr.1/2, S.18-21
- /17/ Usemann, K.W. : Brandschutz und Haustechnik  
Schadenprisma 13 (1984) Nr.4, S.63-68

- /18/ Kincaide, D.W. : Inspection by private industry assists  
Memphis fire department  
Fire Journal 78 (1984) Nr.6, S.82-83
- /19/ Sotis, L.P. : Plan today, built for tomorrow  
Record 61 (1984) Nr.3, S.3-9
- /20/ Blessing, G. : Maintaining a water supply  
Record 61 (1984) Nr.3, S.10-13
- /21/ Baker, D.R. : Speculative high-rise dilemma: fully  
sprinklered or hydraulic fire alarm  
SFPE Technology Report 84/6 (1984), 16 S.
- /22/ Ward, R. : Fire protection of computers  
Fire Prevention (1984) Nr.173, S.27-31
- /23/ Crez, A. : La securite incendie au 'Brussels  
Sheraton Hotel'  
Revue Belge du Feu (1984) Nr.73,  
S.36-37,39-44
- /24/ Petersen, K. : (Titel dänisch) Unfall mit Salzsäure auf  
dem Storebaelt  
Brandvaern 10 (1984) Nr.4, S.7-9
- /25/ Platt, S. : Should regulations further encourage the  
use of sprinklers?  
Fire Surveyor 14 (1985) Nr.1, S.10-13
- /26/ Lavelle, L.G. : How fire protection was considered for  
Melbourne's transit system  
Fire 78 (1985) Nr.960, S.25-26



- /27/ Public apathy blamed for fire dangers  
in United States  
Fire Protection 44 (1981) Nr.528,  
S.15-16,18-19
- /28/ Cote, A. E. : Fifty editions of NFPA 13  
Fire Journal 77 (1983) Nr.3, S.36-38,  
124-126
- /29/ Wäspe, W. : Brandschutz nach Maß. Am Beispiel Palais  
des Expositions et des Congres  
Schweizer Ingenieur und Architekt 104  
(1986) Nr.21, S.517-520
- /30/ Cassee, C. F. : (Titel niederländisch) Sprinklersysteme  
und Rauchventilation  
TVVL-Vortragsveranstaltung Brandverhütung  
Brandschutz  
NFPA-Bulletin (1986) Nr.68, S.28-30
- /31/ Williamson, D. Latest technology goes into fire  
Young, M. : protection of Parliament House  
Fire Engineers Journal 46 (1986) Nr.140,  
S.16-19
- /32/ Foletti, A. : Impianti sprinkler quali dispositivi di  
protezione per le persone  
BVD/SPI Bulletin (1985) Nr.3, S.10-13
- /33/ Sanz Septien, M. : (Titel spanisch) Brandsicherheit in  
Krankenhäusern  
Mapfre Seguridad (1987) Nr.27, S.19-26
- /34/ Keeping fire under control at Ind Coope  
Fire Prevention (1987) Nr.198, Nr.15-18

- /35/ Isenburg, W. : Großbrände können vermieden werden  
Krankenhaus Technik. Sonderdruck  
(1986) Nr.3, 3S.
- /36/ Property conservation - what's it to you?  
Construction. Protection. Occupancy.  
To err is human  
Record 64 (1987) Nr.2, S.3-27
- /37/ Design considerations inthe protection of  
buildings from fire  
Fire and Security Protection 50 (1987)  
Nr.596, S.7-13
- /38/ Fire in rack storage overpowers sprinkler  
system  
Fire Journal 76 (1982) Nr.2, S.67
- /39/ Bamert, E. : Explosion und Folgebrand in einer  
Spanplattenfabrik  
BVD/SPI Bulletin (1982) Nr.1, S.7-9
- /40/ Laughlin, J. : 17 buildings destroyed, 9 damaged by Linn,  
Mass., conflagration  
Fire Engineering 135 (1981) Nr.1, S.22-26
- /41/ 85 lives lost in fire at MGM Grand Hotel,  
Las Vegas  
Fire Prevention (1982) Nr.150, S.37-44
- /42/ Fire at the MGM Grand  
Fire Journal 76 (1982) Nr.1, S.19-20,  
22-24, 34-37

- /43/ Bell, J.R. : Investigation report of the fire at  
Stouffer's inn of Westchester  
Fire Journal 76 (1982) Nr.3, S.37-41,  
44-49,52-54
- /44/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 76 (1982) Nr.6, S.27-30
- /45/ Arbogast, K. : Stairs collapse, injure four at furniture  
warehouse fire  
Fire Engineering 135 (1982) Nr.6, S.24-26
- /46/ Feuer im Modehaus - Schadenbild Nr.14  
Schadenbilder Aktuell (1983) Nr.1, S.2-9
- /47/ (Titel holländisch) Brände in Gebäuden,  
die durch Sprinkleranlagen geschützt sind  
weisen weitaus weniger Todesfälle auf  
NBPI Bulletin 51 (1983) S.12-16
- /48/ : Three die in Texasnursing home fire  
Fire Journal 77 (1983) Nr.4, S.32-33,40
- /49/ Richardson, A. : Rapid knockdown  
Fire Engineering 136 (1983) Nr.5, S.70
- /50/ Ostendorf, K. : Großbrand in einem Kunststoffwerk  
Der Feuerwehrmann 34 (1984) Nr.9,  
S.246-248
- /51/ Johanson, H.H. : (Titel dänisch) Zusätzliche Sicherheits-  
vorkehrungen für Strohverbrennungsanlage  
nach Brand  
Brandvaern 10 (1984) Nr.7, S.12-14

- /52/ Marschalk, H.E. : Sprinklers prove worth  
Maryland Fire and Rescue Bulletin 13  
(1984) Nr.4, S.3
- /53/ McAnulty, F.A. : In Philadelphia -confining a conflagration  
Fire Command 51 (1984) Nr.7, S.26-31
- /54/ Bulgakov, A. : (Titel russisch) Großbrand in einer  
Reifenfabrik  
Pozarnoe delo (1984) Nr.10, S.22-23
- /55/ Best, R. : Dollar 15 Million fire in Denver shopping  
center destroys 13 stores  
Fire Journal 78 (1984) Nr.3, S.38-41,115
- /56/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 76 (1982) Nr.6, S.27-31
- /57/ Timoney, T. : Two patients die in Arkansas nursing  
home fire  
Fire Journal 78 (1984) Nr.6, S.60-62,  
65-70,73
- /58/ Corbett, G.P. : Carelessness caused \$ 10 million New  
Jersey fire  
Fire Engineering 138 (1985) Nr.4, S.40-42
- /59/ LeBlanc, P. Large loss fire in the United States  
Redding, D. : during 1982
- /60/ Massive building fire largest US loss  
Fire Prevention (1986) Nr.188, S.46-48
- /61/ Butterworth,L.A.: Five alarm fires taxis Maryland fire  
fighters  
Fire Command 54 (1987) Nr.5,S.32-33,36-37

- /62/ Steenbock, J.           Zwei verletzte Feuerwehrleute bei Groß-  
Wienandt, J.C.       : feuer in einem Betonsteinwerk  
Die Feuerwehr 37 (1987) Nr.10, S.308-309
- /63/ Burns, R.            : Not enough water, so fire guts  
1.2-million-square-food warehouse  
Fire Engineering 135 (1982) Nr.8, S.64,  
69-70,72
- /64/ Best, R.             : Dollar 100 Million fire in K Mart  
distribution center  
Fire Journal 77 (1983) Nr.2, S.36-42,80
- /65/ Aresu de Seui,H.: K Mart distribution center  
etat de Pennsylvania (USA)  
Revue Belge du Feu (1983) Nr.66, S.17-19
- /66/                     Warehouse storage  
Record 60 (1983) Nr.4, S.3-10
- /67/ Bylinkin, V.         (Titel russisch) Brandschutz in mechani-  
u. a.                 : sierten Hochregallägern  
Pozarnoe delo (1984) Nr.2, S.20-21
- /68/                     L'interet des sprinklers  
Face au Risque (1984) Nr.207, S.47-49
- /69/ Ward, R.B.           : The warehouse fire scandal: survey of  
large fires in sprinklered and non-  
sprinklered warehouses and storage areas  
Fire Prevention (1985) Nr.177, S.19-27
- /70/ Corbett, G.P.        : Sprinkler breakdown and occupancy storage  
contribute to New Jersey's \$ 100 million  
fire  
Fire Engineering 138 (1985) Nr.6, S.36-37

- /71/ Best, R. : Demolition exposure fire causes over  
90 Mio \$ loss to Mineapolis bank  
Fire Journal77 (1983) Nr.4, S60-64,  
68-73,76
- /72/ Mönch, W. : Berliner Feuerwehr: Erste Branderfahrungen  
mit Regallagern  
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung 36  
(1982) Nr.3, S.83-84
- /73/ Ryderman, A. (Titel schwedisch) Brandrisiken in Lager-  
Tuovinen, H. : hallen  
Forsch.-Bericht der Statens Provnings-  
anstalt, Boras (1986), SP-RAPP 1986:04
- /74/ Isner, M.S. : 32 million dollar loss at Shervin-  
Williams warehouse fire  
Fire Command 54 (1987) Nr.8, S.30-33
- /75/ Hübner, H. Rauch- und Wärmeabzugsanlagen - eine  
Kühl, P. kritische Betrachtung  
Martin, K. : Der Maschinenschaden 56 (1983) Nr.2,  
S.57-61
- /76/ Edwards, J. : Caution urged in approach to future fire  
regulations for atrium buildings  
Fire 78 (1985) Nr.961, S.37,51
- /77/ Fire precautions at the Drummond Centre  
Fire Prevention (1987) Nr.200, S.29-31
- /78/ Other reports: paper tissue manufactures  
Fire Prevention (1982) Nr.155, S.48
- /79/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 77 (1983) Nr.6, S.9-12

- /80/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 76 (1982) Nr.3, S.21-22,  
24-25
- /81/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 78 (1984) Nr.6, S.10,12-14
- /82/ Bimonthly fire record  
Fire Journal 77 (1983) Nr.4, S.27-30
- /83/ Concern over warehouse fires leads to  
tests on aerosols  
Fire 73 (1981) Nr.907, S.410-412
- /84/ Protecting for rack storage  
Record 56 (1979) Nr.2, S.15-19
- /85/ Woodward, C.D. : Vorbeugende Maßnahmen gegen Brandgefahren  
in Krankenhäusern und Pflegeheimen  
Vorbeugender Brandschutz 7 (1988) Nr.1,  
S.19-23
- /86/ Feuer in geschlossenen Stahlkonstruktions-  
Parkhäusern  
Der Maschinenschaden 61 (1988) Nr.3,  
S.138-140
- /87/ Mattingly, T.A. : Sprinklers prove worth again  
Maryland Fire and Rescue Bulletin 13  
(1984) Nr.9, S.7
- /88/ Smith, T. : Life safety technology programs of the  
U.S. fire administration  
The International Fire Chief Apr.(1985)  
S.14-16

- /89/ Reinhardt, V.           Sprühwasser-Feuerlöschanlagen  
Schulze, G.               : Unser Brandschutz 34 (1984) Nr.2, S.23-24
- /90/ Bendig, L.             : Tropfengrößenanalyse an Zerstäubungsdüsen  
Firmenschrift der Firma Lechler  
Metzingen 1988
- /91/                        Der Phasen/Doppler-Teilchenanalysator in  
der Tropfengröße-Analyse  
Firmenschrift der Firma Lechler  
AE 3/7 .87-D  
Metzingen 1987
- /92/ Schatz, H.            : Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen  
Teil 9: Messung und Simulation der  
Wasserbeaufschlagung - Flüssigkeits-  
verteilungen - Bestimmung von Tropf-  
fengrößen  
Forschungsbericht Nr. 82 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer. Arbeitskreis V -  
Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brand-  
schutztechnik (1992)
- /93/ Kunkelmann, J.        : Brandausbreitung bei verschiedenen  
Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung  
gestapelt sind.  
Teil 9: Simulation der Wasserbeauf-  
schlagung eines Sprinklers.  
Forschungsbericht Nr. 83 der Arbeits-  
gemeinschaft der Innenministerien der  
Bundesländer. Arbeitskreis V -  
Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.  
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brand-  
schutztechnik (1992)



## 7. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1 . Anzahl der aus einem Sprinkler austretenden Wassertropfen in Abhängigkeit vom Sprinklertyp, Druck und Radius.

Sprinkler Typ	Volumenstrom l/min	Druck Pa $10^5$	Meßpunkt Höhe 1,5 m Radius mm	Tropfendurchmesser einzel mm	Tropfendurchmesser Mittelwert mm	Tropfenanzahl einzel	Tropfenanzahl Mittelwert
B	60	0,5	0	0,71	0,9	3161	574
			600	0,79		2719	
			900	0,85		1159	
			1200	1,11		285	
			1600	0,86		118	
			2000	1,03		65	
B	176	5,0	0	0,34	0,37	13301	11308
			600	0,35		36601	
			1200	0,37		14298	
			1600	0,42		7444	
			2000	0,56		889	
C	109	0,5	0	0,65	1,18	1892	881
			600	0,34		1615	
			1200	1,06		1319	
			2000	1,43		226	
C	326	5,0	0	0,40	0,53	4096	8952
			600	0,37		5872	
			1200	0,30		27968	
			2000	0,53		6293	
			2500	0,97		624	
E	155	0,5	0	1,32	1,01	3126	498
			300	0,57		6557	
			600	0,66		1929	
			900	0,76		817	
			1200	0,58		418	
			1600	0,79		160	
			2000	1,06		105	
2400	1,47		134				
E	472	5,0	0	0,63	0,45	63526	15310
			300	0,42		43871	
			600	0,29		70734	
			900	0,28		22235	
			1200	0,42		52619	
			1500	0,38		9841	
			1800	0,49		7157	
			2100	0,55		6185	
2500	0,80		640				

Fortsetzung Tabelle 1.

F	61	0,5	0	0,92	1,25	243	156
			600	0,35		314	
			1200	0,47		268	
			1500	0,72		183	
			1800	0,93		122	
			2200	1,13		68	
			2500	1,90		96	
F	180	5,0	0	0,47	0,35	2345	10525
			600	0,37		1454	
			1200	0,41		1923	
			1500	0,43		1926	
			1800	0,35		9033	
			2100	0,32		14258	
			2400	0,33		27917	
			2500	0,36		21449	

Tabelle 2. Ansprechzeiten der Brandmelder und Sprinkler.

Sprinkler Typ	Anzahl	Brandlast	Auslösezeit Brandmelder		Auslösezeit Sprinkler				
			Ion.	opt.	S0	S1	S2	S3	S4
			min:s		min:s				
F	1	PS 5	0:39	2:04	6:32	=	=	=	=
E	1	PS 5	0:09	1:27	6:25	=	=	=	=
E	1	HW 5	0:18	2:24	6:37	=	=	=	=
F	4	PS 5	0:48	1:36	=	-	-	6:56	7:00
F	4	HW 5	0:24	1:54	=	-	-	8:00	-
F	4	PS 3	1:48	1:36	=	8:24	8:06	6:52	-
F	4	HW 3	1:43	2:40	=	-	-	8:30	-

= nicht vorhanden  
 - nicht ausgelöst

Tabelle 3. Temperaturen beim Auslösen der Sprinkler

Sprinkler		Brandlast	Temperaturen in °C				
Typ	Anzahl		T S0	T S1	T S2	T S3	T S4
F	1	PS 5	165	(117)	def.	(120)	(153)
E	1	PS 5	79	(93)	(96)	(120)	(132)
E	1	HW 5	78	(95)	(96)	(120)	(117)
F	4	PS 5	(165) (165)	(135) (135)	(134) (134)	151 ( / )	(177) 177
F	4	HW 5	(111)	(109)	(109)	135	(128)
F	4	PS 3	(124) (43) (38)	(132) (132) 108	(138) 150 ( / )	131 ( / ) ( / )	(167) (110) (99)
F	4	HW 3	(111)	(138)	(139)	137	(163)

( / ) Sprinkler hatte bereits ausgelöst.

