

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen
Stoffen, die in lagermäßiger Anord-
nung gestapelt sind,

84

Teil 10: Weiterführende Literatur-
übersicht über die Brand-
ausbreitung sowie über die
Wechselwirkungen des Trop-
fenschwarmes eines Sprink-
lers mit einer Heißgas-
strömung

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

Forschungsbericht Nr. 84

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

Teil 10: Weiterführende Literaturübersicht
über die Brandausbreitung sowie
über die Wechselwirkungen
des Tropfenschwarmes eines
Sprinklers mit einer Heißgas-
strömung.

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Juni 1993

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN LITERATUR	2
3. ZUSAMMENFASSUNG	45
4. LITERATURVERZEICHNIS	47

1. EINLEITUNG

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßt sich in einem mehrjährigen Forschungsprogramm mit der qualitativen, aber insbesondere quantitativen Beschreibung der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz bei gestapelten brennbaren Stoffen.

Als vorbeugende Brandschutzmaßnahmen werden in der Praxis ortsfeste Löschanlagen installiert, wobei als häufigstes Löschmittel Wasser verwendet wird.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befassen sich bezüglich der Brandausbreitung mit einer Literaturlauswertung des in- und ausländischen Schrifttums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4,5,6/. Der zugehörige Löscheinsatz wird in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13/ untersucht.

Weiterhin werden die Wechselwirkungen von Einzeltropfen /14/ bzw. von Tropfenschwärmen mit einer realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung theoretisch untersucht /15/ und numerisch simuliert /16/. In /15/ wird hierbei ein über die Angaben in /14/ weiterführender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen aufgeführt, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten für die Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen.

In /17/ wurden Kaltversuche mit 4 verschiedenen Sprinklertypen durchgeführt, deren Löschwasser in 25 im Quadrat angeordneten quadratischen Blechwannen aufgefangen und die Wasserbeaufschlagung gemessen. Die Sprühnebel der verschiedenen Sprinklertypen wurden bezüglich des Tropfenspektrums und der vertikalen Tropfengeschwindigkeit mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator analysiert. Eine Weiterentwicklung des in /16/ beschriebenen Programmes gestattet es, die Wasserbeaufschlagung der 25 Wannen unter Berücksichtigung eines Tropfenschwarmes

numerisch zu simulieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine weiterführende Literaturauswertung die Grundlagen für eine Verfeinerung und Erweiterung der numerischen Simulation von /16/ und /17/ zu schaffen.

Bisher unbehandelte Fragen bei der numerischen Simulation sind hierbei z.B. die Ansaugung von Umgebungsluft durch den Sprühnebel und die Ausbreitung der Flammen auf einem Lagerstapel. Bei letzterem spielt der Verbrennungsprozeß sowie die Wärmeübertragung von den Flammen des bereits brennenden Stoffes an den noch nicht brennenden Stoff die entscheidende Rolle für die Entstehung von Pyrolysegasen und deren Entzündung. Dieses Ausbreiten der Pyrolysefront und letztendlich der Flammenfront ist entscheidend für die Brandausbreitung. Auf diese Brandausbreitung haben wiederum der Löschbeginn, die Löschwassermenge sowie die Tropfen- und Löschwasserverteilung einen entscheidenden Einfluß.

2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN LITERATUR

In der Arbeit von Alpert /18/ wird ein Überblick über Verfahren zur Simulation der Brandbekämpfung gegeben. Insbesondere interessiert hierbei die Beschreibung der Durchdringungsfähigkeit des Sprinklersprays zum Brandherd, der Kühlwirkung des Sprühnebels auf die heißen Rauchgase sowie des Auslöseverhaltens von weiteren Sprinklern nach bereits ausgelösten Sprinklern. Hierbei soll es jedoch nicht nur die Aufgabe sein, die einzelnen Modelle durch geeignete umfangreiche Experimente zu verifizieren, sondern die Programme sollen weltweit für eine möglichst große Anzahl von Brand- und Sprinklerszenarien einsetzbar sein. Dies soll dadurch erreicht werden, daß die Randbedingungen für die verschiedenen Szenarien in Unterprogrammen erfaßt werden, die im Hauptprogramm dann je nach Bedarfsfall entsprechend ausgetauscht werden können. Der Autor sieht bisher nur geringe Fortschritte bei der Beschreibung des Brand- und Löschszenarios unter Annahme einer willkürlichen Brandlastverteilung und den dadurch resul-

tierenden Wechselwirkungen bedingt durch das komplexe Strömungsfeld des Sprühnebels während der Brandausbreitung und der gleichzeitigen Verdampfung bzw. Kühlwirkung des Löschwassers. Es wird hierbei auch auf den möglichen Einfluß der Wasserdampfbildung auf die Brandausbreitung, die Ventilation und die Sauerstoffkonzentration in engen Zwischenräumen hingewiesen. Alpert berichtet über Ergebnisse der numerischen Simulation mit Hilfe der Finite Elemente-Methode. Als Anfangsbedingungen für die Berechnungen wurden u.a. Wärmefreisetzungen zwischen 0,5 MW und 4 MW, Höhen zwischen 3 m und 6 m, Sprühkegelwinkel zwischen 138° und 154° sowie mittlere Tropfendurchmesser (mass median droplet size) zwischen 1 mm und 1,5 mm angenommen. Es werden Gleichungen und Diagramme zur Beschreibung der Durchdringungsfähigkeit des Sprühnebels durch die Rauchgasströmung und der Wärmeabsorption durch den Sprühnebel als Funktion der Durchdringungsfähigkeit dargestellt. Weiterhin wird über das Phänomen berichtet, daß kleine Tropfen in das brandinduzierte Strömungsfeld eingesaugt werden und dann zu noch nicht ausgelösten Sprinklern geschleppt werden. Durch die hierdurch entstehende Kühlwirkung auf das Auslöseelement kann eine Auslösung verzögert oder sogar verhindert werden.

Die Arbeit von Bill, u.a. /19/ berichtet über die Brandausbreitung sowie die Messung der erforderlichen Wasserbeaufschlagung (RDD = Required Delivered Density) für den Brand eines Lehnstuhles mit Vinylbezug. In der Arbeit wird die genaue stoffliche Zusammensetzung wiedergegeben. Dies ist ein Teil eines Versuchsprogrammes zur Abschätzung des Verhältnisses effektive Wasserbeaufschlagung (ADD = Actual Delivered Density)/erforderliche Wasserbeaufschlagung (RDD) beim Einsatz von Schnellauslösesprinklern. Wenn der ADD-Wert größer als der RDD-Wert ist, kann mit großer Wahrscheinlichkeit mit einer schnellen Brandbekämpfung gerechnet werden. Ausschlaggebend für die Wasserbeaufschlagung ist hierbei der Impuls, die Tropfengrößenverteilung und der Volumenstrom des Sprühnebels. In zwei Versuchen wurden die Verbrennungswärme und der konvektive Wärmestrom des brennenden Stuhles aus einer Brandgasanalyse bzw. die Strahlungswärme durch Wärmestrahlungsaufnehmer bestimmt. Für die

Brandgasanalyse wurden die Gase mittels einer kegelförmigen Abgashaube (größter Durchmesser = 3,66 m, Höhe = 1,22 m) über ein Rohr (Durchm. = 0,6 m) der Meßstrecke zugeführt. Der abgesaugte Volumenstrom betrug 10,5 m³/s bei einem statischen Druck von 2,5 kPa. Im Rohr wurden die Strömungsgeschwindigkeit, der Druck und die Temperatur gemessen. Die Gasanalyse umfaßte die Komponenten CO₂, CO, O₂ und unverbrannte Kohlenwasserstoffe. In der Arbeit wird eine Skizze dieser Versuchseinrichtung mit weiteren Einzelheiten gezeigt. In den Versuchen wurden hierbei Wasserbeaufschlagungen von 2,4 mm/min, 3,7 mm/min, 6,1 mm/min und 8,6 mm/min bei einer konvektiven Wärmefreisetzung im Bereich zwischen 100 kW und 450 kW angewendet. Für die Bestimmung des RDD-Wertes wurde eine Apparatur verwendet, die in der Arbeit genau beschrieben wird. Als Löschdüsen wurden handelsübliche Düsen mit einem Sprühkegelwinkel von 70° verwendet. Hiervon wurden 16 Stück in einem Quadrat mit 4 * 4 Düsen und einem Abstand von 0,25 m angeordnet. Bei den oben aufgeführten Wasserbeaufschlagungen haben diese Düsen mittlere Tropfendurchmesser (volume median diameter) von 0,3 mm, 0,5 mm, 0,98 mm und 1,1 mm. Die Kalibrierung des RDD-Wertes erfolgte durch Auffangen des Sprühwassers in 9 quadratischen Wannen (0,27 m * 0,27 m) 0,38 m unterhalb der Düsen. Der Abstand zwischen den Düsen und der Oberkante des Stuhles betrug 0,38 m. Die Versuchsdurchführung gestaltete sich grob wie folgt: Die konvektive Wärmefreisetzung des brennenden Stuhles wird ab dem Zündzeitpunkt kontinuierlich gemessen. Bei Erreichen der gewünschten Wärmefreisetzung wird die vorher entlüftete und eingeregeltere Löscheinrichtung innerhalb von 3 s über dem Stuhl positioniert. Die Wärmefreisetzung wurde nun solange gemessen, bis diese einen Wert von ca. 20% erreicht hatte. Anschließend wurde die Wasserbeaufschlagung in den 9 Wannen gemessen. Die erforderliche Wasserbeaufschlagung (RDD) lag im Bereich zwischen 3,7 mm/min und 6,1 mm/min. Der konvektive Wärmestrom betrug ca. 56 % der gesamten Wärmefreisetzung.