Die in Klammern gesetzten Temperaturen wurden jeweils zum Zeitpunkt des Auslösens eines anderen Sprinklers gemessen.

Tabelle 4. Wassermengen in Abhängigkeit von der Brandlast und vom Sprinklertyp.

Sprinkler		Brandlast	Sprinkler ausgelöst	Volumenstrom	Wasser	Wasser in
Typ	Anzahl			Mittelwert	gesamt	den Wannen
				l/min	l	%
F	1	PS5	1 (S0)	91	342	und Strahlrohr
E	1	PS5	1 (S0)	417	3400	>95
E	1	HW5	1 (S0)	416	520	97
F	4	PS5	2 (S3, S4)	161	2447	21
F	4	HW5	1 (S3)	89	1447	20
F	4	PS3	3 (S3, S2, S1)	111	240	11
F	4	HW3	1 (S3)	79	322	15

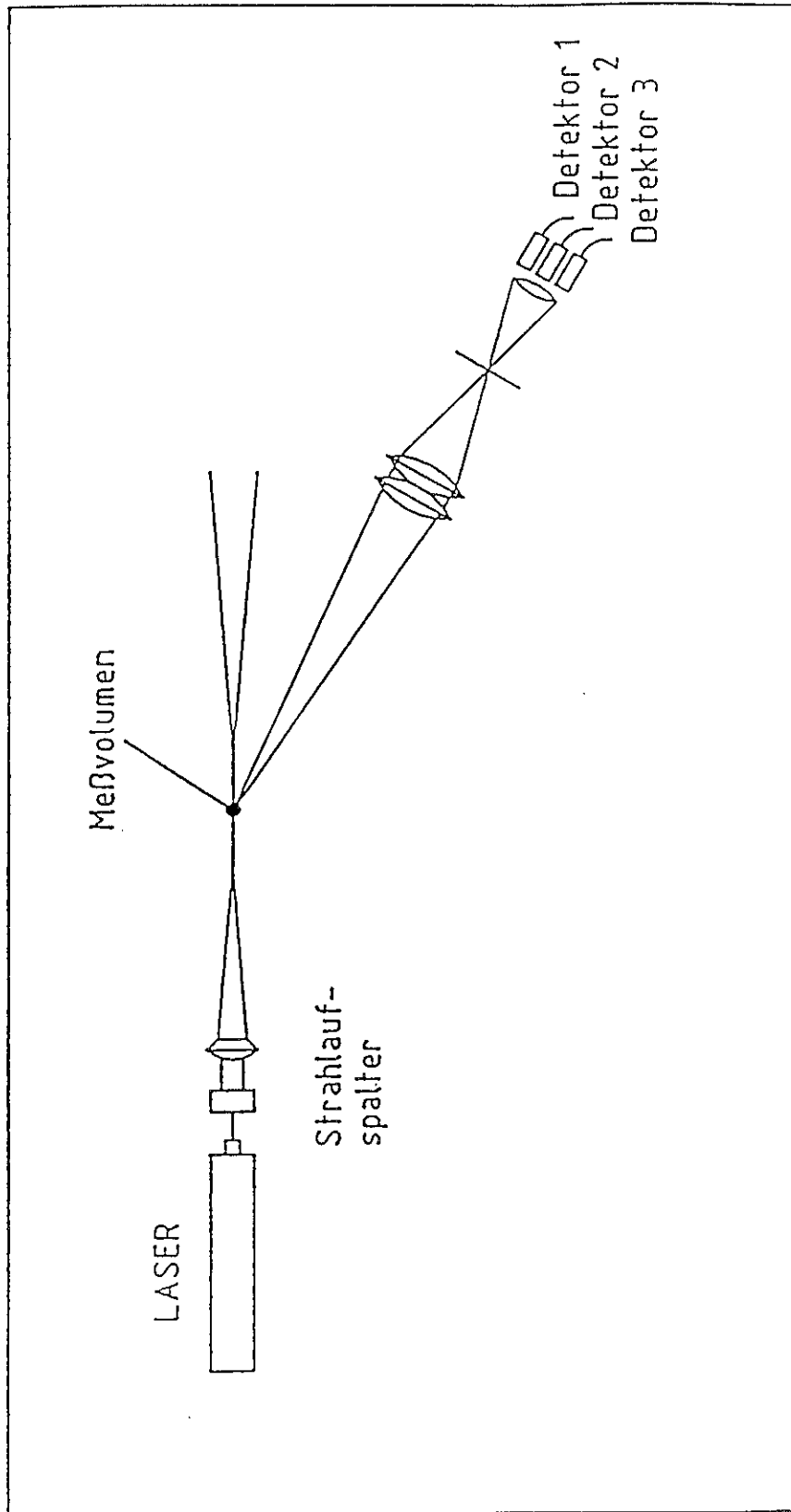
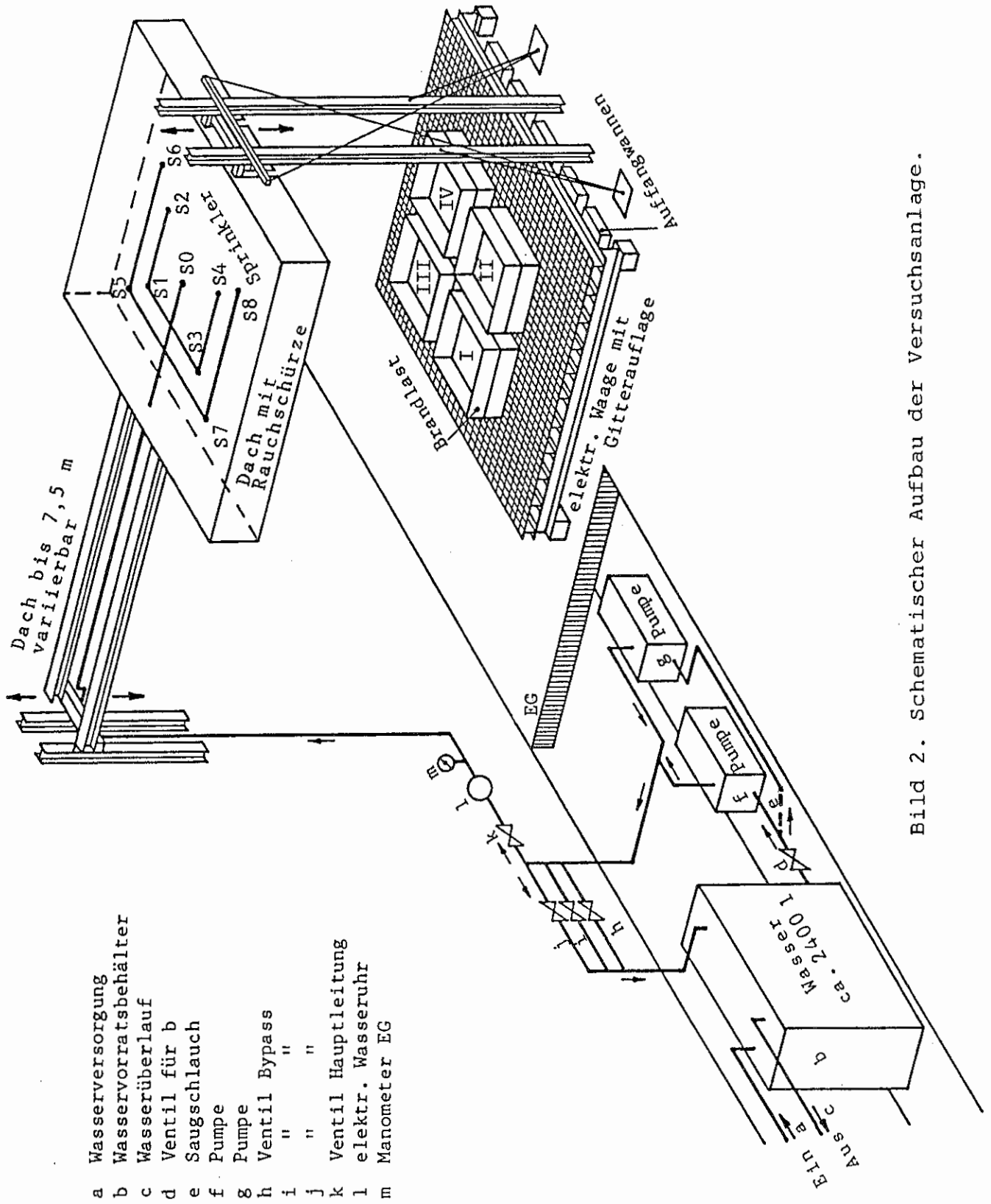


Bild 1. Aufbau der Meßanordnung des Phasen/Doppler-Teilchenanalysators /91/.



- a Wasserversorgung
- b Wasservorratsbehälter
- c Wasserüberlauf
- d Ventil für b
- e Saugschlauch
- f Pumpe
- g Pumpe
- h Ventil Bypass
- i " "
- j " "
- k Ventil Hauptleitung
- l elektr. Wasseruhr
- m Manometer EG

Bild 2. Schematischer Aufbau der Versuchsanlage.

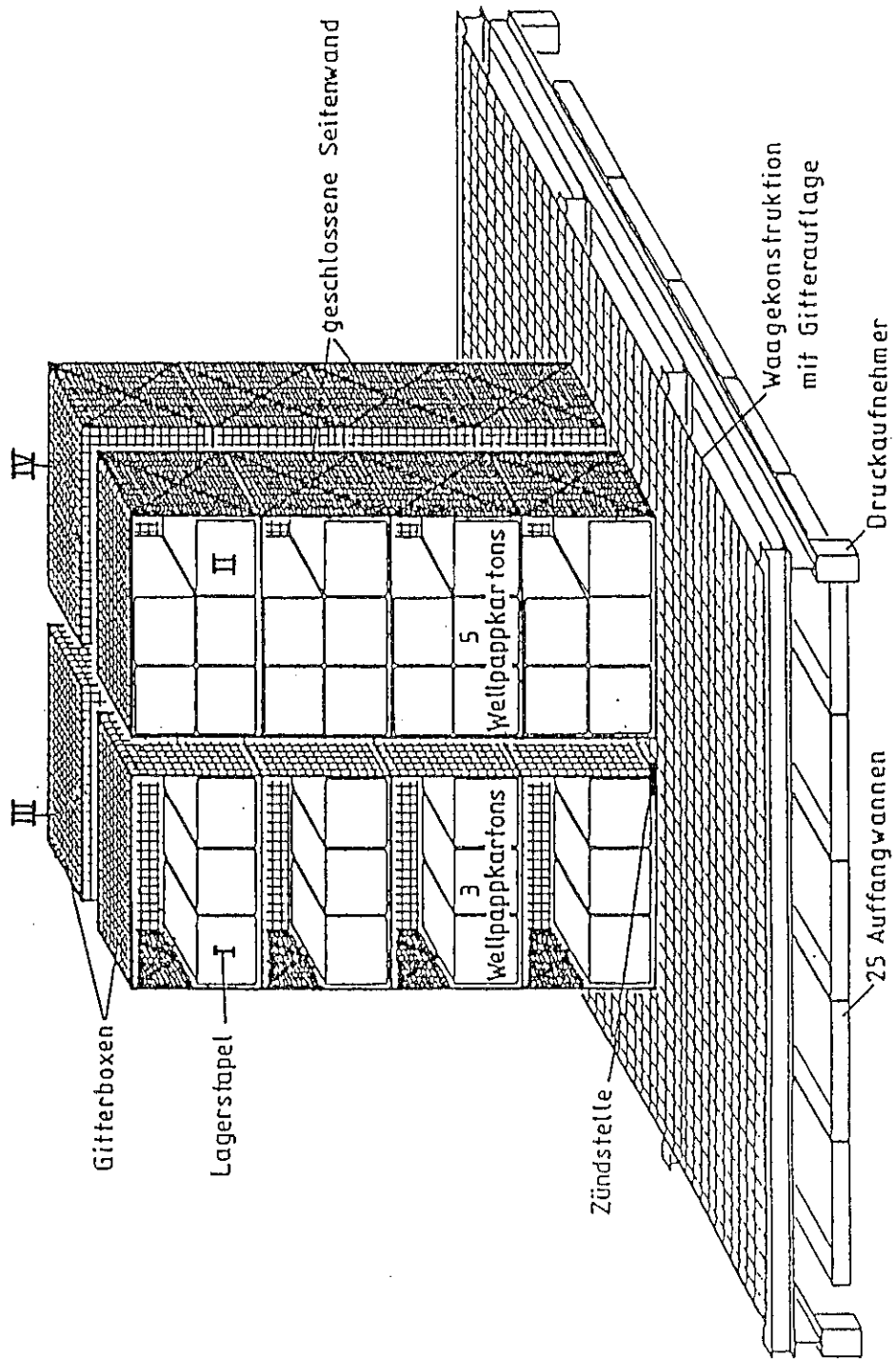


Bild 3. Anordnung der Gitterboxen auf der Waagekonstruktion.

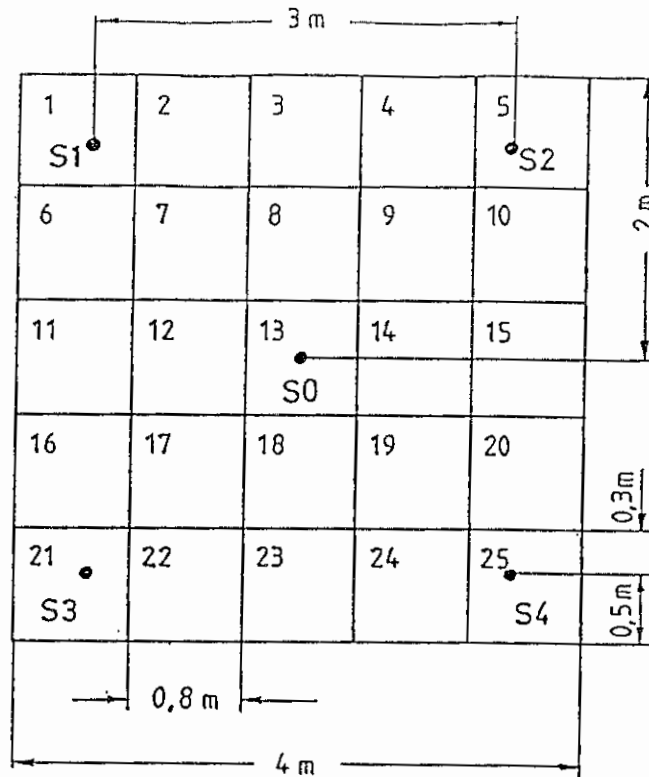


Bild 4. Meßfläche der 25 Auffangwannen und Anordnung der Sprinkler S1 bis S4.

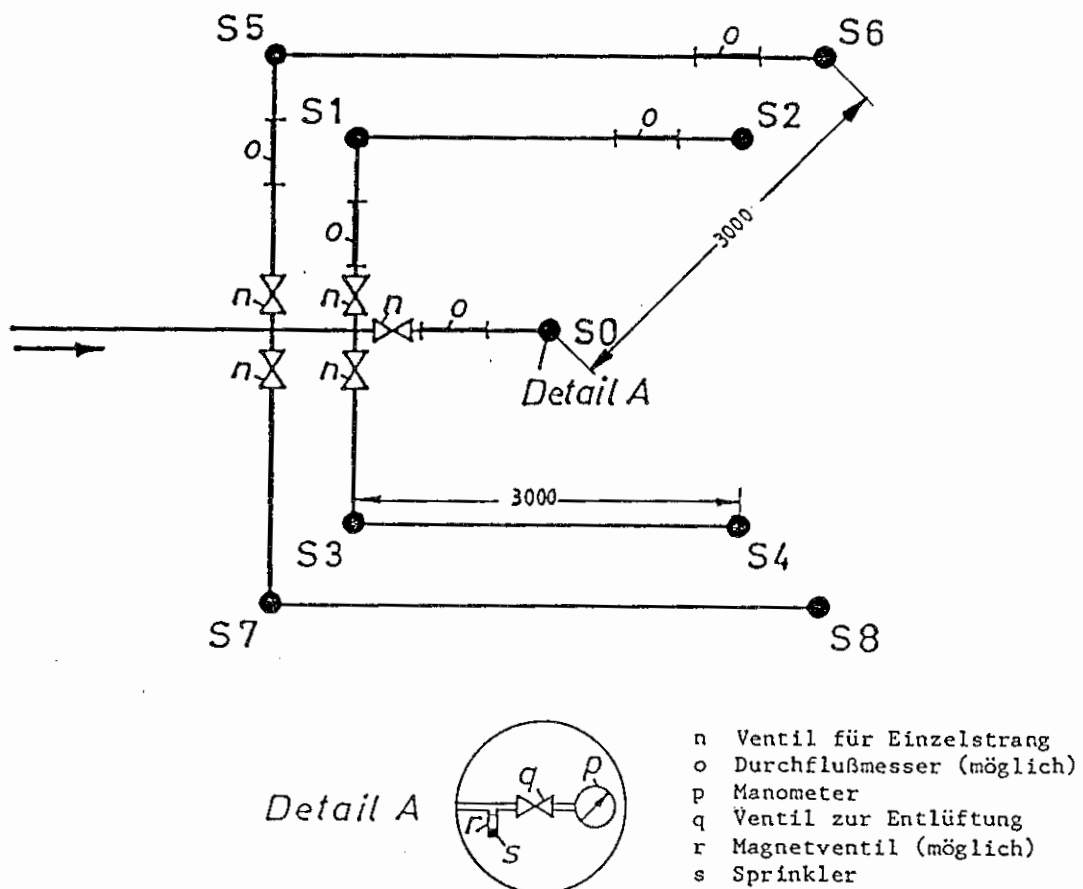
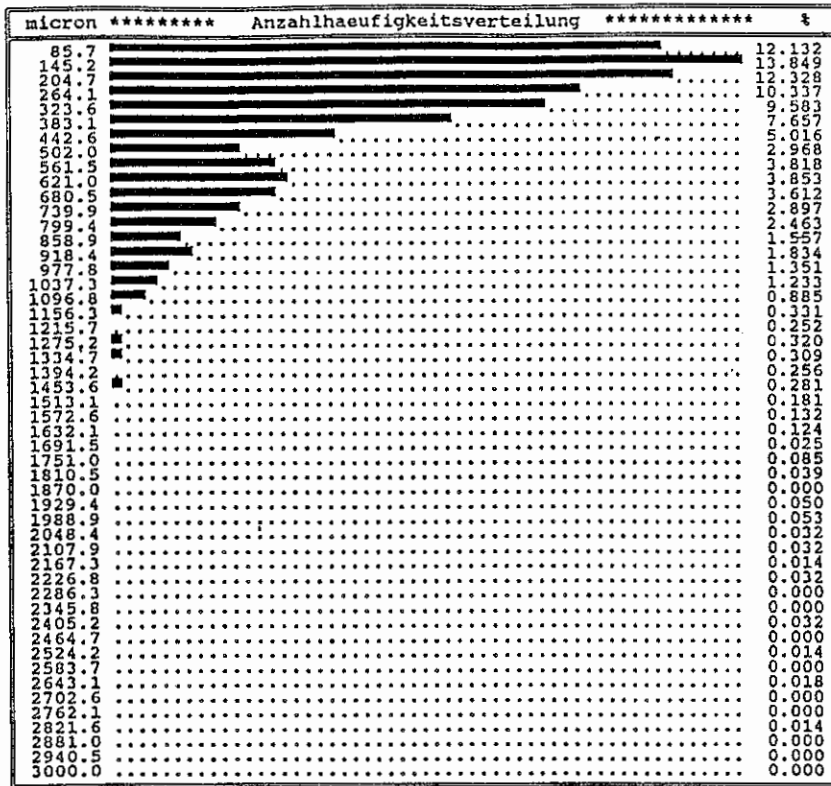
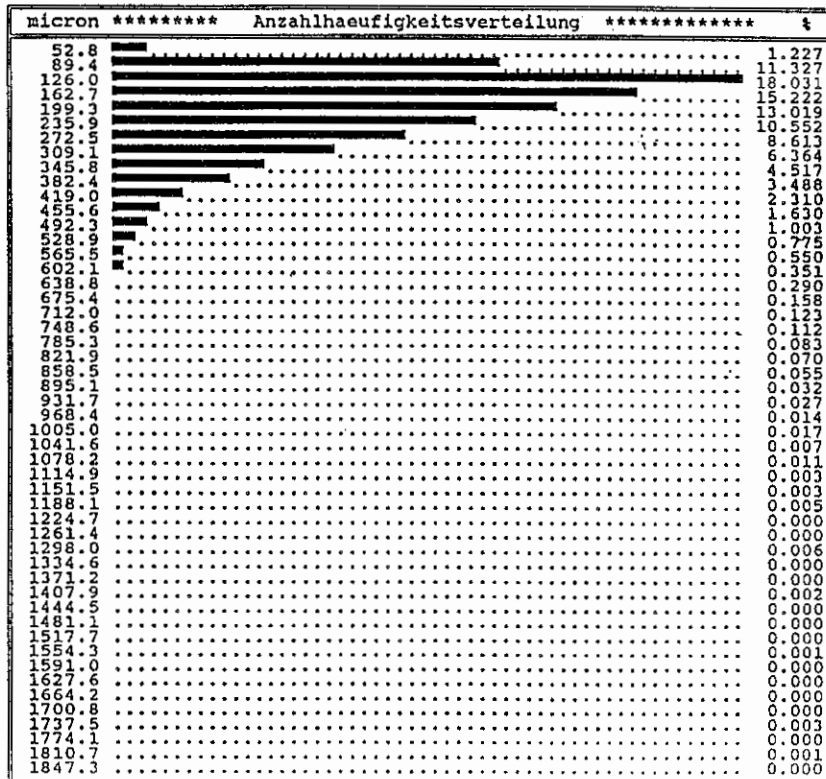


Bild 5. Mögliche Anordnung der Sprinkler S0 bis S8.



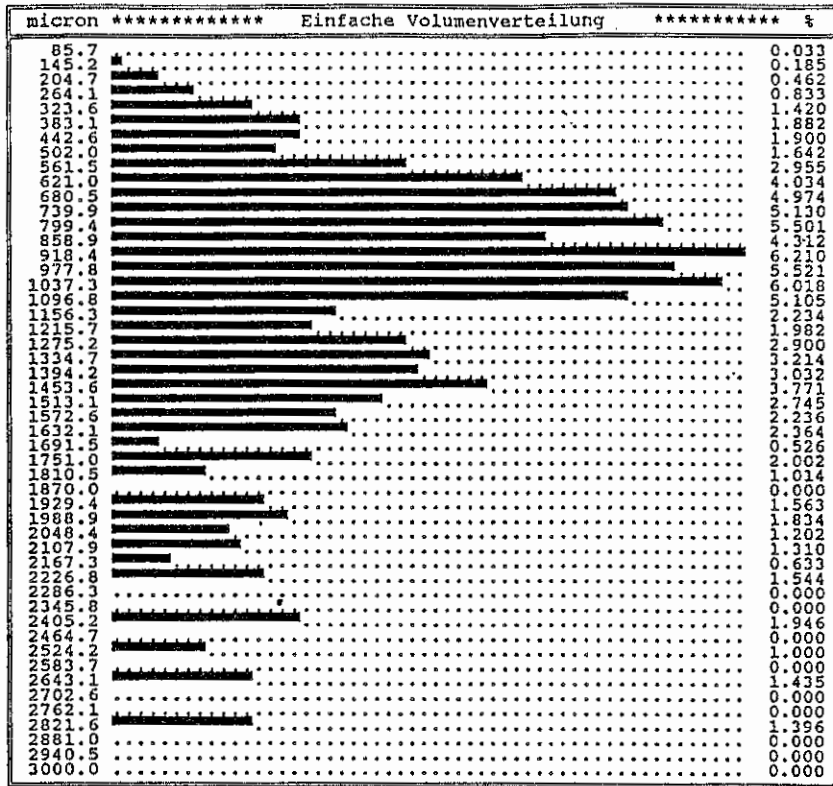
0,5 bar



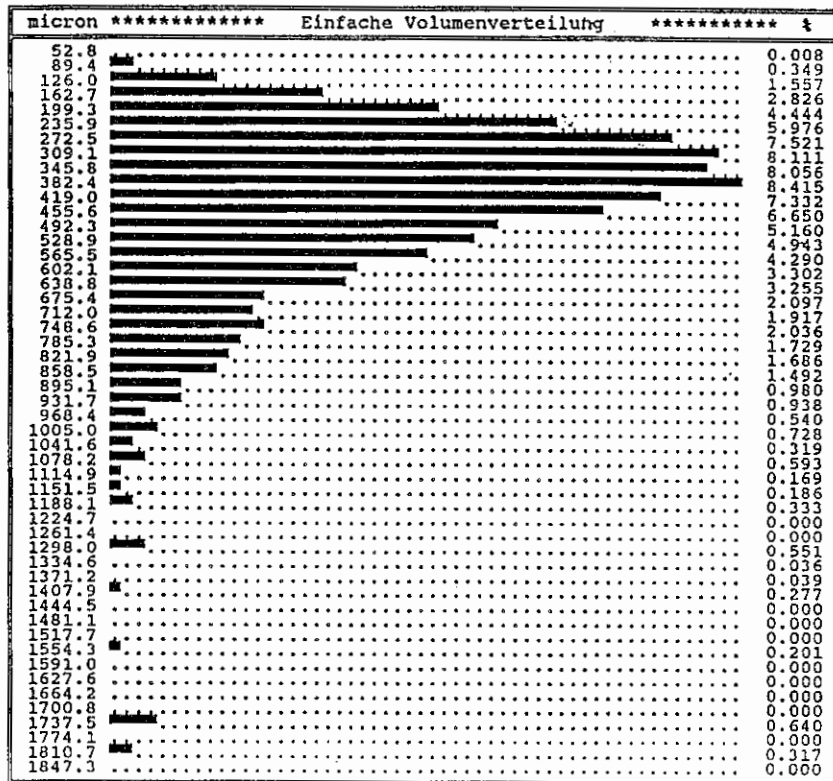
5 bar

Bild 6. Anzahlhäufigkeit für Sprinkler Typ B, Höhe 1,5 m.





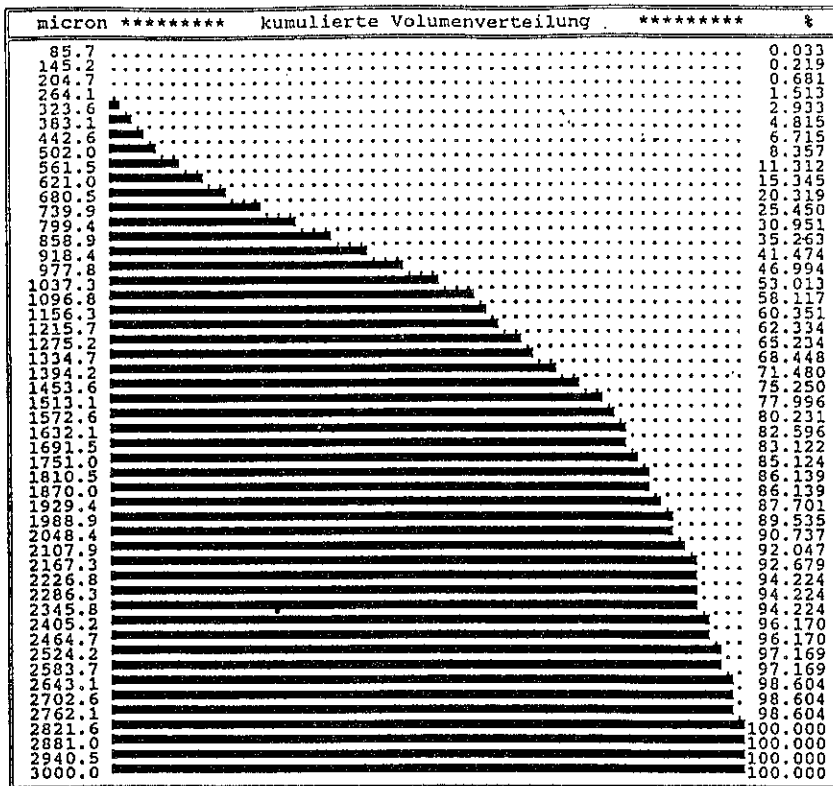
0,5 bar



5 bar

Bild 7. Einfache Volumenverteilung für Sprinkler Typ B, Höhe 1,5 m.

0,5 bar



5 bar

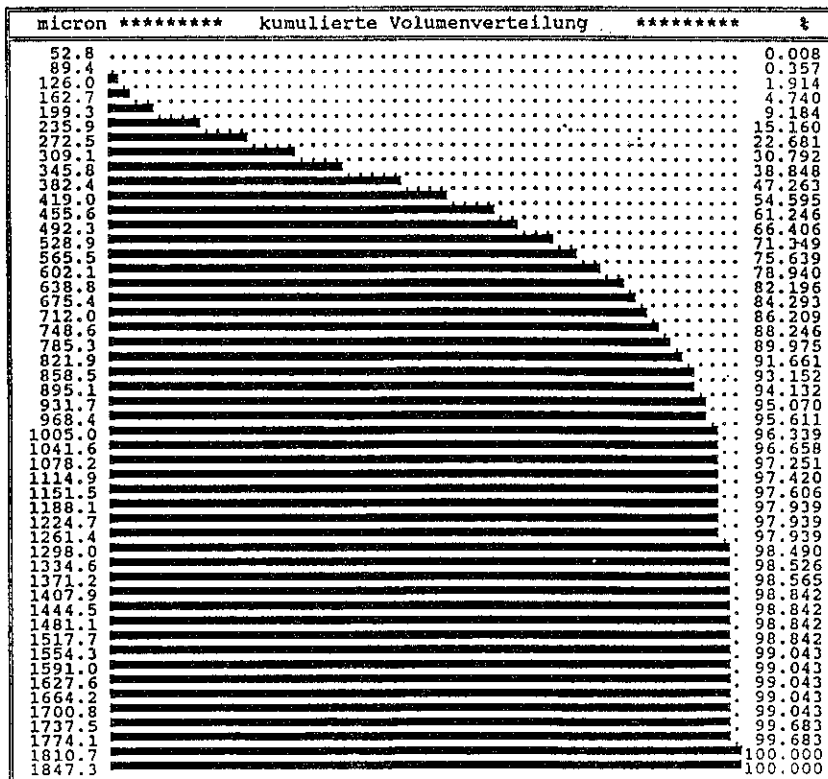
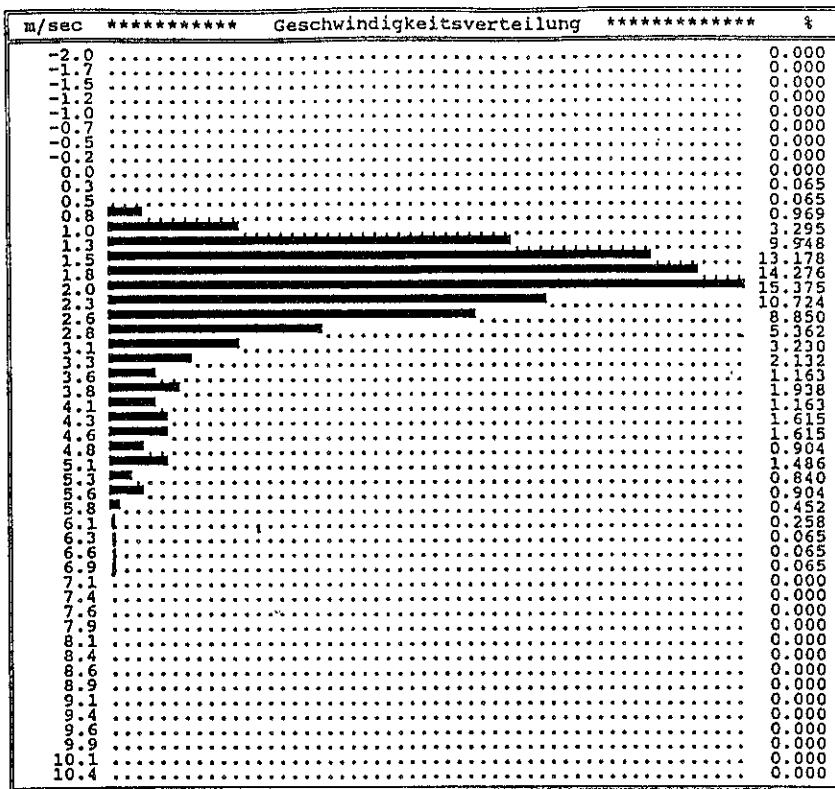
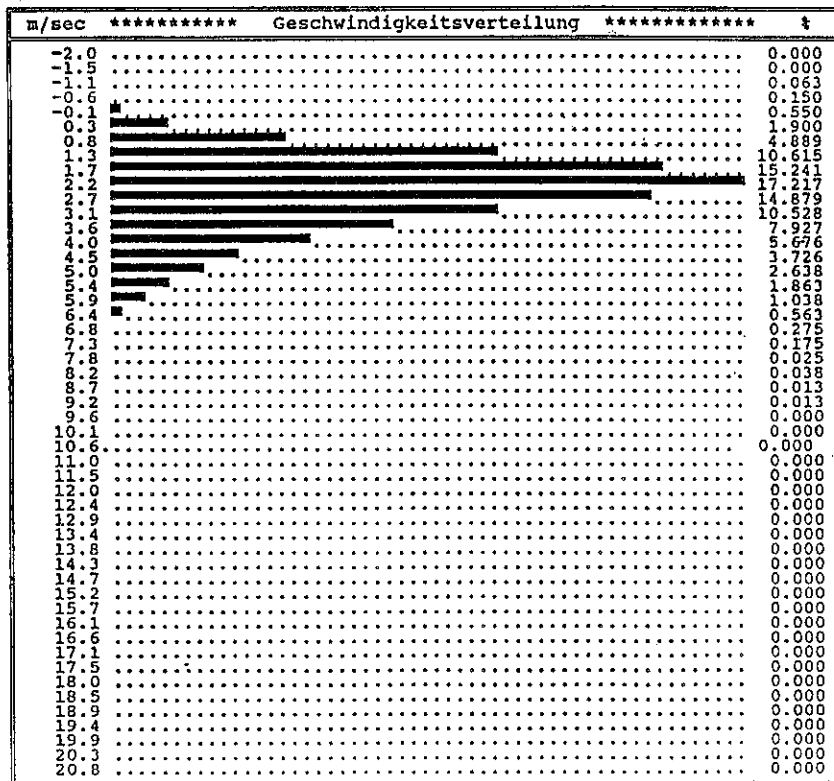