In Teil 2 der Untersuchungen von Bill, u.a. /20/ wird über die Bestimmung der effektiven Wasserbeaufschlagung (ADD = Actual Delivered Density) beim Brand eines Lehnstuhles mit Vinylbezug

und dem Einsatz von Schnellauslösesprinklern (Düsendurchm.: 12,7 mm, Vol.strom.: 95 l/min, Druck: 145 kPa bei 1 Sprinkler) und Wohnbereichsprinklern (Düsendurchm.: 12,7 mm, 68 l/min, 283 kPa bei 1 Sprinkler, 49 l/min, 145 kPa bei 2 bis 4 Sprinklern) berichtet. Diese Versuche stellen die Erweiterung der mit Düsen idealisiert durchgeführten Versuche zur Bestimmung des RDD-Wertes in /19/ auf den Fall mit realen Sprinklern dar. Hierbei wurden 5 verschiedene konvektive Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit (110 kW, 160 kW, 250 kW, 300 kW und 390 kW) untersucht. Die Sprinklerhöhe lag im Bereich zwischen 2,4 m und 4,6 m. Der ADD-Wert wurde für einen sowie für mehrere Sprinkler ermittelt. Das Sprühwasser wurde in 25 Wannen (0,25 m * 0,25 m) aufgefangen. Innerhalb der Auffangwannen wurden 4 Heptan-Zerstäubungsbrenner in einem Quadrat mit der Kantenlänge 0,61 m zur Simulation des Brandherdes angeordnet. Mit diesen Brennern wurde bei jeder der in /19/ untersuchten Wärmefreisetzungen die Temperaturen und Gasgeschwindigkeiten, die bei der Verbrennung des Lehnstuhles auftraten, simuliert. Zur Ermittlung des ADD-Wertes wurden die Heptan-Zerstäubungsbrenner 2 Min. vor der Sprinklerauslösung gezündet. Die Auslösung der Sprinkler erfolgte mit Magnetventilen. Die Löschzeit betrug 4 Min. Statt der Heptan-Zerstäubungsbrenner wurden auch 7 Versuche mit Lehnstühlen als Brandherd durchgeführt. Als Zündquelle diente ein mit Methanol getränkter Baumwolldocht. Bei diesen Versuchen wurde ein Sprinkler mit Auslöseelement ohne Wasseranschluß dazu verwendet, um durch Schmelzen des Auslöseelementes die Magnetventile an den übrigen Sprinklern zu öffnen. Bei den Versuchen konnte das totale Löschen der Flammen nicht erreicht werden. Es wurde definiert, daß eine Brandunterdrückung dann erreicht war, wenn die Flammen kleiner 0,3 m blieben. Bei 4 Brandversuchen war $ADD \leq RDD$ und es kam zu keiner Brandunterdrückung. Bei den restlichen 3 Versuchen kam es zur Brandunterdrückung. In einem Versuch waren der ADD-Wert und der RDD-Wert ungefähr gleich. Bei 2 Versuchen und dem Einsatz zwischen 2 und 4 Sprinklern kam es zur Brandunterdrückung obwohl $ADD \leq RDD$ war. Der Autor hält die Benässung von der Seite hierfür verantwortlich.

Bill /21/ beschreibt in seiner Arbeit die numerische Simulation

der effektiven Wasserbeaufschlagung (ADD = Actual Delivered Density) eines handelsüblichen Sprinklers zentral über einem volumetrischen Brandherd. Die entstehenden Gastemperaturen und Gasgeschwindigkeiten am Brandherd wurden aus Meßwerten von 4 im Quadrat angeordneten Heptanzerstäubungsbrennern in einem Feld von 25 wassergekühlten 25 cm * 25 cm großen Sprühwasserauffangwannen ermittelt. Die Berechnungen wurden für die Wärmefreisetzung 160 kW und sowie 300 kW und 2 verschiedene Sprinklerhöhen (3,05 m und 4,57 m) durchgeführt. Der Grundgedanke bei den Berechnungen ist, daß die strömungstechnischen und thermodynamischen Wechselwirkungen zwischen den Sprinklertropfen und der auftriebsbehafteten Rauchgasströmung für die Durchdringungsfähigkeit der Tropfen zum Brandherd verantwortlich sind. Die Tropfengröße und der Impuls der Tropfen sind hierbei die entscheidende Größe, damit die Tropfen zum Brandherd gelangen und nicht vorher verdampfen oder von der Rauchgasströmung abgelenkt werden. Für die Berechnungen wird das von der Factory Mutual Research Corporation in Norwood, Massachusetts (USA) entwickelte Programm SPRAY verwendet. Bisherige Untersuchungen der Programmentwickler haben gezeigt, daß das Programm unter gewissen Umständen numerische Instabilitäten zeigt, daß es jedoch in der Lage ist, die Wechselwirkungen zwischen Sprühnebel und Rauchgasströmung zu beschreiben. Im Programm SPRAY wird der Sprühnebel polydispers durch 5 verschiedene Tropfengrößen mit einem Massenanteil von je 20 % vom gesamten eingesprühten Massenstrom dargestellt. Für jede Tropfengröße werden 50 Bahnkurven entsprechend den verschiedenen Einsprühwinkeln und einer für alle Tropfen konstanten Einsprühgeschwindigkeit errechnet. In experimentellen Untersuchungen hat man festgestellt, daß bei dem verwendeten Sprinklertyp bei einem Druck von 2,83 bar ein Volumenstrom von 68,2 l/min erzielt wird. Der mittlere Tropfendurchmesser (volume median diameter) des Sprühnebels wurde zu 0,65 mm ermittelt. Die kumulierte Massenverteilungskurve zeigt bei den Werten 10 %, 30 %, 50 %, 70 % und 90 % die 5 Tropfendurchmesser 0,33 mm, 0,50 mm, 0,65 mm, 0,80 mm und 1 mm. Es wurde weiterhin beobachtet, daß in einem Abstand von 2,1 m direkt unter dem Sprinkler ca. 90 % des dort vorhandenen Volumenstromes Tropfen mit Durchmessern $\leq 0,6$ mm (mittlerer Durch-