Bild 8. Kumulierte Volumenverteilung für Sprinkler Typ B, Höhe 1,5 m.

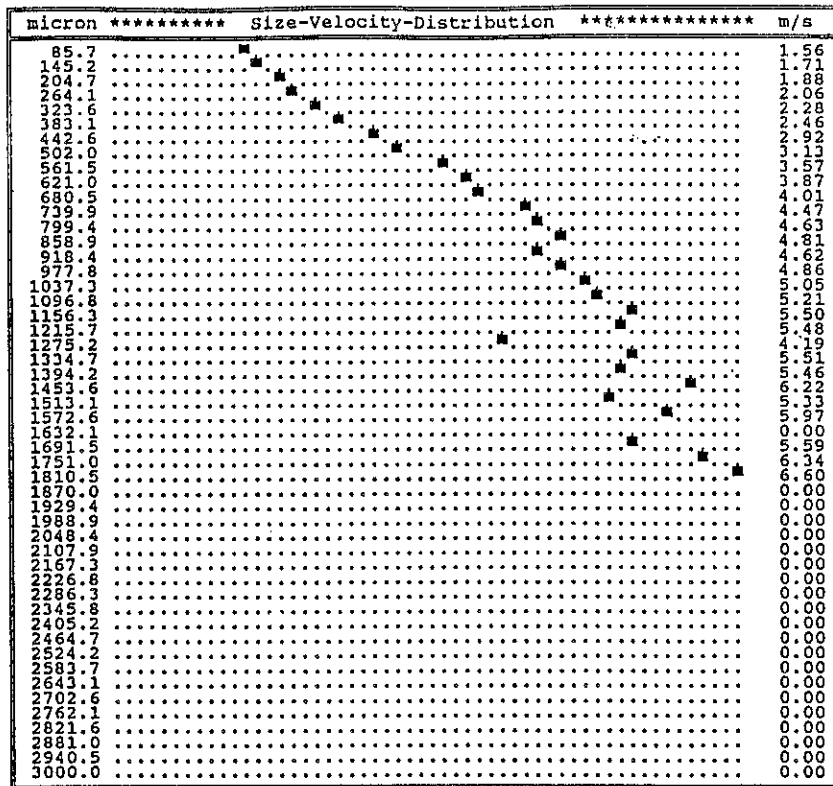


0,5 bar

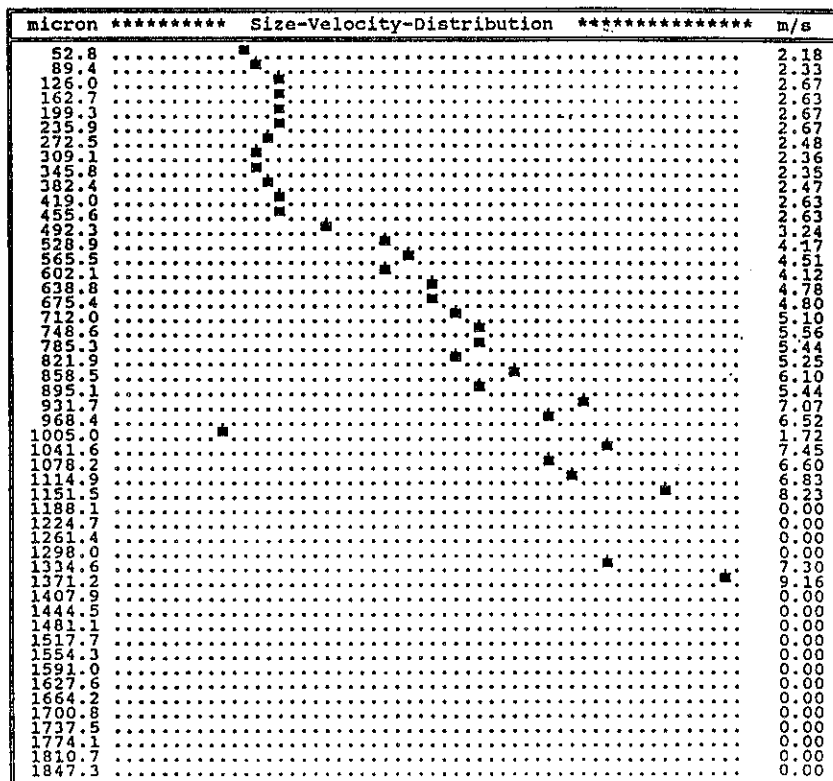


5 bar

Bild 9. Geschwindigkeitsverteilung für Sprinkler Typ B, Höhe 1,5 m.

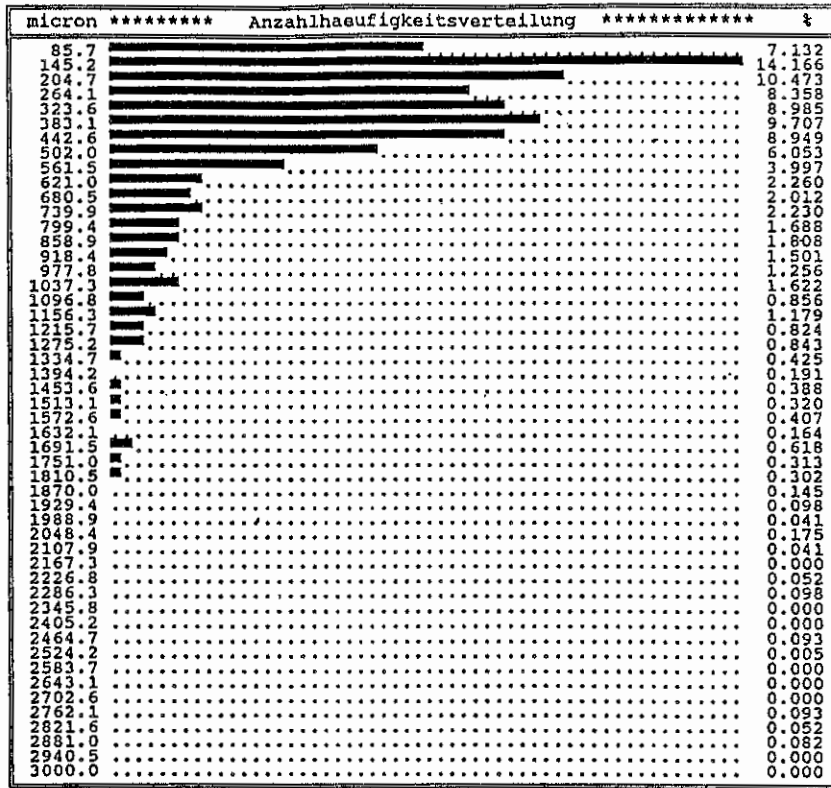


0,5 bar

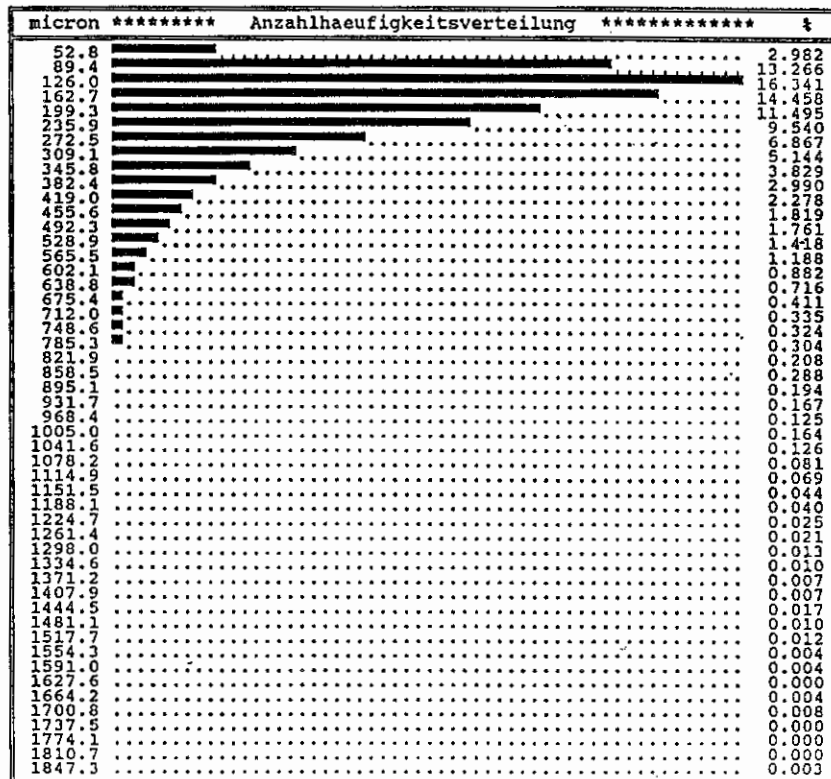


5 bar

Bild 10. Size-Velocity-Distribution für Sprinkler Typ B, Höhe 1,5 m.

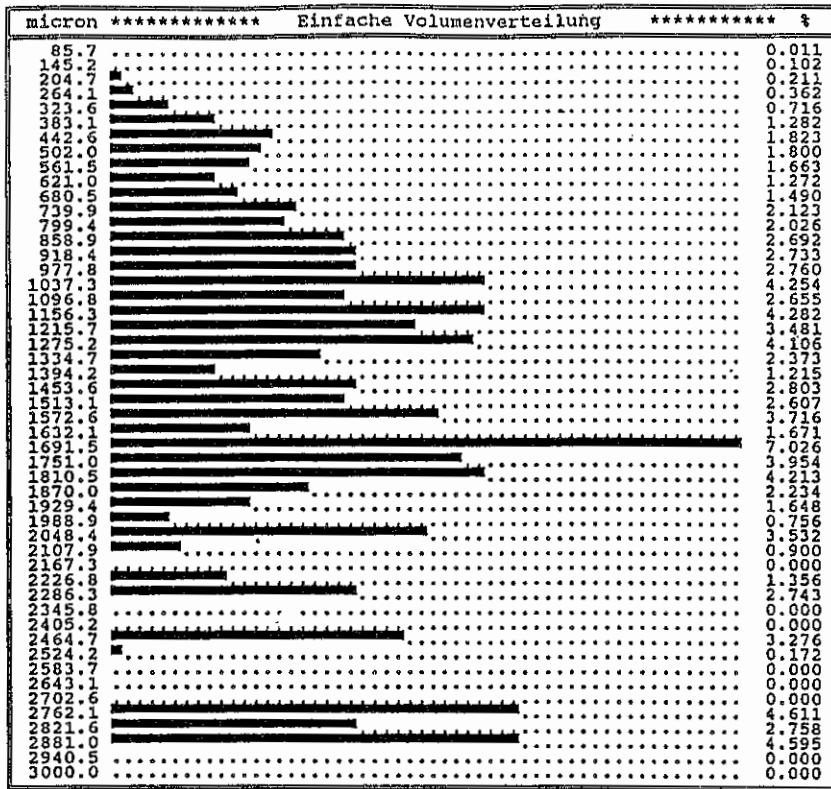


0,5 bar

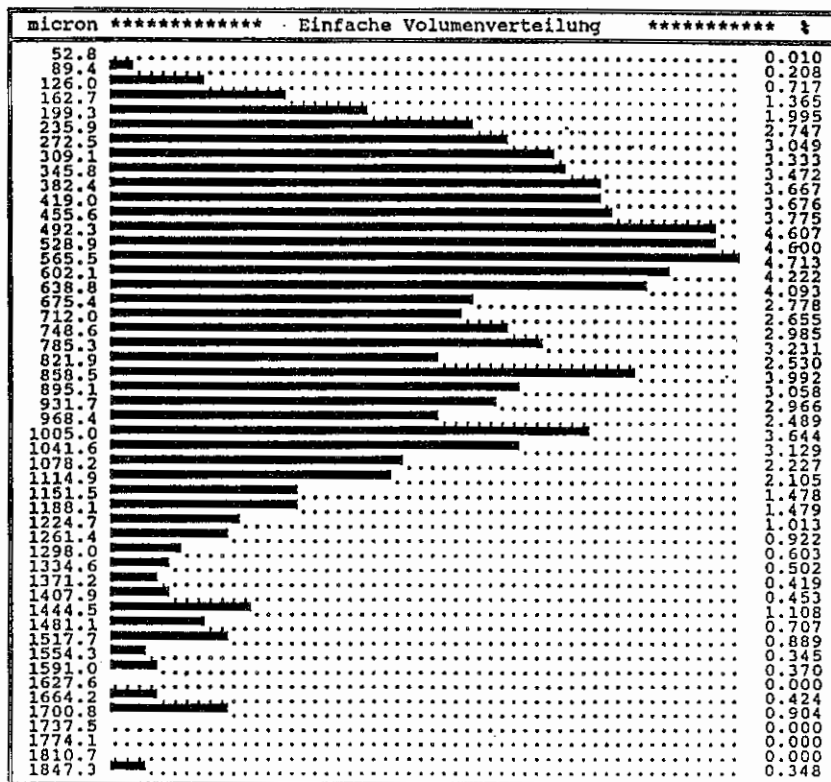


5 bar

Bild 11. Anzahlhäufigkeitsverteilung für Sprinkler Typ C, Höhe 1,5 m.

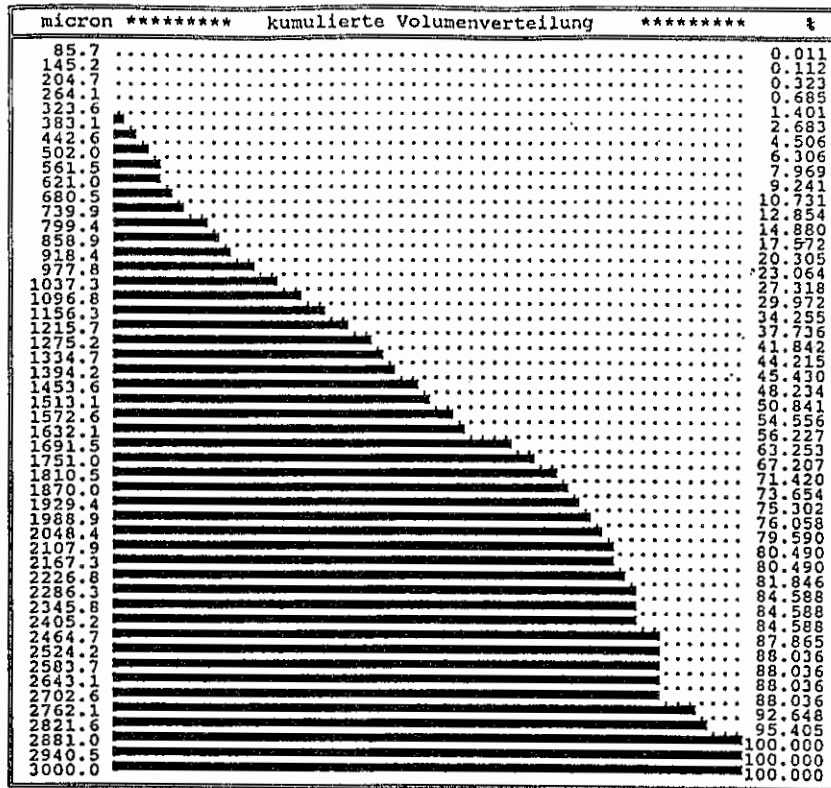


0,5 bar

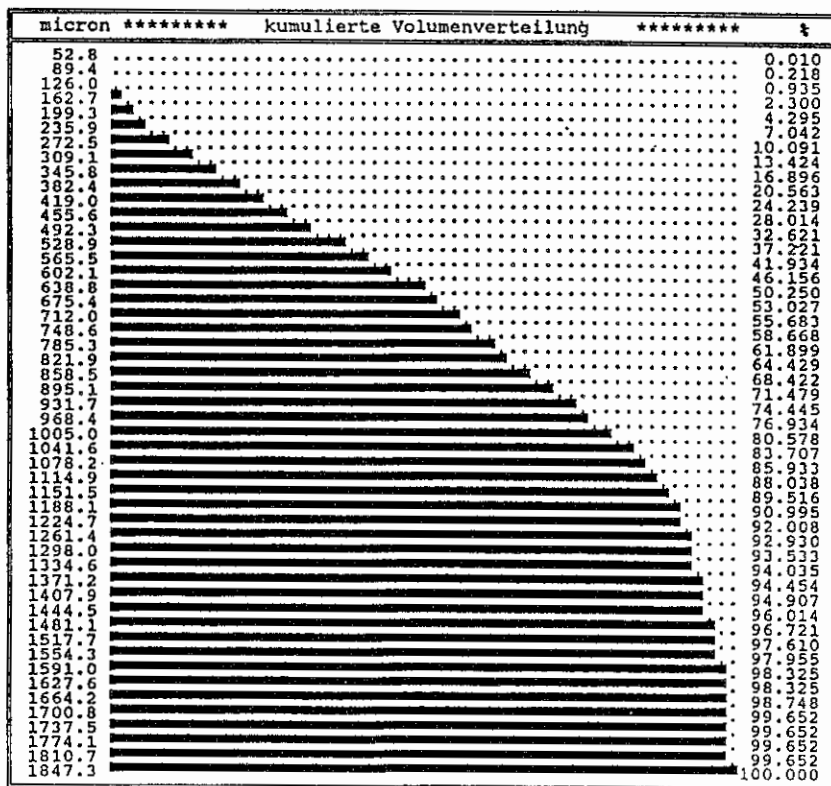


5 bar

Bild 12. Einfache Volumenverteilung für Sprinkler Typ C, Höhe 1,5 m.



0,5 bar



5 bar

Bild13. Kumulierte Volumenverteilung für Sprinkler Typ C, Höhe 1,5 m.

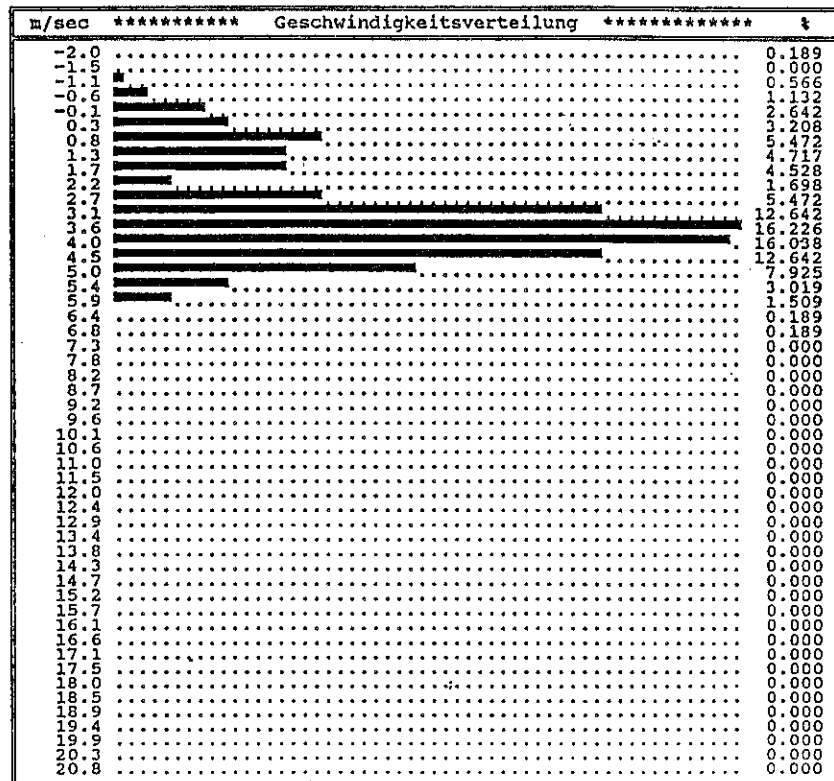
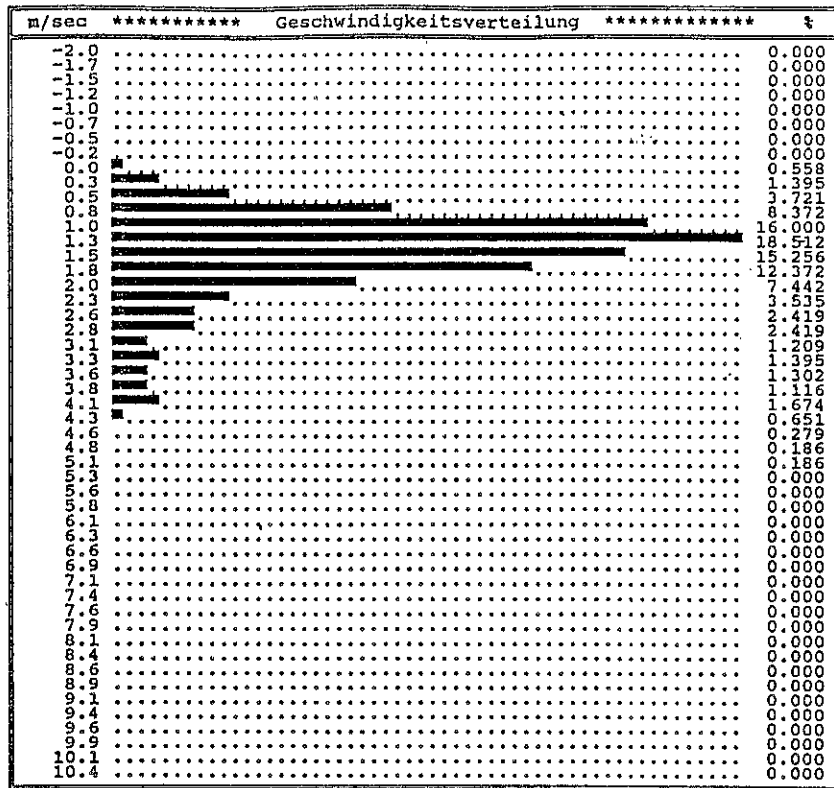
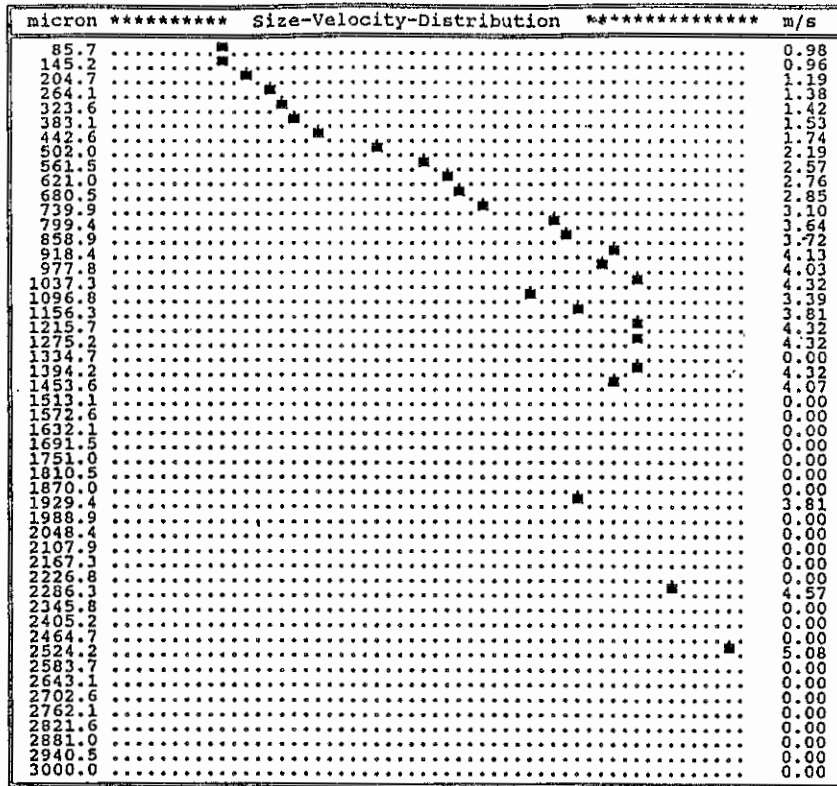
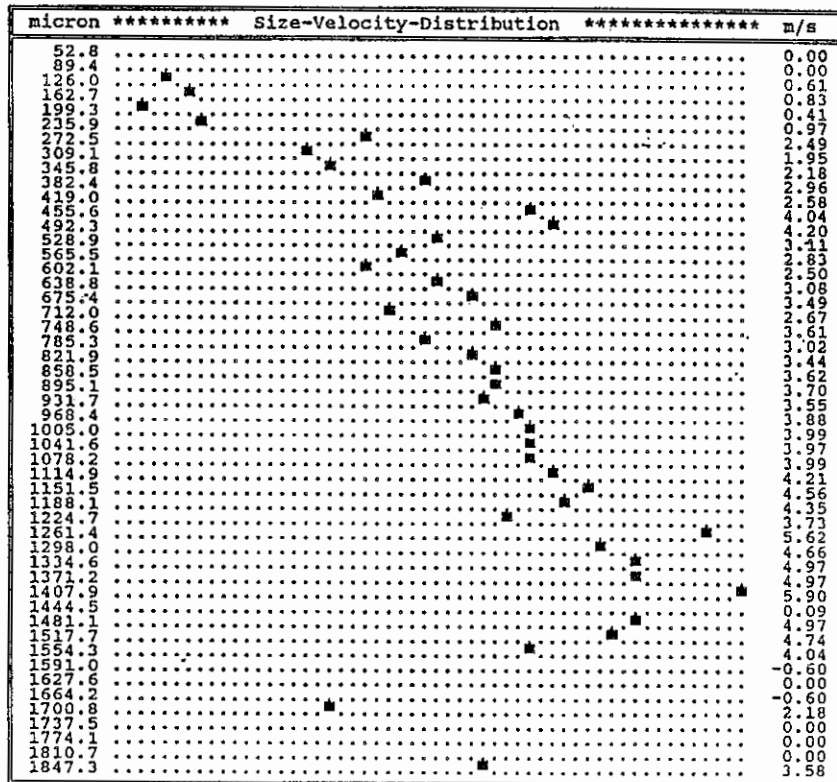


Bild 14. Geschwindigkeitsverteilung für Sprinkler Typ C, Höhe 1,5 m.



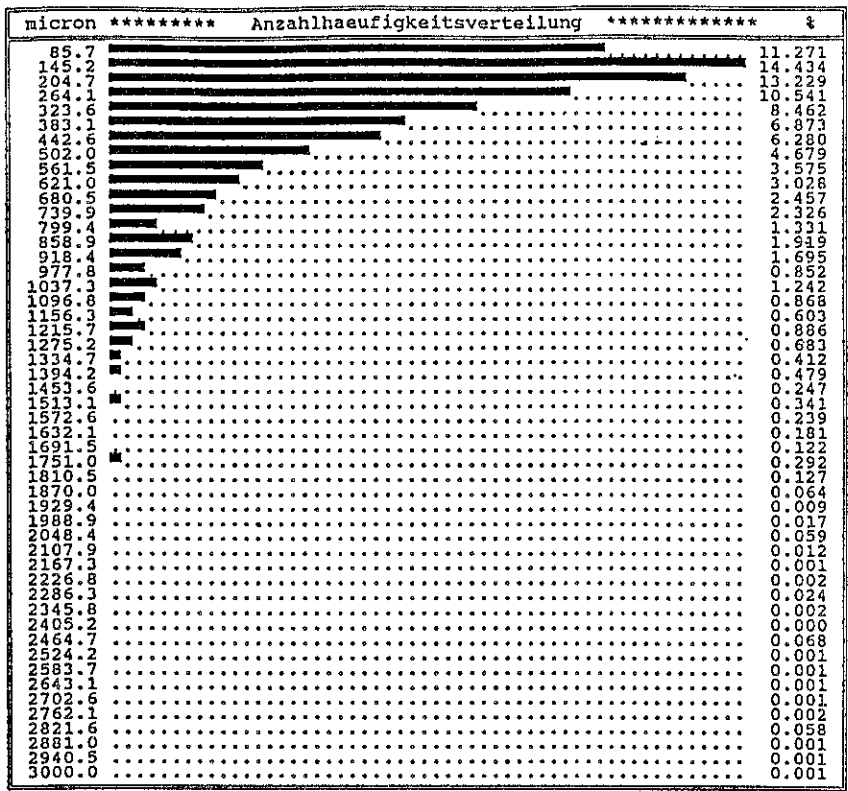


0,5 bar

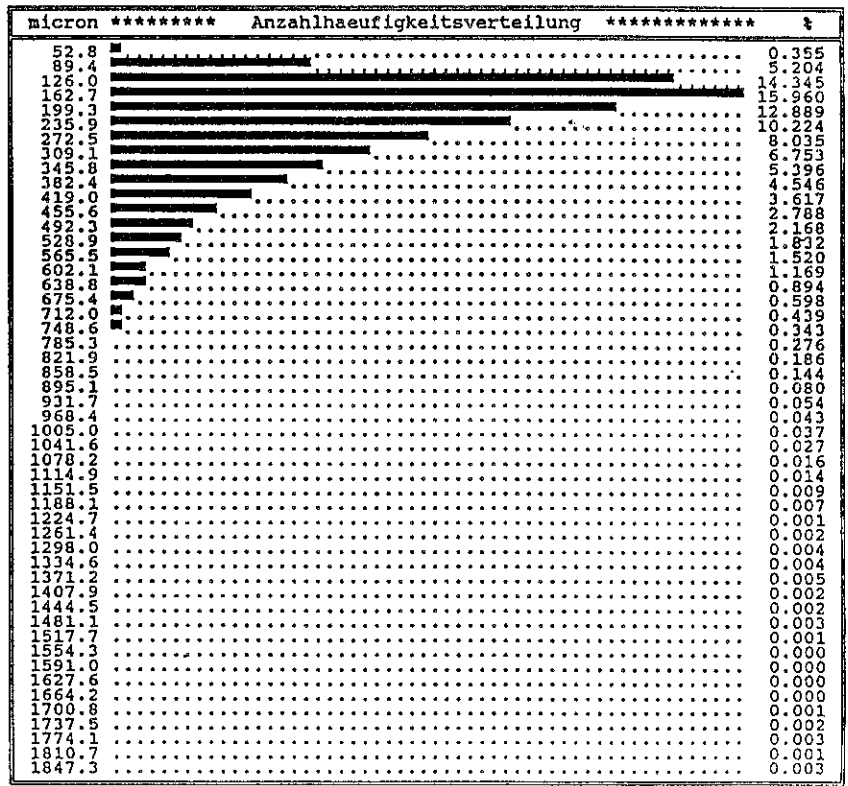


5 bar

Bild 15. Size-Velocity-Distribution für Sprinkler Typ C, Höhe 1,5 m.