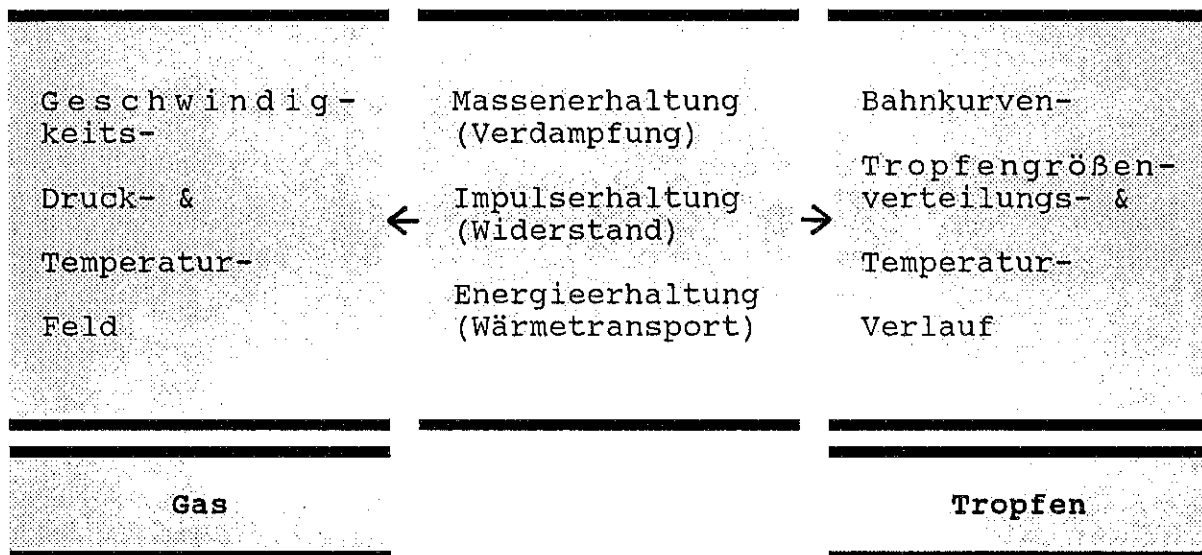
messer = 0,38 mm) aufweist. Bei einem Radius von 2,4 m von der Sprühachse weisen 90 % des dort vorhandenen Volumenstromes Tropfen $\geq 0,6$ mm auf. Bei der numerischen Simulation wurde der Einsprühwinkelbereich (hier: halber Sprühkegelwinkel) für die 3 kleinsten Tropfengrößen im Bereich zwischen 0° und 80° und für die beiden größten Tropfengrößen zwischen 45° und 80° gewählt. In den Versuchen wurde die vertikale Kraft mittels einer kreisförmigen Scheibe mit einer Oberfläche von $0,093 \text{ m}^2$ und $0,29 \text{ m}^2$, die auf einer Kraftmeßdose befestigt war in einem Abstand von $0,3 \text{ m}$ und $0,6 \text{ m}$ gemessen. Die gemessene Kraft lag im Bereich zwischen $0,85 \text{ N}$ und $4,63 \text{ N}$ je nach Meßaufnehmerfläche und Abstand. Die gemessenen Werte für die Kraft ohne Brandeinwirkung zeigen nur eine bedingt akzeptable Übereinstimmung mit den errechneten Werten. Bill führt die teilweise sehr großen Unterschiede auf die turbulenten Wechselwirkungen zwischen den Tropfen, die Tropfenzerteilung und der in der Simulation benutzten Anzahl von Tropfengrößen zurück. Die vorhandene Meßtechnik gestattete es auch nicht, die Tropfengrößen direkt am Sprinkler zu bestimmen. Die Abweichung zwischen errechneter und gemessener Wasserverteilung ohne Brand betrug ca. 11 %. Für die Untersuchungen mit Brand mußten eine Reihe von Versuchen durchgeführt werden, um experimentell den CO_2 -, CO - und Gesamtkohlenwasserstoffgehalt beim Heptan-Brand quantitativ mit und ohne Sprühnebel zu bestimmen. Dies war erforderlich, da das Simulationsprogramm kein Modell zur Beschreibung des Verbrennungsvorganges enthält. Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß sich die Reaktionswärme im untersuchten Fall durch den Einfluß des Sprühnebels nicht verändert. Bill hält die relativ geringe Wassermenge sowie die relativ geringe Impulskraft des verwendeten Sprinklers hierfür verantwortlich. Beim Vergleich der gemessenen mit der errechneten Wasserbeaufschlagung bei einem Radius von $0,38 \text{ m}$ und $0,64 \text{ m}$ und einer Höhe von $3,05 \text{ m}$ ergeben sich Abweichungen zwischen 10% und 24%. Bei einer Höhe von $4,57 \text{ m}$ und einem Radius von $0,38 \text{ m}$ liegt der errechnete Wert um mehr als das doppelte unter dem gemessenen Wert. Bill hat herausgefunden, daß bei Tropfen $\leq 0,65 \text{ mm}$ der Impuls nicht ausreicht, den Rauchgas-/Flammenbereich im Bereich direkt unter dem Sprinkler zu durchdringen. In diesem Kernbereich wird die Bewegungsrichtung

der Tropfen umgekehrt und die Tropfen werden aus dem Rauchgas-/Flammenbereich ausgetragen.

In der Arbeit von **Chow und Fong /22/** wird die Schleppwirkung und die Kühlwirkung der Wassertropfen eines Sprinklers auf die Heißgasströmung eines Brandes mit einem 3dimensionalen Feldmodell untersucht. Hierbei wird der konvektive Wärmestrom und das Verhältnis Widerstandskraft/Auftriebskraft berechnet. Da experimentelle Daten zur Bestätigung des Modelles fehlen, kommt der Autor zu dem Schluß, daß Meßergebnisse aus realen Brandversuchen in gesprinklerten Räumen hierfür notwendig sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann ein Brand nur durch ein einfaches chemisches Reaktionsmodell behandelt werden, da der Verbrennungsprozeß sehr kompliziert ist. In dieser Arbeit wird die Rauchausbreitung in dem Feldmodell als Problem mit natürlicher Konvektion betrachtet. Der Einfluß der Wärmestrahlung wird vernachlässigt. Das verwendete Feldmodell ist in der Lage, die zeitliche Änderung der 3dimensionalen Luftströmung sowie der 3dimensionalen Temperatur- und Druckfelder, hervorgerufen durch eine volumetrische Wärmequelle, unter Anwendung von Finite Elemente-Berechnungen der Masse-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichungen zu beschreiben. Für die Wechselwirkungen zwischen den Wassertropfen und der heißen Luft wird die 'Particle Source-in Cell'-Methode von **Crowe, Sharma und Stock /23/** verwendet. Bei den Berechnungen wird nur der Wärme- und Impulsaustausch berücksichtigt, nicht dagegen der Stoffaustausch, da angenommen wird, daß die Verdampfungswärme wesentlich kleiner als die konvektive Wärme ist. Hiermit ergibt sich das Problem einer axialsymmetrischen Sprinklerströmung in Wechselwirkung mit einer zeitlich veränderlichen horizontalen Luftströmung. In der Arbeit werden die entsprechenden partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung des Systemes wiedergegeben. Zur Beschreibung des Sprühkegels wird ein parabolischer Hohlkegel mit einer gleichmäßigen Tropfenverteilung angenommen. Die Bahnkurven der Tropfen werden nicht berechnet. Die Stoffwerte der Luft, wie z.B. Viskosität und spezifische Wärmekapazität werden temperaturabhängig berechnet. Der Wärmeentzug aus der Luft durch die Tropfen wird aus der Tropfenoberfläche, des Wärmeübertragungskoeffizienten und der

Temperaturdifferenz zwischen Tropfentemperatur und Umgebungstemperatur errechnet. Bei den Berechnungen wird das System in Kontrollvolumina unterteilt, in denen jeweils das Gleichungssystem gelöst wird. Da den Autoren bezüglich der Eigenschaften des Strömungsfeldes fast keine Meßergebnisse vorlagen, sollten mehr die Fähigkeiten des Programmes als die Richtigkeit der Berechnungsergebnisse aufgezeigt werden. Bei den Berechnungen hat sich u.a. gezeigt, daß die berechnete Temperatur-/Zeitkurve im Gegensatz zur experimentell ermittelten Kurve nicht abnimmt. Weiterhin konnte die Wasserbeaufschlagung nicht bestimmt werden, da die Tropfenflugbahnen nicht berechnet wurden. Die Autoren weisen daraufhin, daß experimentelle Meßwerte über die Wärmefreisetzung bei Bränden, Strömungs- und Temperaturfelder, Rauchkonzentrationen, Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen dringend für die Berechnungen benötigt werden.

Crowe, Sharma und Stock /23/ haben eine numerische Methode entwickelt, um das Verhalten eines Wassersprühnebels in einer gasförmigen Umgebung beschreiben zu können. Das Hauptproblem bei der Beschreibung dieser strömenden Gas/Tropfensuspension liegt in der Kopplung der Massen-, Impuls- und Energiebilanz zwischen den beiden Phasen. Dieses kann man schematisch wie folgt darstellen:



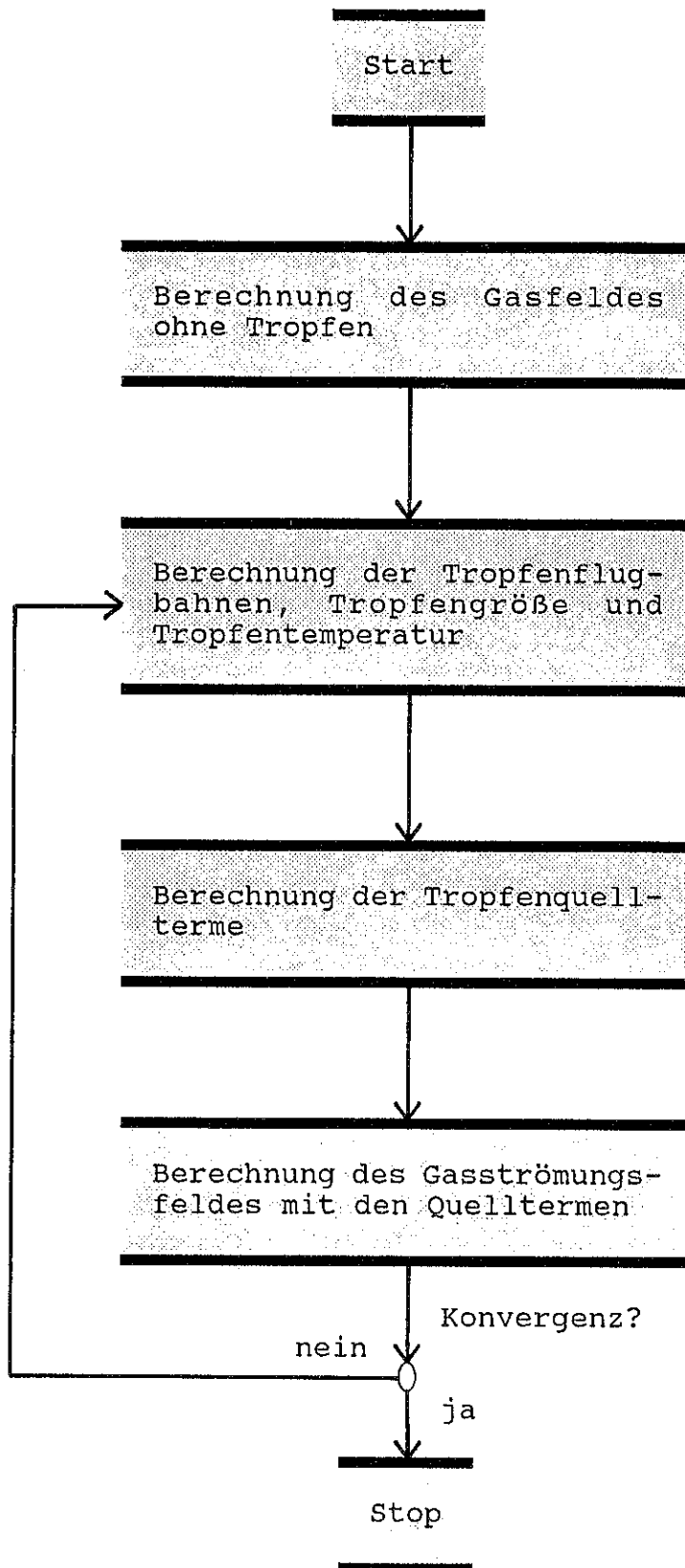
In der Arbeit wird folgendes Beispiel aufgeführt: Kalte nicht-