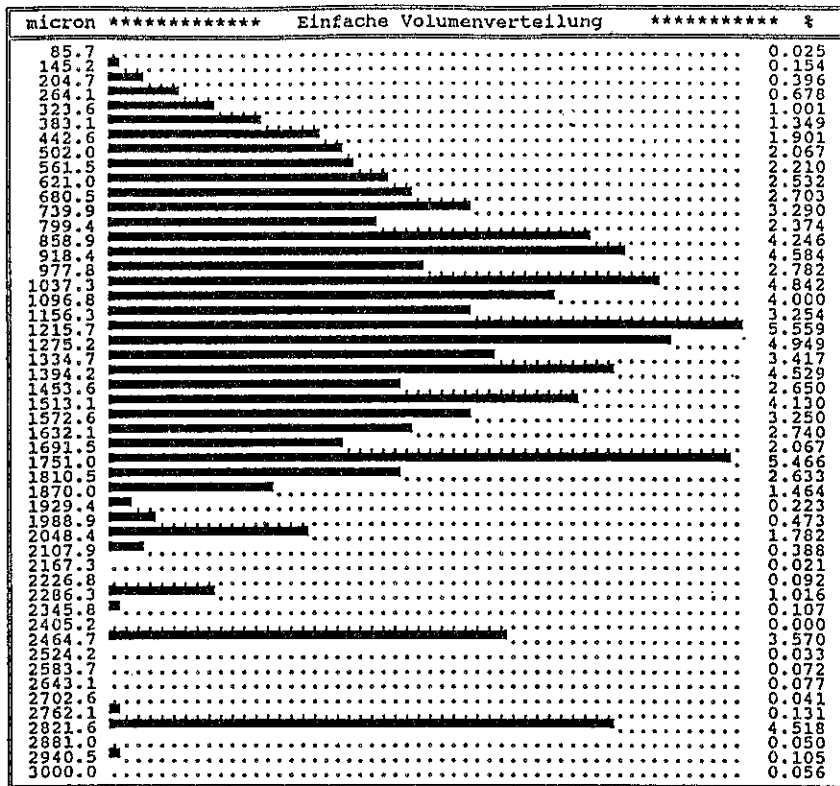


0,5 bar

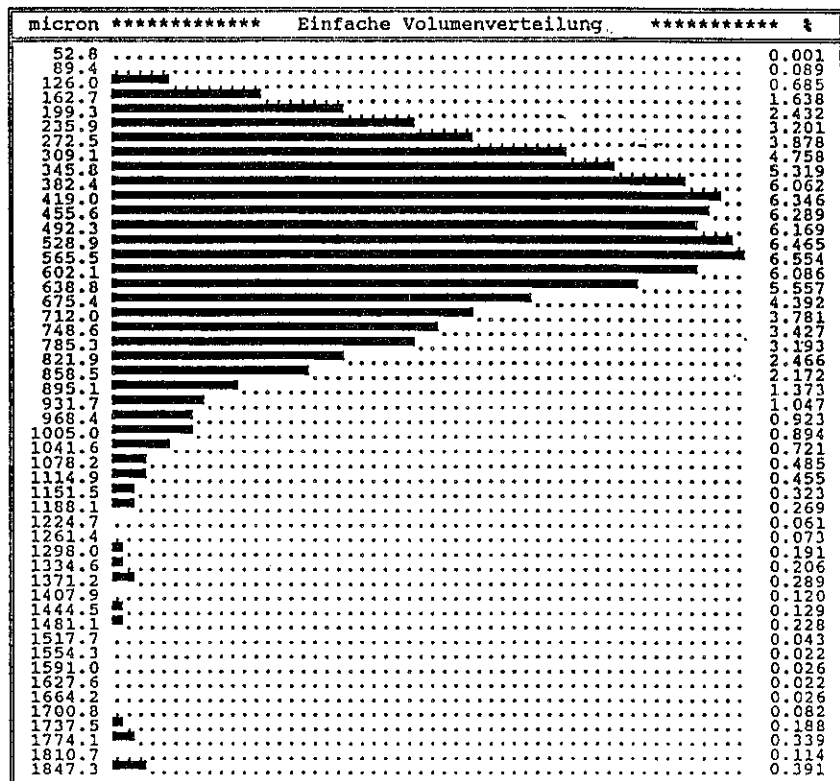


5 bar

Bild 16. Anzahlhäufigkeitsverteilung für Sprinkler Typ E, Höhe 1,5 m.

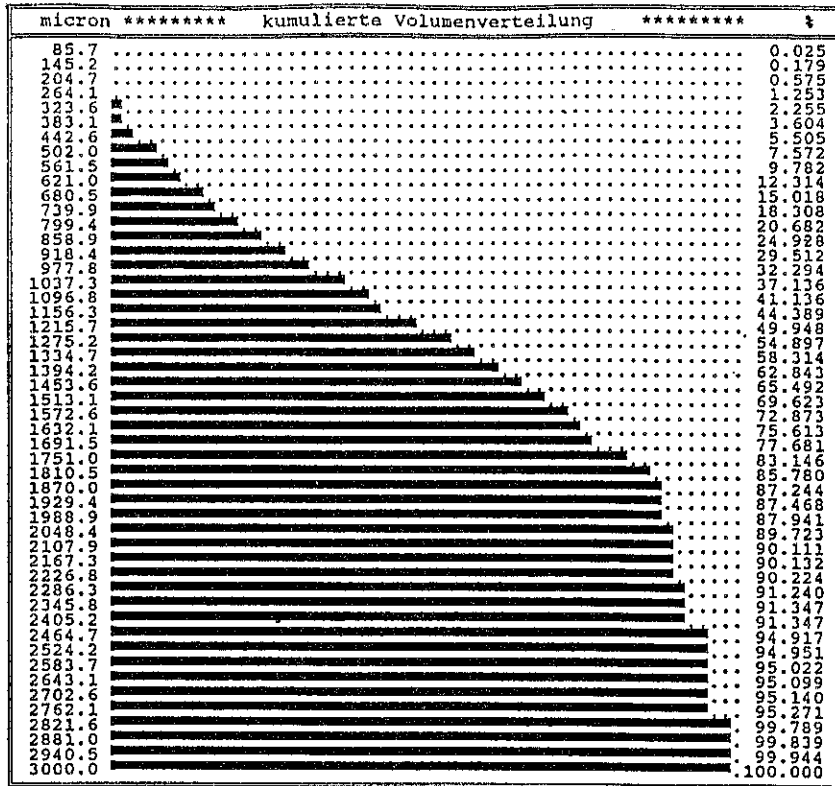


0,5 bar

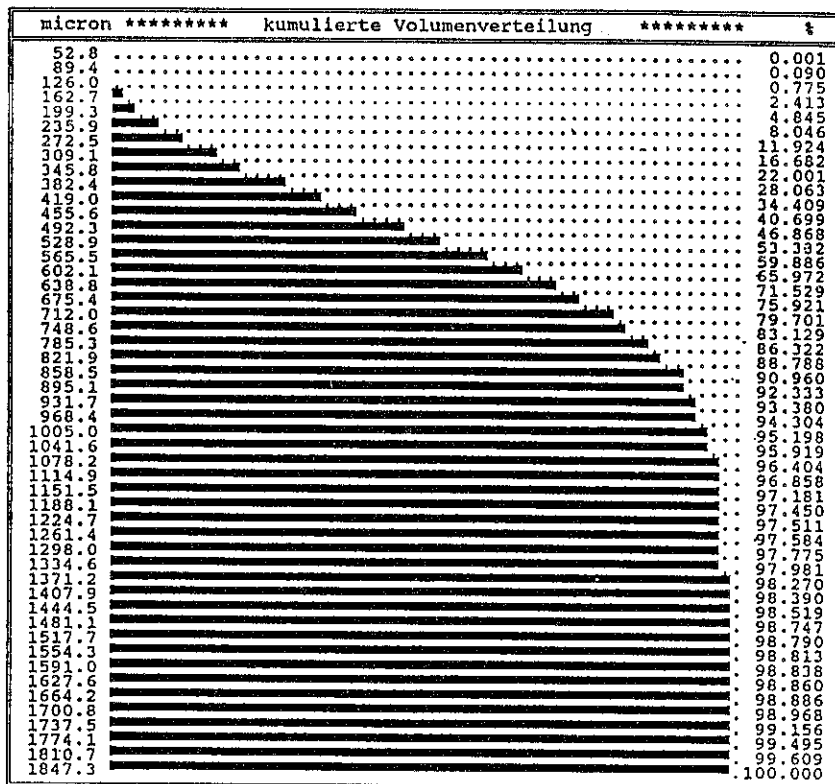


5 bar

Bild 17. Einfache Volumenverteilung für Sprinkler Typ E, Höhe 1,5 m.

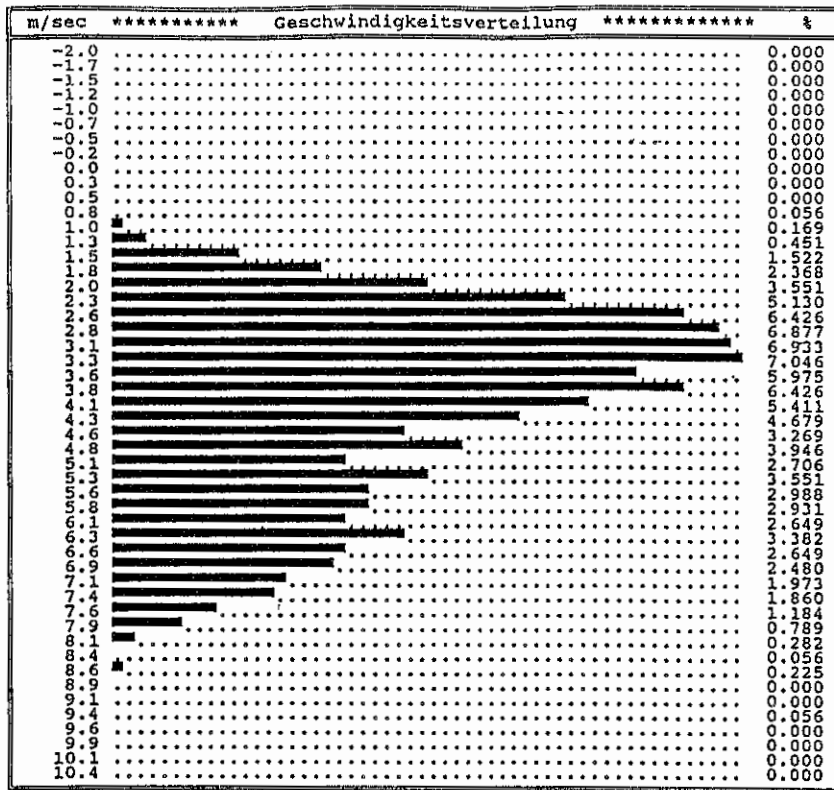


0,5 bar

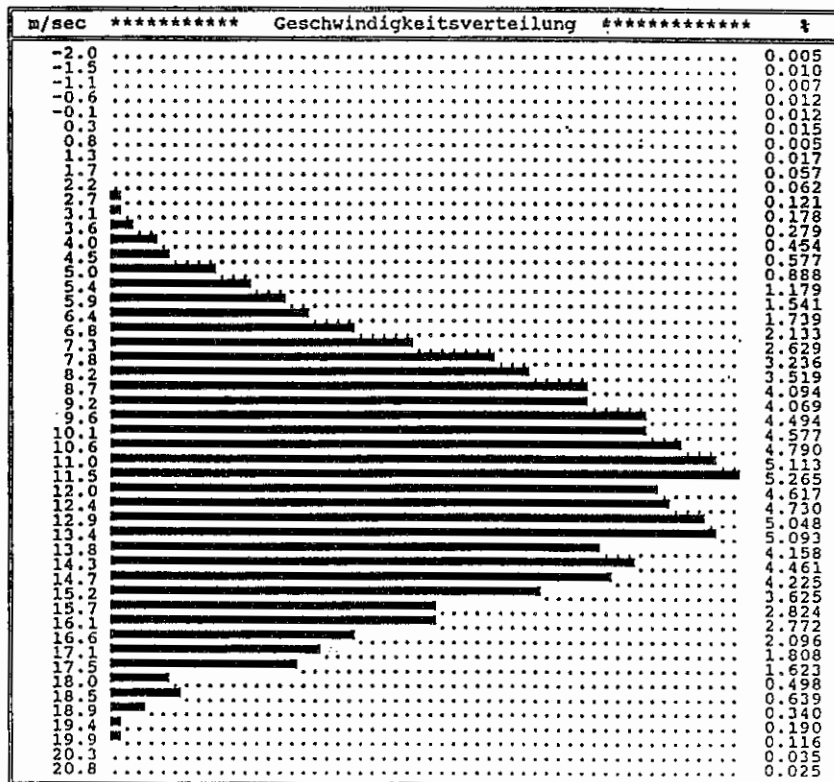


5 bar

Bild 18. Kumulierte Volumenverteilung für Sprinkler Typ E, Höhe 1,5 m.