verdampfende Tropfen befinden sich in einer heißen Gasströmung. Die Wärme wird konvektiv vom Gas an die Tropfen übertragen, wodurch die Gastemperatur sinkt. Diese Temperaturabnahme kann zu einer Dichteänderung in der Gasströmung führen, wodurch das Strömungsfeld, die Tropfenflugbahnen und der Wärmetransport zwischen dem Gas und den Tropfen sich ändert. Crowe hat in einer früheren Arbeit die Umgebung eines Zerstäubungsbrenners für eine Gasturbine simuliert. Hierbei hat er festgestellt, daß die Eindringfähigkeit des Tropfenschwarmes größer ist als die des Einzeltropfens. Das Modell beruht darauf, daß das Strömungsfeld in Elemente unterteilt wird. Jedes dieser Elemente wird als Kontrollvolumen für die Gasphase betrachtet. Wenn Tropfen diese Kontrollvolumina durchqueren bestehen die Möglichkeiten, daß die Tropfen

1. verdampfen oder kondensieren
2. beschleunigt oder verzögert werden
3. konduktiv oder konvektiv am Wärmeaustausch beteiligt sind

Zur Beschreibung des Strömungsfeldes der Gasphase werden für jedes Volumenelement die Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichungen in Form von Finite Elemente-Gleichungen aufgestellt. Das Verhalten der Tropfen wird durch die gekoppelte Impuls-, Stoff- und Wärmebilanz beschrieben. Das Strömungsfeld der Gasphase wird mit Hilfe der Eulerschen Näherungsmethode, das der Tropfen mit Hilfe der Lagrangeschen Näherungsmethode analysiert. Die beim Überqueren der Element-Grenzen ermittelte Masse, Impuls und Energie der Tropfen stellt den Quellterm der Tropfen für die Gleichungen der Gasphase dar. Hierdurch wird somit das Geschwindigkeits- und Temperaturfeld der Gasphase beeinflusst.

Die Berechnungen innerhalb eines Elementes können durch folgendes Flußdiagramm dargestellt werden:



Weiterhin wird die Turbulenz und die effektive Viskosität berücksichtigt. Allerdings wird der Einfluß der Tropfen auf das Turbulenzfeld nicht betrachtet, da quantitativ bisher nur wenig über den Einfluß von Partikelgröße und -konzentration bekannt ist. Anhand der Berechnungsergebnisse über den Kühleffekt in einem Sprühturm wird die Leistungsfähigkeit des Verfahrens dargestellt.

In der Arbeit von **Cooper /24/** wird ein mathematisches Modell beschrieben, das die Wechselwirkungen zwischen einem Sprinkler und einer aus zwei Zonen bestehenden Rauchgasschicht eines Raumbrandes bei variabler Sprinklerhöhe, Zonendicke und Temperatur simuliert. Der Sprinkler wird hierbei durch den Wasservolumenstrom, den Düsendurchmesser, die Tropfengröße, den Impuls und die Gestalt des Sprühnebels beschrieben. Das Modell berücksichtigt die Luftansaugung durch den Sprühnebel sowie die Befeuchtung und Kühlung der Rauchsichten durch die Tropfenverdampfung. Das Rechenmodell liefert Aussagen über den Massenstrom, den Enthalpiestrom, die Verbrennungsprodukte und über das verdampfte Wasser aus dem Sprühnebel. Für die Berechnungen werden die Temperatur, die Dichte, der Wasserdampfgehalt und die Verbrennungsprodukte für die obere bzw. untere Rauchsicht berücksichtigt. Der Sprühkegel des Sprinklers wird formelmäßig vorgegeben. Die Anfangsgeschwindigkeit der Tropfen wird aus dem Volumenstrom aus der Düse und dem Düsendurchmesser errechnet. Der mittlere Tropfendurchmesser (median volume diameter) wird aus einem für die Düse spezifischen Tropfengrößenkennwert, dem Düsendurchmesser und der Einsprühgeschwindigkeit errechnet. Die sich abwärts bewegenden Tropfen bewirken aufgrund des Widerstandgesetzes einen Impulsaustausch mit dem umgebenden Gas. Innerhalb des Sprühkegels entsteht dadurch ein relativ niedriger Druck, wodurch aus der relativ in Ruhe befindlichen Umgebung aufgrund des dort vorliegenden höheren Druckes Gas angesaugt wird. Die Temperatur an der Tropfenoberfläche wird mit Hilfe einer empirischen Gleichung aus der Gastemperatur innerhalb des Sprühkegels berechnet. Diese Temperatur liegt im Bereich zwischen 33°C und 95°C bei Gastemperaturen im Bereich zwischen 100°C und 1000°C. Es wird angenommen, daß die gesamte an die Tropfen

übertragene Wärmemenge für die Verdampfung aufgewendet wird. Die verdampfte Wassermasse wird aus der konvektiv übertragenen Wärmemenge und der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser errechnet. Die verdampfte Wassermasse der Tropfen wird jedoch im Vergleich zur Ausgangsmasse als vernachlässigbar angesehen. Weitere Annahmen sind eine konstante Gastemperatur, Gasgeschwindigkeit und Tropfengeschwindigkeit über dem Sprühkegelquerschnitt. Diese Parameter werden nur als Funktion der Vertikalkoordinate berechnet. Weiterhin wird der Massenstrom des verdampften Wassers im Vergleich zum Luftmassenstrom im Sprühkegel vernachlässigt. In der Arbeit werden Gleichungen für die Massenerhaltung, die Impulserhaltung sowie die Energieerhaltung des Gases und der Tropfen aufgeführt.

Die Arbeit von Davis und Cooper /25/ beschreibt ein Computer-Modell zur Berechnung des Auslöseverhaltens von Schmelzlotelementen unter Berücksichtigung einer zweidimensionalen Brandgasströmung. Es werden hierbei 2 Zonen angenommen. Die obere Zone, in der sich der Rauch ansammelt, wird durch den vom Brandherd ausgehenden Rauchgasstrom von der Decke separiert. Schmelzlotelemente können dazu verwendet werden, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auszulösen um die obere Rauchschiicht zu entfernen bzw. um Sprinkler auszulösen. Weiterhin ermöglicht das Programm die Untersuchung des Auslöseverhaltens bei zusätzlichem Einbau von Rauchschürzen. Die auftretenden Temperaturen und Gasgeschwindigkeiten hängen hierbei vom radialen Abstand vom Brandherd und vom vertikalen Abstand von der Decke ab. In der oberen Rauchschiicht wird eine konstante Dichte und konstante Temperatur angenommen. Der Brand kann entweder durch eine zeitabhängige Wärmefreisetzung und einem Brandherd mit konstantem Durchmesser oder durch einen mit variablem Durchmesser und flächenspezifischer Wärmefreisetzung dargestellt werden. Die Berechnung der oberen Rauchschiicht beruht auf der Lösung der Energie- und Massenerhaltungsgleichungen. Berechnet werden die Dicke der Rauchschiicht, deren Temperatur sowie die Temperatur des Auslöseelementes als Funktion der Zeit. Weiterhin wird die Temperatur an der Decke als Funktion des Abstandes vom Brandherd errechnet. Das Programm ist jedoch nicht in der Lage, das Auslöseverhalten

weiterer Schmelzlotelemente nach Löschbeginn zu beschreiben. Es wurde festgestellt, daß gleiche Schmelzlotelemente bei Sprinklern immer später ausgelöst haben als bei Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Die möglichen Ursachen hierfür werden in der Arbeit aufgeführt.