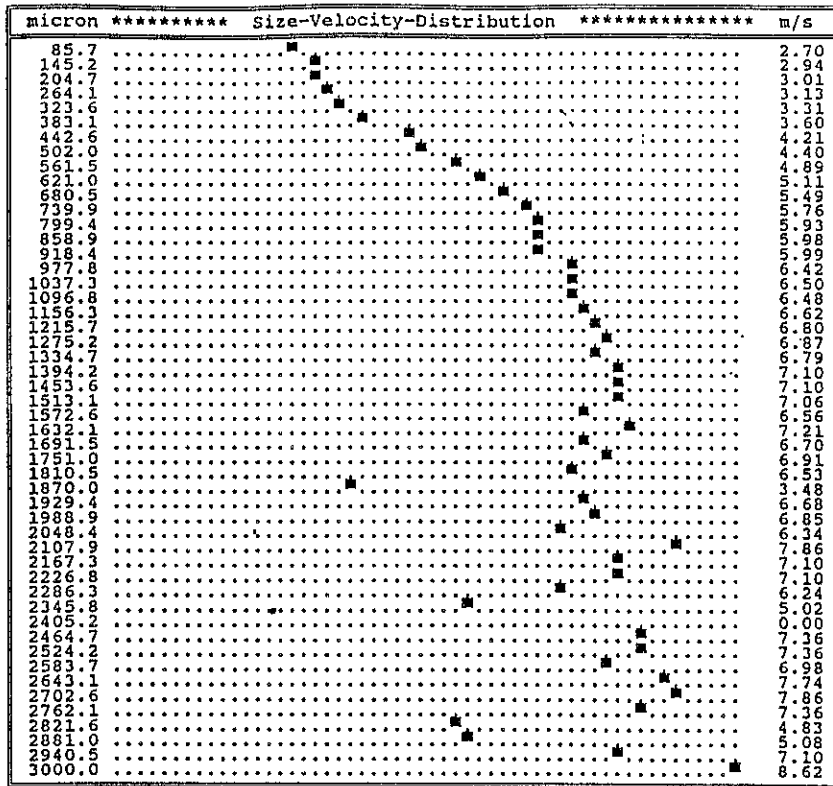


0,5 bar

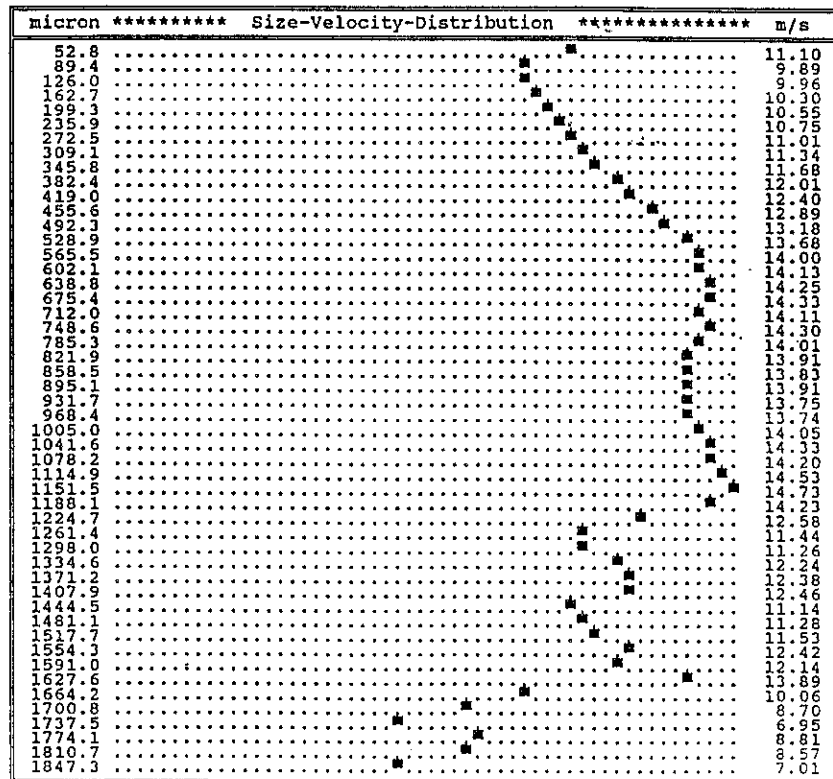


5 bar

Bild19. Geschwindigkeitsverteilung für Sprinkler Typ E, Höhe 1,5 m.

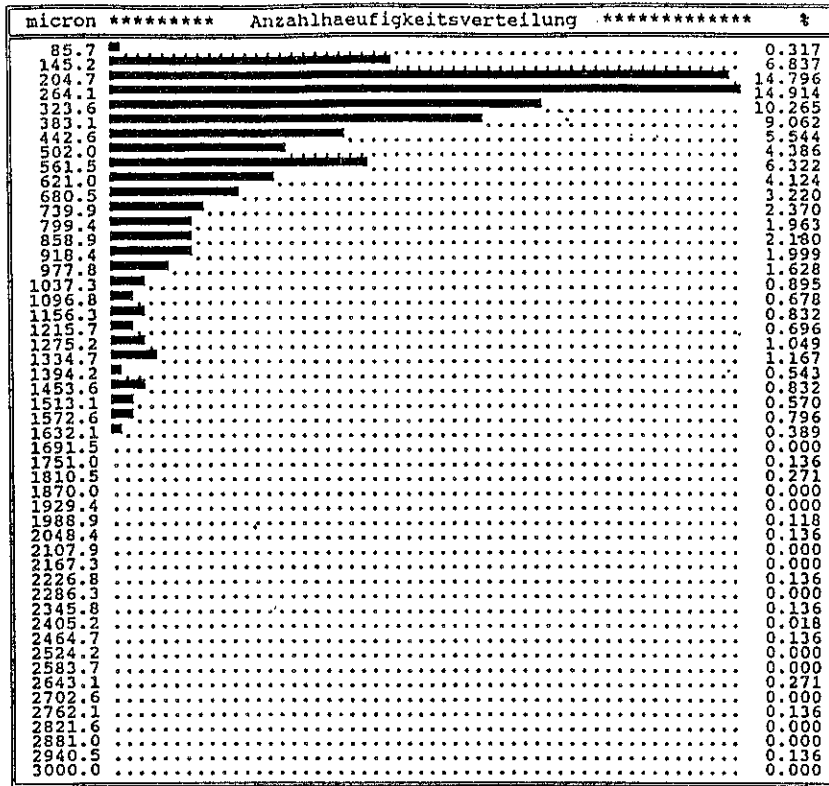


0,5 bar

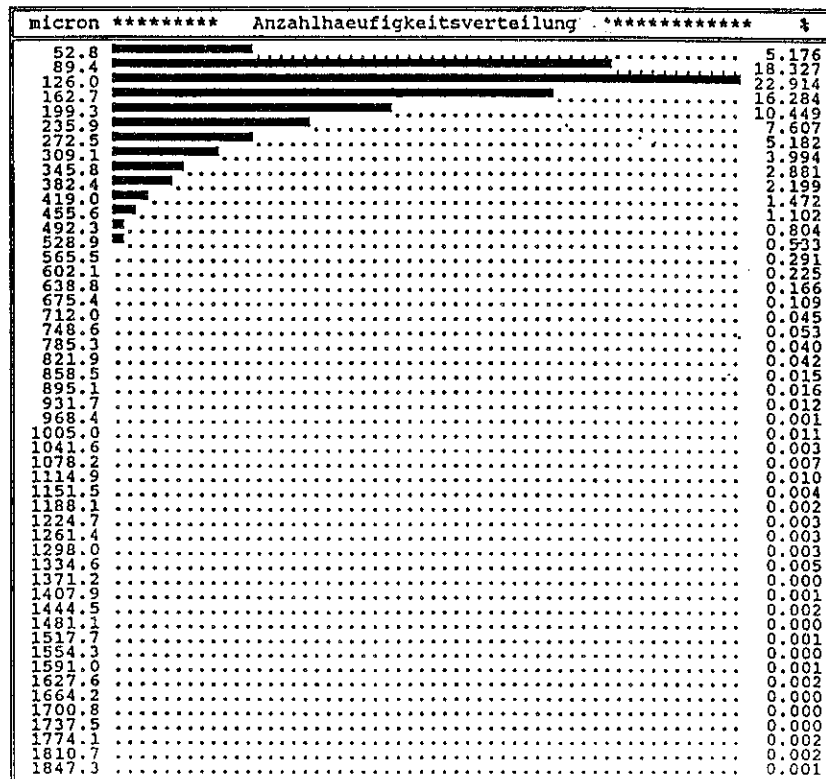


5 bar

Bild 20. Size-Velocity-Distribution für Sprinkler Typ E, Höhe 1,5 m.

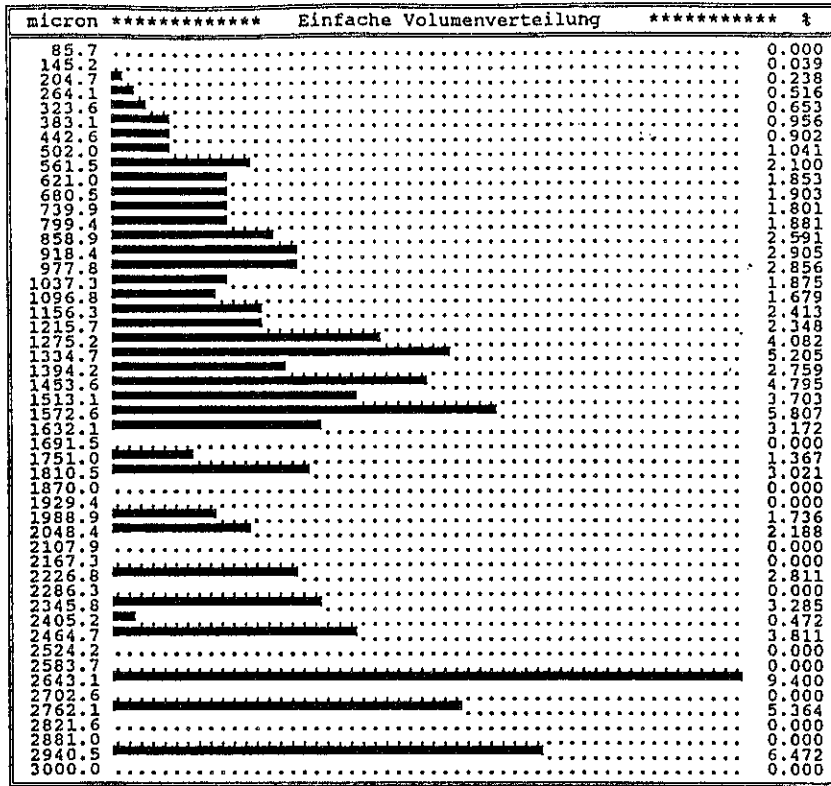


0,5 bar

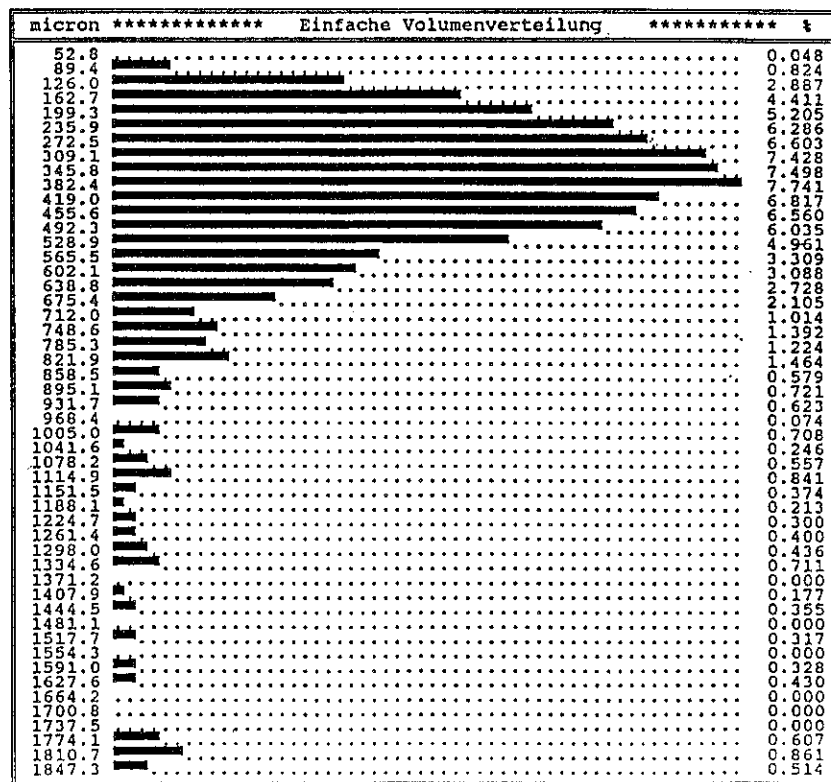


5 bar

Bild 21. Anzahlhäufigkeitsverteilung für Sprinkler Typ F, Höhe 1,5 m.



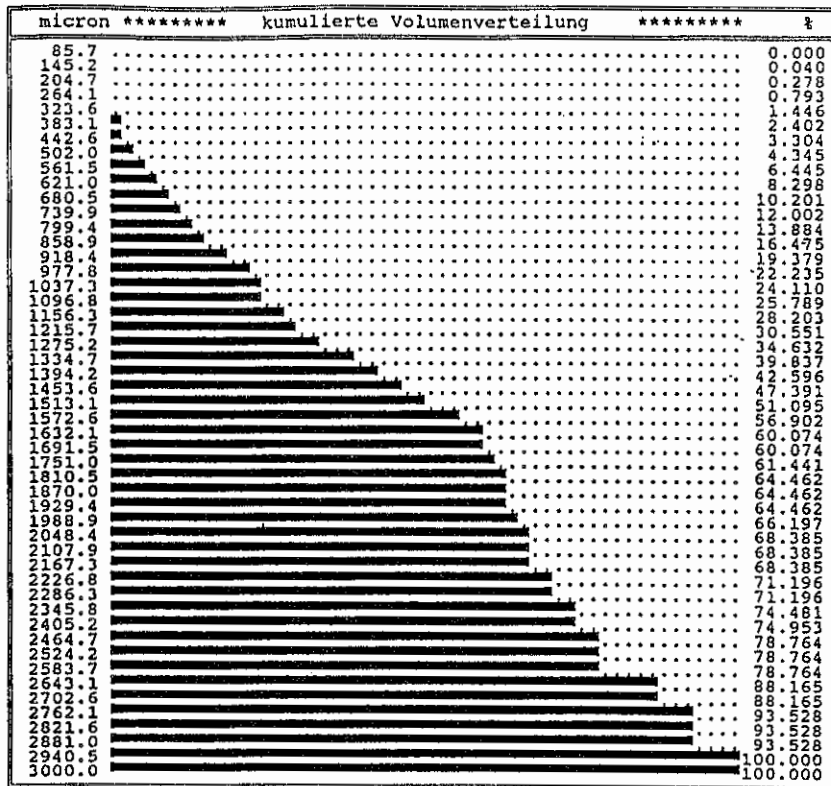
0,5 bar



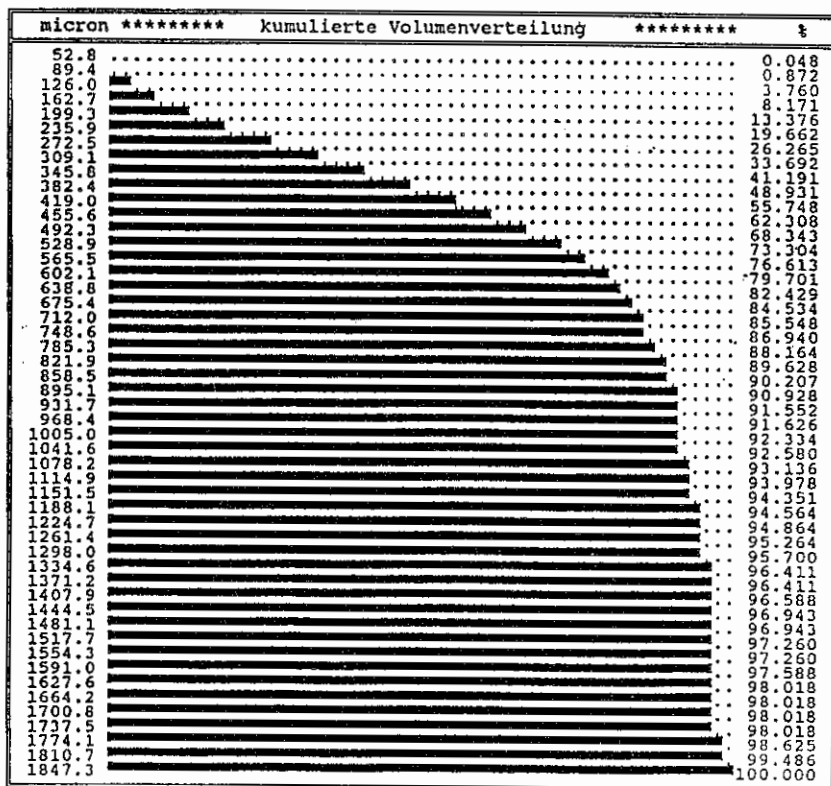
5 bar

Bild 22. Einfache Volumenverteilung für Sprinkler Typ F, Höhe 1,5 m.