Die Arbeit von **Delichatsios und Mathews /26/** beschreibt die Simulation der aufwärtsgerichteten Flammenausbreitung. Hierbei kann man 4 Bereiche unterscheiden:

1. Aufheizung des noch unverbrannten Brandstoffes
2. Pyrolyse des Stoffes
3. Entzündung der Pyrolysegase
4. Brandausbreitung aufwärts, abwärts oder seitwärts

Die abwärts oder seitwärts gerichtete Brandausbreitung ist langsamer als die aufwärts gerichtete Brandausbreitung. Die aufwärts gerichtete Brandausbreitung stellt daher den kritischsten Fall dar. Das Programm in der bisherigen Form kann die Flammenausbreitung auf einer nichtverkohlenden Wand, z.B. aus Polymethylmethacrylat beschreiben. Die Wand wird hierbei vertikal in Sektionen unterteilt, die durch Wärmeübertragung von der Flamme oder von einer externen Wärmequelle aufgeheizt wird. In jedem Zeitschritt wird hierbei überprüft, ob die Oberflächentemperatur die Zersetzungs-(Pyrolyse-)Temperatur aufgrund der Aufheizung erreicht. Wenn ja, wird die neue Koordinate der Pyrolyse-Front errechnet. Gleichzeitig wird die Menge der Pyrolysegase errechnet, woraus anschließend der bei der Verbrennung entstehende konvektive und radiative Wärmestrom ermittelt wird. Durch die Wand wird ein exponentieller Temperaturabfall über der Dicke angenommen. Für die Beschreibung des Aufheiz- und Pyrolysevorganges ergibt sich ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen. Es wird hierbei u.a. die 1dimensionale Wärmeleitungsgleichung verwendet. Ein wesentlicher Bestandteil der Simulation der nach oben gerichteten Flammenausbreitung ist der Netto-Wärmestrom von den Flammen der bereits brennenden Wand an die noch nicht brennende Wand. Dieser besteht aus dem konvektiven und radiativen Wärmestrom von den Flammen unter Berücksichtigung von Verlusten durch Wärmeabstrahlung von der Wandoberfläche. Die Größe und Verteilung dieser Wärmeströme hängt von

der Verbrennung der Pyrolysegase ab. Diese wiederum bestimmt das Fortschreiten der Flammenfront und die Wärmefreisetzung pro Längeneinheit. Der Wärmestrom durch Strahlung kann bisher noch nicht aus einem Verbrennungsmodell bestimmt werden, daher wird auf experimentell ermittelte Daten zurückgegriffen. Zur Beschreibung der Verteilung der Strahlungswärme auf der Wand gibt es mehrere verschiedene Ansätze, auf die in der Arbeit näher eingegangen wird. Jedoch wird in allen Fällen ein maximaler Strahlungswärmestrom von 60 kW/m^2 (optisch dichter Fall) angenommen. Es wird angenommen, daß die Hälfte der Flammenstrahlung auf die Wand trifft. Bei der Aufheizung wird ein über die gesamte Zeit konstanter oder ein nur in Zeitschritten konstanter Wärmestrom angenommen.

Delichatsios und Saito /27/ stellen Methoden zur Bestimmung der Entflammbarkeitseigenschaften von verkohlenden und nicht verkohlenden Stoffen vor, die als Eingangsdaten für das in /26/ beschriebene Simulationsprogramm notwendig sind. Bei verkohlenden Stoffen entsteht bei der Pyrolyse neben den Pyrolysegasen ein verkohltes Restprodukt. Bei nichtverkohlenden Stoffen entstehen nur die Pyrolysegase. Ein Unterschied zwischen diesen beiden Stoffgruppen besteht darin, daß bei nichtverkohlenden Stoffen die Oberflächentemperatur nach Pyrolysebeginn konstant ist, während bei verkohlenden Stoffen dagegen die Oberflächentemperatur zunimmt, wodurch auch die Wärmeabstrahlungsverluste beträchtlich ansteigen. Dieses hat wiederum Einfluß auf den Pyrolysevorgang. In der Arbeit werden die Eigenschaften und Kenngrößen, die für das Aufheizen, die Pyrolyse und die Entzündung der Stoffe verantwortlich sind (z.B.: Dichte, spezifische Wärmekapazität, spezifische Verdampfungsenthalpie), für diese beiden Gruppen aufgeführt, sowie Kenngrößen, die bei der Verbrennung von Bedeutung sind (z.B. Rauchgaszusammensetzung, Heizwert). Weiterhin werden die Meßmethoden angegeben, wie diese bestimmt werden können.

Nach **Delichatsios /28/** ist die Kenntnis der Luftansaugung durch den Brand notwendig, um die Dicke der Rauchsicht unter der Decke bestimmen bzw. um Rauchabzüge bemessen zu können. Bei

Lachenbränden wurde festgestellt, daß im Bereich der Flammen die Luftansaugung unabhängig von der Wärmefreisetzung, dagegen aber vom Lachendurchmesser und der Entfernung von der Lachenoberfläche abhängig ist. Für diesen Fall werden empirische Werte in der Arbeit angegeben. Oberhalb des Flammenbereiches ist die Luftansaugung \dot{m} vom konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_{konv} , der Höhe z über dem Brandherd, der Erdbeschleunigung g sowie den Eigenschaften der umgebenden Luft, wie Temperatur T_{∞} , Dichte ρ_{∞} und spezifische Wärmekapazität C_p abhängig. Es gilt für diesen Bereich die Gleichung

$$\dot{m} = C \frac{\dot{Q}_{\text{konv}}^{1/3}}{(\rho_{\infty} \cdot C_p \cdot T_{\infty} \cdot g)^{2/3}} z^{5/3}$$

Der Faktor C beträgt 0,21 und ist unabhängig von der Dichte. In der Arbeit wird weiterhin ein Berechnungsverfahren erläutert, um die Luftansaugung bei Lachenbränden in den unterschiedlichen Bereichen des Flammen-/Rauchgasbereiches und bei unterschiedlichen Froude-Zahlen zu berechnen. Die Berechnungsvorschrift zur Berechnung der Froude-Kennzahl wird in der Arbeit angegeben.

Friedman /29/ gibt eine Zusammenstellung von 62 Programmen aus 10 Ländern zur Simulation der Brandbekämpfung. Hierbei kann man unterscheiden zwischen Raumbrandmodellen, Brand/Sprinkler-Modellen sowie Unterprogrammen zur Berücksichtigung der Brandbelastung von Bauteilen, der Evakuierung von Gebäuden, des Auslöseverhaltens von Brandmeldern, der Brandausbreitung auf einer Wand und der Rauchausbreitung. Die Rohrnetzrechnung bei Sprinklern wurde nicht in die Betrachtung mit eingeschlossen. Eine große Anzahl der Programme ist auf Personal Computern lauffähig. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Zonenmodelle. Weiterhin werden Feldmodelle aufgeführt. Ein Feldmodell ist 2- oder 3dimensional und unterteilt den interessierenden Raum in eine große Anzahl von Elementen. Feldmodelle erfordern, abgesehen von sehr vereinfachten Modellen, Rechner, die die Leistungsfähigkeit eines PC um ein Vielfaches überschreiten. Zum Teil sind hier erst die schnellsten verfügbaren Rechner sinnvoll. Ein Zonenmo-

delles wird meistens 1dimensional behandelt und unterteilt den interessierenden Raum in mehrere Zonen. Der Hauptvorteil eines Feldmodells gegenüber einem Zonenmodell ist, daß bei ersterem die Berechnung des Strömungsfeldes möglich ist. Der Hauptvorteil eines Zonenmodelles liegt darin, daß durch dessen relative Einfachheit die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen im Rahmen vertretbarer Rechenzeiten möglich ist. Des weiteren lassen sich Zonenmodelle leichter in anderen Programmen integrieren als Feldmodelle. Bei allen Programmen ist eine genaue Kenntnis der Wärmefreisetzung des Brandes zur Festlegung der Anfangsbedingungen erforderlich. Gegenwärtig sind weder Feld- noch Zonenmodelle in der Lage gewisse Merkmale von Bränden im Zusammenhang mit dem Verbrennungsprozeß und den Turbulenzerscheinungen hinreichend zu beschreiben. Es werden 3 Modelle aufgeführt, die sich mit den Wechselwirkungen von Sprinklern mit einem Brand beschäftigen. Friedman kommt zu dem Urteil, daß diese Programme die Problematik sehr vereinfacht darstellen. Keines dieser Programme behandelt in hinreichender Form die Wechselwirkungen der aufsteigenden Gase im turbulenten Rauchgas-/Flammenbereich eines Brandes mit herabfallenden Wassertropfen bei gleichzeitiger Lufteinsaugung. Das Ziel hierbei ist, die kritischen Bedingungen, unter denen die Tropfen den Rauchgas-/Flammenbereich durchdringen und den Brandherd erreichen können, zu bestimmen. Bei der Entwicklung von Raumbrandmodellen gilt es bezüglich der für die Berechnungen erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen folgendes zu beachten:

Die Geometrie des Brandraumes sowie der Einfluß von und auf angrenzende Räume ist von großer Bedeutung. Falls es sich um einen unregelmäßigen Raum, z.B. mit gewölbter Decke, mit langem Gang mit und ohne Krümmung oder mit offenem Treppenhaus handelt, kann dieses durch ein Feldmodell besser beschrieben werden als durch ein Zonenmodell. Für die begrenzenden Flächen, wie Wände oder Decken müssen hierbei die thermodynamischen Eigenschaften bekannt sein. Weiterhin müssen der Ort des Brandherdes bzw. der Brandherde im Raum sowie die Ventilationsbedingungen spezifiziert werden. Dieses hat einen erheblichen Einfluß auf die Brandausbreitung. Neben dem Raum ist die Beschreibung des Brandes von entscheidender Bedeutung. Hierbei bestehen die

Möglichkeiten, daß im einfachsten Fall ein Brand definierter Größe zu einer bestimmten Zeit beginnt und eine vorgegebene Zeit bei einer konstanten Wärmefreisetzung andauert. Hierbei ist die Kenntnis der umgesetzten Luftmenge und die entstehende Brandgasmenge wichtig. Die nächste Stufe ist die Eingabe der Wärmefreisetzung als Funktion der Zeit. Realistischer ist jedoch der Fall, wenn der Abbrand gemäß der Verminderung des Sauerstoff-Gehaltes in der Umgebung des Brandes gesteuert wird. Hierbei spielt das Absinken der Rauchgasschicht und die Mischung der eingesaugten Luft mit den Brandgasen eine wichtige Rolle. Im Realfall wechselt der Brand bei hinreichender Sauerstoffreduzierung vom Flammen- zum Schwelbrand. Dies hat einen viel geringeren Sauerstoff-Bedarf zur Folge, so daß der Sauerstoffgehalt in der Luft wieder ansteigt und wieder ein Flammenbrand entstehen kann. Dieser Vorgang kann von einem Computer nur dann hinreichend beschrieben werden, wenn die Kriterien für den Übergang von einem zum anderen Zustand rechnerisch berücksichtigt werden. Durch die Mischung der Verbrennungsprodukte mit der Luft wird die Temperatur der Luft erhöht, was wiederum wieder einen Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit hat. Die Wärmerückstrahlung durch den Raum auf die brennende Oberfläche z.B. von der heißen Rauchsicht, der Decke, den Wänden und den Flammen selbst haben ebenfalls einen Einfluß auf die Brandausbreitung.

Bei der numerischen Simulation bestehen folgende Ungenauigkeiten:

- Die Wärmestrahlung hängt von der 4. Potenz der Temperatur ab. Hierdurch ergeben kleine Fehler bei der Berechnung der Temperatur der heißen Rauchgase oder der Decke viel größere Fehler bei der Berechnung der Wärmestrahlung.
- Die Temperatur der oberen heißen Rauchgasschicht ist stark von der vom Brand angesaugten Luft und den Wärmeverlusten an die Decke abhängig. Keiner dieser Parameter kann mit großer Genauigkeit berechnet werden. Dies trifft besonders auf das Zonenmodell zu.
- Der Rauch emittiert nicht nur, sondern absorbiert und streut auch die Strahlung. Der kältere Rauch unterhalb des heißen Rauches beeinflusst die von oben kommende Strahlung.
- Die Berücksichtigung der Winkelverhältnisse zwischen den

Strahlungsquellen und Strahlungsempfängern erfordert einen erheblichen mathematischen Aufwand.

- Die Strahlungseigenschaften vom Rauch, den Flammen, der Decke und sonstigen Flächen müssen bekannt sein.

- Einfache Zonenmodelle berücksichtigen nicht, daß der Bereich direkt über dem Brand viel wärmer als die weiter entfernten Bereiche, besonders bei großen Räumen ist. Feldmodelle sind hierzu prinzipiell in der Lage, jedoch besteht hierbei die Komplexizität, daß jedes der Vielzahl von Elementen Strahlung mit den übrigen Elementen austauschen kann. Aus diesen Gründen ist die korrekte Beschreibung der Vergrößerung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit durch den Strahlungseinfluß sehr schwierig. Neben der Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit aus Großbrandversuchen besteht die Möglichkeit aus Kleinbrandversuchen Kenntnisse über die Eigenschaften der Brandstoffe zu gewinnen, z.B. Zündzeitpunkt, Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und Abbrandgeschwindigkeit bei kleinen Probekörpern als Funktion der Wärmestrahlung und des Sauerstoffgehaltes. Hieraus kann dann mit einem halbempirischen Modell auf einen größeren Maßstab hochgerechnet werden. Auch kann mit diesen Basisdaten ein wissenschaftliches Modell im Gegensatz zu einem empirischen für die Beschreibung eines Raumbrandes im Großmaßstab entwickelt werden. Es müssen z.B. folgende zusätzliche Kenngrößen für die nach oben gerichtete Flammenausbreitung auf einer verkohlenden Oberfläche bekannt sein:

- Zündquelle (Intensität, Größe, Dauer)
- Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität des unverbrannten und des verkohlten Brandstoffes
- Oberflächentemperatur der pyrolysierenden Oberfläche
- Reflexion der Oberfläche
- Verdampfungswärme
- Verbrennungswärme der Pyrolysegase
- Effektivität der Verbrennung
- Strahlungswärme der Flammen
- stöchiometrisches Luft/Brandstoff-Verhältnis
- Anteil der giftigen und korrosiven Gase in den Verbrennungsprodukten

Weiterhin müssen die unterschiedlichen Verbrennungswärmen beim

verkohlten Stoff und bei den Pyrolysegasen berücksichtigt werden. Große Unterschiede ergeben sich auch bezüglich des Abbrandverhaltens von aus mehreren Stoffen zusammengesetzter Brandlast. Hieraus ergibt sich, daß die Abbrandgeschwindigkeit als eine Anfangs- und Randbedingung für die numerische Simulation der am schwierigsten zu bestimmende Faktor in einem Modell ist.

Wichtig für die numerische Simulation ist auch die Kenntnis folgender Einflußfaktoren:

- Bildung von Kohlenmonoxid bei unvollständiger Verbrennung
- Luftansaugung durch den Brand
- Vermischung der heißen und kalten Luftschichten
- Wärmeverluste an die Decke mit zunehmendem Abstand von der Brandherdachse
- Zerbersten von Fenstern während des Brandes
- Rauchbewegung bei unterschiedlicher Raumform
- Strömung durch Belüftungsöffnungen
- Zündbedingungen für brennstoffreiche Verbrennungsprodukte beim Kontakt mit Frischluft
- Wirkung der Verbrennungsprodukte auf Menschen

Die Modelle liefern u.a. folgende Werte als Funktion der Zeit:

- Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Positionen
- Konzentration des Rauches, des Sauerstoffes und giftiger bzw. korrosiver Gaskomponenten an verschiedenen Positionen
- Thermische Belastung von Bauteilen
- Schäden durch Korrosion infolge des Brandrauches an Bauteilen
- Auslösezeiten von Sprinklern und Brandmeldern bzw. Effektivität dieser Anlagen
- Auslegung von Fluchtwegen

Friedman kommt zu dem Schluß, daß ein Modell einen realen Brand aus fünf möglichen Gründen nicht vollständig beschreiben kann :

1. Die im Modell verwendeten Idealisierungen und Vereinfachungen weichen beträchtlich von der Realität ab.
2. Die Eingabeparameter sind nicht exakt.
3. Keine korrekten Näherungswerte für Koeffizienten innerhalb

des Programmes.

4. Fehlerhafte Berechnung von Werten infolge zu großer Zeitschritte bzw. zu großer Maschenweite beim Finite Elemente-Verfahren oder mathematischer Instabilitäten.
5. Fehlerhafte oder nichtreproduzierbare Meßwerte aus experimentellen Untersuchungen.

Um die Gültigkeit eines Modelles zu überprüfen, ist der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Ergebnissen aus Brandversuchen erforderlich. Hierdurch ist es möglich, ein Modell in Übereinstimmung mit den Meßwerten zu bringen. Gleichzeitig ergibt sich jedoch die Frage, ob das Modell unter anderen Bedingungen weiterhin seine Gültigkeit behält. Ein Modell ist dann überzeugend, wenn es für eine große Anzahl von Brandversuchen unter den unterschiedlichsten Randbedingungen und dem geringsten Aufwand für die Anpassung zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Jedoch ist es riskant, die überprüften Randbedingungen sehr stark zu modifizieren. Wichtig ist hierbei, durch eine Fehlerabschätzung die Abweichung der Rechenergebnisse von den Versuchsergebnissen zu kennen und zu wissen, unter welchen Randbedingungen die größten Fehler auftreten.