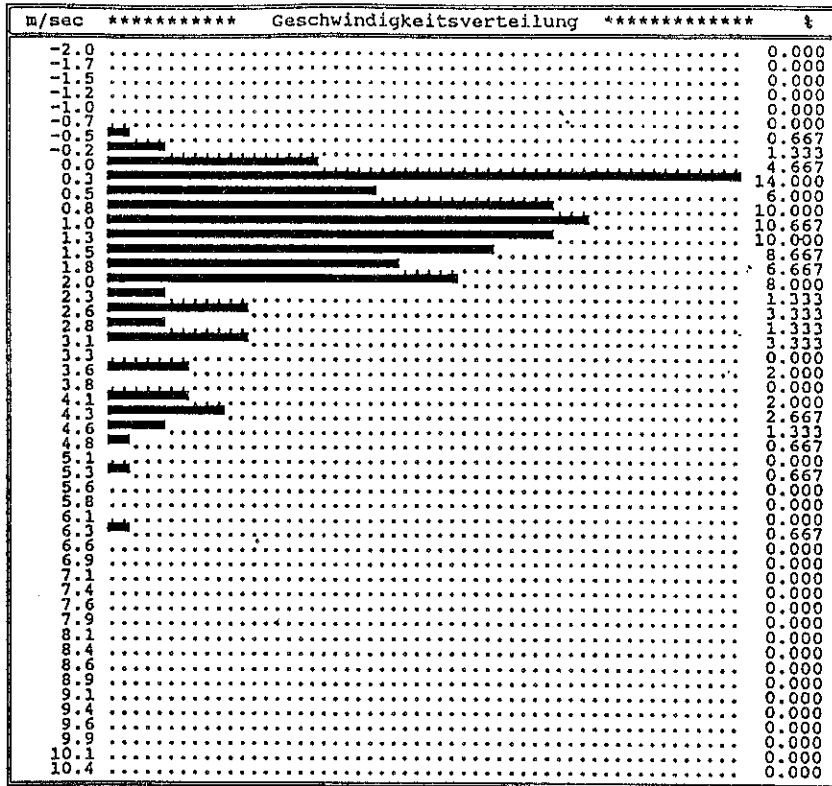


0,5 bar

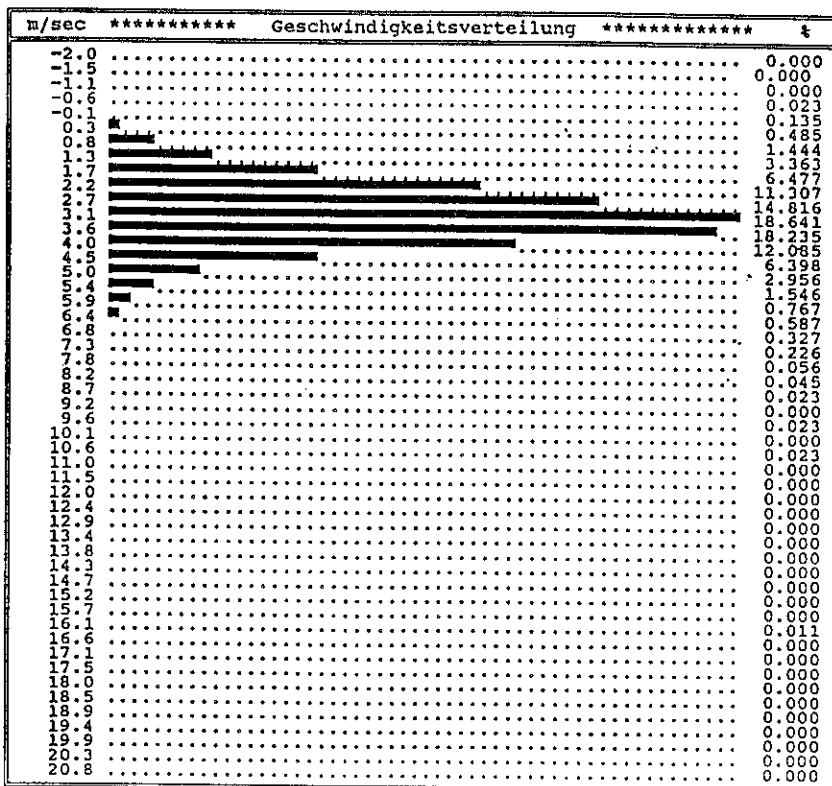


5 bar

Bild 23. Kumulierte Volumenverteilung für Sprinkler Typ F, Höhe 1,5 m.

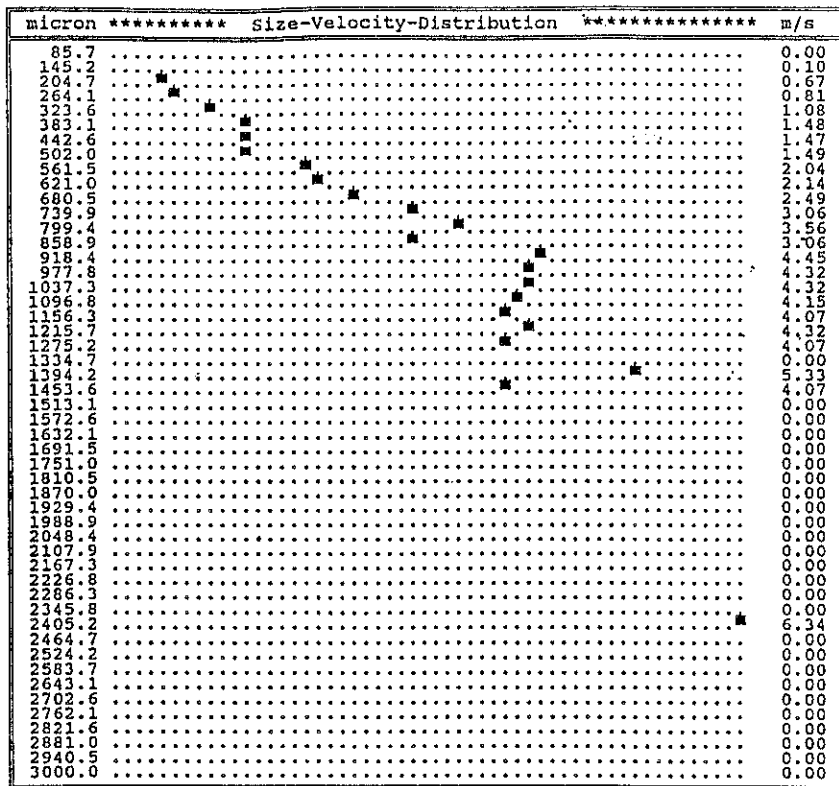


0,5 bar

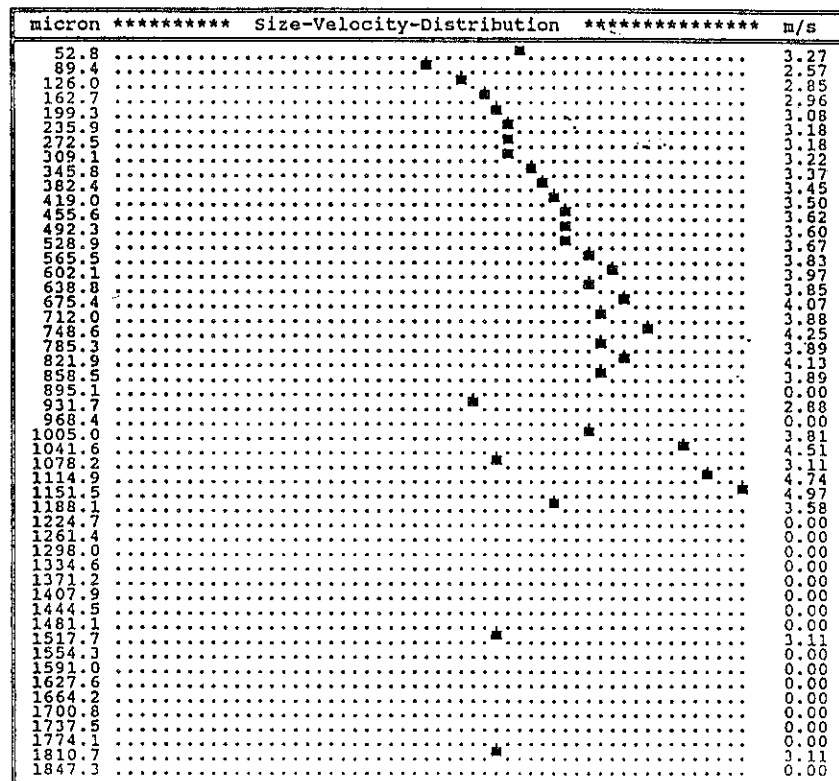


5 bar

Bild 24. Geschwindigkeitsverteilung für Sprinkler Typ F, Höhe 1,5 m.



0,5 bar



5 bar

Bild 25. Size-Velocity-Distribution für Sprinkler  
Typ F, Höhe 1,5 m.

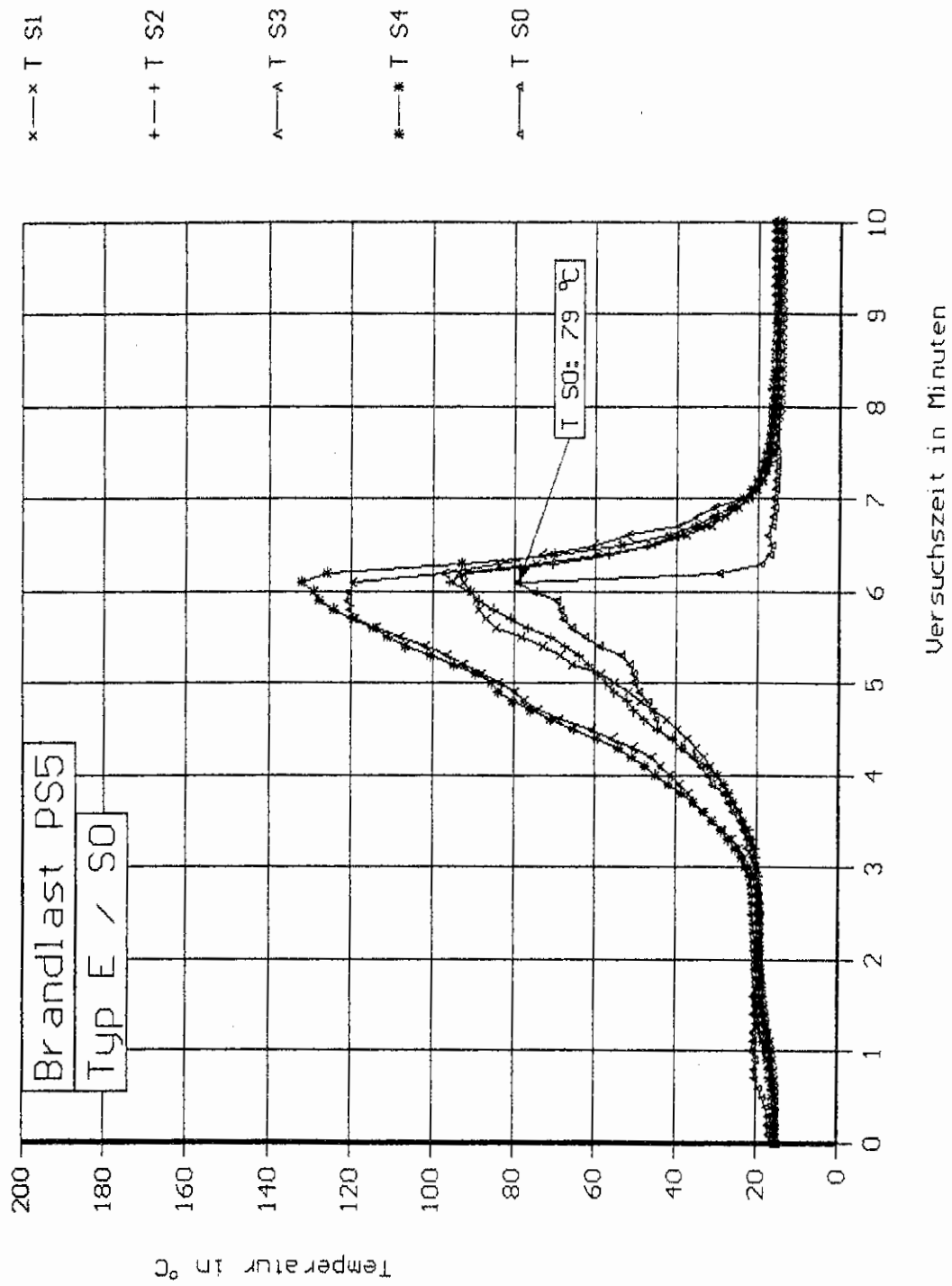


Bild 26. Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit.

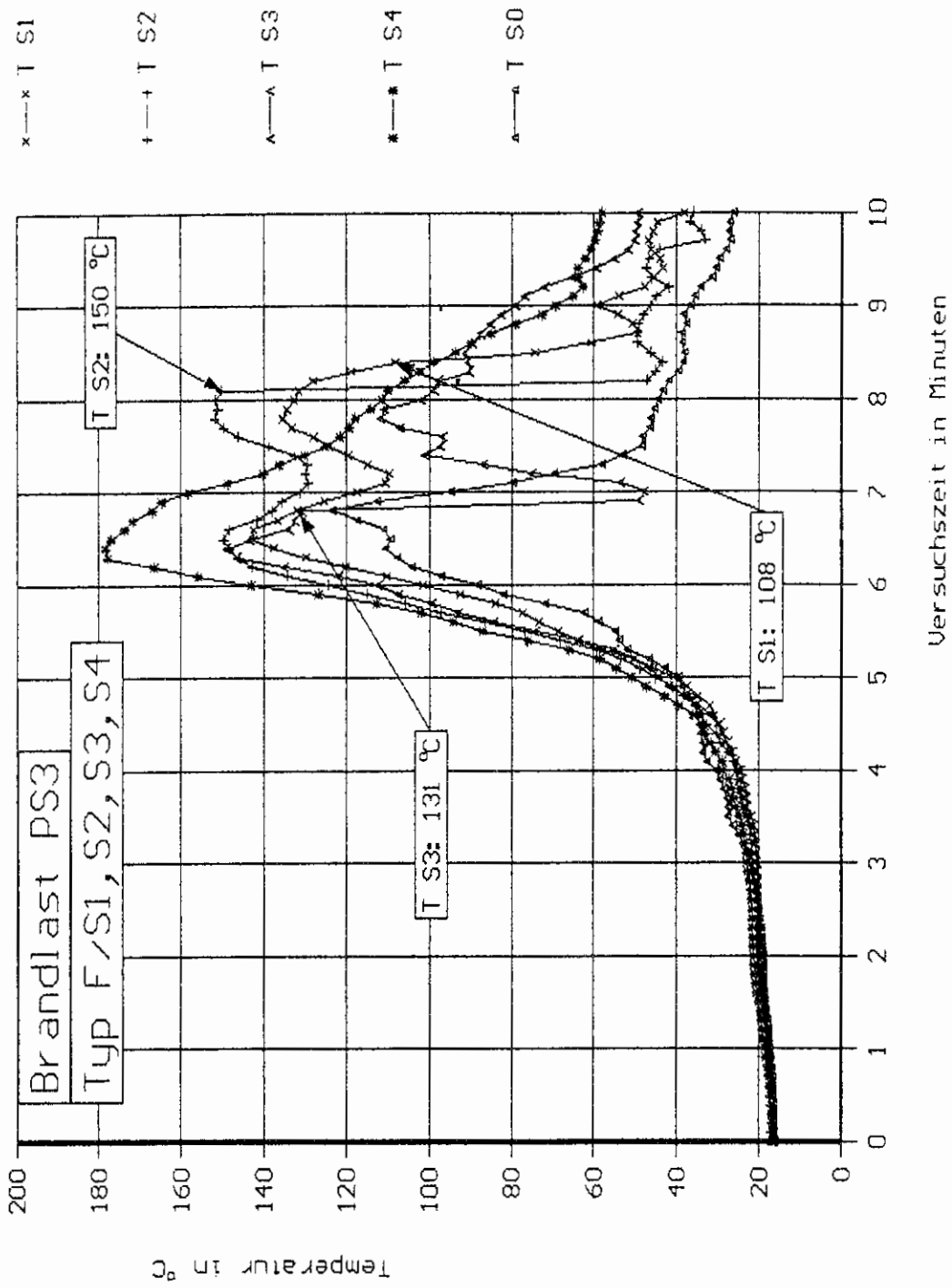


Bild 27. Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Versuchszeit.