Hasemi /30/ beschreibt in seiner Arbeit ein Modell zur Beschreibung der nach oben gerichteten turbulenten Flammenausbreitungsgeschwindigkeit an einer vertikalen brennbaren Oberfläche. Bei diesem Modell wird eine 1dimensionale Flammenausbreitung über der Höhe und eine 1dimensionale Wärmeleitung senkrecht zur Oberfläche angenommen. Ein Grundgedanke ist die Berechnung des Fortschreitens der Pyrolyse-Front. Diese ist gekennzeichnet durch Aufheizen des Feststoffes auf Zündtemperatur. Bei den Untersuchungen wurden Versuche mit einem Reihenbrenner an einer mit Kühlwasserschlangen thermostatisierten Wand mit schwarzer Oberfläche durchgeführt, um die Beziehungen zwischen der Flammenausbreitung und den Brandstoffeigenschaften herauszufinden. Gemessen wurde u.a. der Gesamtwärmestrom mit Wärmeflußaufnehmern vom Typ Gardon. Das Flammenverhalten wurde an Hand von Video-Aufnahmen ausgewertet. Es wurde u.a. herausgefunden, daß die Flammenlänge als eine Potenzfunktion der

längenbezogenen Wärmefreisetzung dargestellt werden kann.

Heskestad und Delichatsios /31/ berichten über neue Korrelationen für die Deckenströmung eines Brandes, dessen Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit einem Zeit^2 -Gesetz gehorcht. Die Grundlage hierfür ist die zeitliche Wärmefreisetzung bei Holz. Zusätzlich wurden die Beziehungen so gestaltet, daß diese auch für andere, von Holz verschiedene Stoffe verwendet werden können.

Hoffmann und Galea /32/ haben ein Feldmodell zur Berechnung der Wechselwirkungen eines Sprinklers mit einem Brand entwickelt. Zunächst gehen die Autoren auf bereits existierende Programme und deren Eigenschaften ein. Das Modell besteht aus einem Satz nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, die die Strömung, den Wärme- und Stofftransport sowie die Volumenanteile der beiden in Wechselwirkung stehenden Phasen (Tropfenschwarm, Gasphase) beschreiben. Die Wärmequelle, die den Brandherd simuliert, erzeugt eine starke auftriebsbehaftete turbulente Strömung, die die Diffusions- und Impulstransportprozesse sowie das Mischen der beiden Phasen steuert. Der Tropfenschwarm stellt die 2. Phase dar, die mit der Gasphase in Wechselwirkung tritt. In diesem System müssen bei der Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems für die 4 unabhängigen Variablen Breite, Höhe, Länge und Zeit die jeweiligen Geschwindigkeiten in der Gas- und Tropfenphase, die Drücke, die Enthalpien und die Konzentrationen berechnet werden. In der Arbeit werden die Berechnungsergebnisse mit realen Brandversuchen verglichen, wobei zum einen ein Brand in der Ecke eines Büroraumes, zum anderen der Brand eines Bettes in einem Krankenzimmer untersucht wird. Für die Berechnungen ergaben sich bei der Verwendung eines Minicomputers enorme Rechenzeiten bis zu 9 Tagen CPU-Zeit. Es wird hierbei auf die Möglichkeit der Verwendung von Parallelrechnern verwiesen, deren Anwendung jedoch für die meisten Benutzer zu teuer ist. In der Arbeit wird darauf hingewiesen, daß weitere Untersuchungen notwendig sind, um den Effekt des Volumenstromes, der Tropfengröße und der Wechselwirkungen des Wassersprühnebels mit den Rauchsichten zu erforschen. Ferner spielen die chemischen Reaktionen zwischen der flüssigen Phase

und den verschiedenen Komponenten der gasförmigen Phase eine Rolle.

Für die Simulation der Wechselwirkungen von Wassertropfen mit den auftriebsbehafteten Gasen eines Brandes sind nach Jackman, u.a. /33/ detaillierte Kenntnisse über die mittlere Tropfengröße, die Tropfengrößenverteilung sowie die Tropfengeschwindigkeit und die Tropfenbahnkurven erforderlich. Die Verfasser gehen auch auf frühere Untersuchungen anderer Autoren ein. Hier wurde z.B. von You /34/ festgestellt, daß kleine Tropfen dazu tendieren, sich im Kernbereich des Sprühkegels aufzuhalten. Die Tropfengröße steigt mit der radialen Entfernung. Weiterhin wurde festgestellt, daß mit zunehmendem Düsendurchmesser bei konstantem Druck die Tropfengröße zunimmt. Bei den durchgeführten Untersuchungen erwies sich die Tropfengeschwindigkeit in zwei vertikalen Entfernungen vom Sprinkler als konstant. Es wurde erkannt, daß der Sprühkegel nicht durch einen einzigen Meßpunkt, sondern nur durch Messungen an verschiedenen Stellen beschrieben werden kann. Für die Messungen wurde ein synchronisierter Metalldampf-Laser sowie eine Hochgeschwindigkeits-Filmkamera verwendet. Auf die verwendete Meßtechnik wird in der Arbeit ausführlich eingegangen. Weiterhin werden die untersuchten Sprinklertypen aufgeführt. Bei den Untersuchungen wurde u.a. festgestellt:

- 1) Bei Entfernungen größer oder gleich 0,15 m vom Sprinkler sind die meisten Tropfen kugelförmig.
- 2) Unterhalb dieser Entfernung, besonders am Ort der Tropfenentstehung treten viele Unregelmäßigkeiten auf, z.B.
 - Deformation, Oszillation und Rotation der Tropfen
 - Vereinigung von 2 oder mehreren Tropfen

Tropfenkollisionen und Tropfenzerteilungen wurden im gesamten Sprühkegel beobachtet. Bei 0,15 m wurde festgestellt, daß große Tropfen auf kleinere Tropfen auftreffen und ein Tropfen davon in zwei Teile zerfällt. Es wird in der Arbeit jedoch keine Aussage darüber gemacht, welcher der beiden Tropfen in zwei Teile zerfällt. Die Wahrscheinlichkeit für die Zerteilung beträgt 1 zu 1800. Es wurde beobachtet, daß der Hauptteil der Tropfen sich in

einer Richtung entsprechend der Einsprühwinkel nach unten bewegen. Einige Tropfen im Kernbereich des Sprühkegels kehren ihre Bewegungsrichtung wieder in Richtung Sprinkler um. Andere Tropfen bewegen sich quer zur Hauptströmung vom Sprinkler weg. Diese Tropfen sind relativ klein mit einem Durchmesser im Bereich von 200 μm und haben eine relativ kleine Geschwindigkeit, einen relativ kleinen Impuls und kleine Re-Zahlen. Im Bereich direkt unterhalb des Sprinklers befindet sich ein Unterdruck und ein Einströmen von Tropfen, am äußeren Rand des Sprühkegels kommt es zum Ausströmen bedingt durch einen Unterdruck an der Decke. Das Strömungsfeld verändert sich über dem Umfang des Sprinklers bedingt durch die Verzahnung des Deflektors. Weiterhin ist dieses Strömungsfeld vom Sprinklertyp abhängig. In der Arbeit wurden 8 verschiedene Sprinkler untersucht und miteinander verglichen. Es wurde festgestellt, daß bei den zahlreich durchgeführten Messungen keine 2 der Tropfenverteilungen identisch waren. Es wurden sowohl volumen- als auch anzahlbezogene Verteilungen ermittelt. Es wird darauf verwiesen, daß der anzahlbezogenen Verteilung den Vorzug gegeben wird, da mittlere Tropfendurchmesser, die aus der volumenbezogenen Verteilung errechnet werden, wie z.B. mittlerer Durchmesser (volume mean diameter), Rosin-Rammler Durchmesser und Sauter-Durchmesser sehr stark von einigen wenigen großen Tropfen beeinflußt werden. Die gemessenen Tropfengeschwindigkeiten lagen im Bereich zwischen 0,1 m/s und 11 m/s, jedoch wurden bei einem Sprinkler auch 20 m/s bei einem Druck von 2 bar gemessen. Die Tropfenmessungen wurden in den Entfernungen 0,15 m, 0,3 m, 0,5 m und 2 m vom Sprinkler bei den Drücken 0,5 bar, 1,0 bar und 2,0 bar durchgeführt.

Jackman, u.a. /35/ haben ein Programm entwickelt, um die Wechselwirkungen von Wassertropfen mit Brandgasen zu untersuchen, um damit Aussagen über die Auslegung und die Funktionsweise von Brandbekämpfungssystemen treffen zu können. Das Programm berechnet den Wärmestrom aus den Brandgasen, die Rauchausbreitung, die physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften der Tropfen, die verdampfte Wassermasse, die Wasserverteilung auf dem Boden, der Einfluß des Sprühnebels auf die Rauchgasströmung sowie die Änderung der Gaseigenschaften in den

Volumenelementen des Rauchgasbereiches. Für die dreidimensionale Beschreibung des Sprühnebels wird ein zylindrisches Koordinatensystem verwendet. Am Sprinklerdeflektor kann zwischen 1 und 360 Einsprühpunkten über dem Umfang gewählt werden, wobei aber die Zahl 36 generell verwendet wurde. Der Sprühnebel kann homogen (gleiche Anfangswerte für alle Tropfen) oder inhomogen (für jede Winkelposition am Deflektor unterschiedliche Anfangswerte) betrachtet werden. Im vorliegenden Fall wird ein inhomogener Sprühnebel betrachtet, bei dem in 10° -Schritten verschiedene Anfangswerte verwendet werden. Für die Anfangsgeschwindigkeit der Tropfen wird die Austrittsgeschwindigkeit an der Sprinklerdüse angenommen, obwohl den Autoren bewußt ist, daß es zu einer Veränderung dieser Geschwindigkeit durch das Auftreffen auf den Deflektor und die Tropfenbildung kommt. In der Arbeit wird auf die Beschreibung der Geschwindigkeitsprofile der auftriebsbehafteten Rauchgasströmung näher eingegangen. In der Impulsbilanz zur Beschreibung der Tropfenbewegung werden die Gewichtskraft und die Widerstandskraft angenommen. In der Wärmebilanz für den Tropfen wird nur der konvektiv zugeführte Wärmestrom betrachtet. Der Wärmestrom durch Strahlung wird vernachlässigt, da von **Chen und Trezek /36/** festgestellt wurde, daß selbst unter extremen Bedingungen die Strahlungswärme nur ca. 9% des Gesamtwärmestromes beträgt. Die verdampfte Wassermenge der Tropfen ist abhängig vom Gesamtstoffübertragungskoeffizienten. Dieser setzt sich aus dem tropfenseitigen und gasseitigen Stoffübertragungskoeffizienten zusammen. Der gasseitige Stofftransport wird durch die Gleichung von **Ranz und Marshall /37/** beschrieben. Der tropfenseitige Stofftransport hängt vom Verhalten der Flüssigkeit innerhalb des Tropfens ab, z.B. ob innere Zirkulationen vorliegen. Hierfür werden in der Arbeit weiterführende Literaturstellen angegeben. Die Wechselwirkungen zwischen den Tropfen und der Gasphase werden dadurch berücksichtigt, daß durch den Kühleffekt der Tropfen die Dichte der heißen Gasphase zunimmt und die Gasgeschwindigkeit entsprechend abnimmt. Die Gasgeschwindigkeit wird ebenfalls durch den Impuls der Tropfen, die durch den Gasstrom fliegen, beeinflusst. Das Programm ermittelt außer den Temperatur- und Geschwindigkeitsprofilen und der an den Sprinkler übertragenen Wärme auch

Parameter, die das Tropfenschicksal beschreiben, wie:

- verdampfter Anteil
- Erreichen der Decke oder Verlassen des vordefinierten Volumenelementes an dessen Oberseite
- Erreichen einer Wand
- Erreichen des Bodens oder Verlassen des vordefinierten Volumenelementes an dessen Unterseite
- Verlassen der Gasströmung
- Zirkulation des Tropfens innerhalb des Volumenelementes (Annahme: nach 4 s hat der Tropfen keine der vorgenannten Grenzen erreicht)

Anhand von Beispielen werden in der Arbeit einige Berechnungsergebnisse erläutert. Bei den Berechnungen wurden 87 % bis 88,5 % der Tropfen ermittelt die den Fuß der Rauchschrift erreichten, 11,5 % bis 13 % der Tropfen verdampfen und 10 kW bis 25 kW wird an Wärme von der Gasphase an die Tropfen übertragen.

Alpert und Ward /38/ stellen einige Basiskonzepte zur Beschreibung des Brandverhaltens in der Abwesenheit von Sprinklern vor. Zusätzlich werden einige Gleichungen bereitgestellt, um die Schäden bei Metallkonstruktionen abschätzen zu können. Es wird darauf verwiesen, daß bei einem Brand ein kleiner Teil der freigesetzten Wärme wieder zurück an den Brandstoff übertragen wird. Ein Brand wird nur dann aufrechterhalten, wenn die Entstehung brennbarer Gase durch den Wärmestrom gewährleistet ist. Die Ausbreitung eines Brandes erfolgt dann, wenn zusätzlich Wärmeenergie an noch nicht brennende Brandlastoberflächen übertragen wird und es hier zur Entstehung brennbarer Gase kommt. Löschwasser wäre in der Lage diese Wärme zu absorbieren und damit die Entstehung brennbarer Gase zu verhindern.

Die Wärmeübertragung der Flammen zurück an die Brandlast erfolgt durch Wärmeleitung (Übertragung der Wärme durch direkten Kontakt), Wärmestrahlung (Übertragung der Wärme durch elektromagnetische Wellen) und Konvektion (Übertragung der Wärme über die Gasphase). An einer vertikalen brennenden Oberfläche ist im unteren Bereich nahe dem Boden (im Bereich unterhalb einer Höhe von 150 mm bis 250 mm) die konvektive Wärmeübertragung an die

Brandlast dominierend, oberhalb dieses Bereiches die Wärmestrahlung. Die Zunahme der Wärmestrahlung im oberen Bereich beruht u.a. auf den dicker werdenden Flammen aufgrund der Ansammlung von Brennstoffdampf und der Ansaugung von Luft aus dem unteren Bereich. Es wurde festgestellt, daß bei der Flammenausbreitung an einer vertikalen Oberfläche der Verdoppelungseffekt gilt, d.h. daß die Verdoppelung der Flammenausbreitungsstrecke ungefähr in gleichen Zeitabschnitten erfolgt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist hierbei vom brennenden Material abhängig, d.h. jeder Stoff hat seine eigene Verdoppelungszeit. Das Vorhandensein von weiteren Flammen oder Oberflächen z.B. von gegenüberstehenden Wänden kann diese Verdoppelungszeit herabsetzen, d.h. die Beschleunigung der aufwärtsgerichteten Flammenausbreitung vergrößern. Dies wird in der Arbeit durch den Vergleich der Temperaturverläufe in einem Palettenlager im Freien, bei einer gegenüberliegenden Wand oder in einer Ecke verdeutlicht. Die Temperaturen nehmen in dieser Reihenfolge zu, da der Brand durch die begrenzenden Wände weniger kalte Umgebungsluft ansaugen kann. Falls die Wände und Decken aus brennbarem Material bestehen, wird die Brandausbreitung noch beschleunigt. Die Flammenausbreitung zeigt ein ähnliches, aber weniger vorhersagbares Wachstum, wenn die Flammen auf die Unterseite einer brennbaren Oberfläche, z.B. eine Decke übergreifen. In diesem Fall erfolgt die horizontale Flammenausbreitung schneller. Jede flächenmäßige Vergrößerung führt zu einer stärkeren Wärmefreisetzung und damit schnelleren Brandausbreitung.

Ein weiterer Fall liegt vor, wenn sich die Flammen auf einer horizontalen Oberfläche ausbreiten. Die feste Oberfläche bildet durch die Wärmeeinwirkung aus der Verbrennungszone brennbare Gase, die sich entzünden, wenn bei ausreichendem Sauerstoffgehalt die Zündtemperatur erreicht wird. Dieser Prozess der kriechenden Flammenausbreitung ist sehr stabil.

Bei einem Lachenbrand von ca. 15 cm sind Wärmestrahlung und Konvektion ungefähr zu gleichen Teilen für die Entstehung brennbarer Gase verantwortlich. Bei größeren Lachendurchmessern bis 1 m nimmt der Einfluß der Wärmestrahlung kontinuierlich zu.

Bei noch größeren Lachendurchmessern ist die Wärmestrahlung der dominierende Mechanismus für die Verdampfung, jedoch ist dann die Wärmeübertragung durch Strahlung je Flächeneinheit unabhängig von der Lachengröße.

Weiterhin wird in der Arbeit auf den "flashover" eingegangen. Die entzündete Brandlast brennt zunächst so, als ob sie sich im Freien befände und die Brandausbreitung ist zunächst auf die eigene Oberfläche und evtl. sehr nahe Gegenstände beschränkt. Innerhalb kurzer Zeit wird die Brandausbreitung durch die Raumbegrenzungen beeinflusst. Es bildet sich eine heiße Rauchschiicht an der Decke, wodurch sich die Decke aufheizt. Diese Gasschiicht und die aufgeheizte Decke strahlen nun Wärmeenergie auf den übrigen Rauminhalt ab was zur Entstehung weiterer brennbarer Gase führt. Die nahezu gleichzeitige Entzündung des gesamten Rauminhaltes wird "flashover" genannt. "Flashover" treten vorwiegend in kleineren Räumen, insbesondere Wohnräumen auf, weniger dagegen in großen Räumen wie z.B. Hörsälen bedingt durch die geringe Konzentration von Brandlast und die relativ schnelle Abkühlung der heißen Rauchgase an den großen Flächen wie Decken und Wände. Weiterhin bedingt die hohe Deckenhöhe eine verstärkte Wärmeabgabe der heißen Rauchgase an die relativ kalte Umgebung. Die Wärmestrahlung auf die brennbaren Materialien am Boden wird ebenfalls durch den großen Abstand zwischen heißer Rauchschiicht und dem Bodenbereich verringert.

In der Arbeit werden einige empirische Gleichungen zur Abschätzung brandschutztechnischer Kenngrößen angegeben:

- Bestimmung der maximalen Temperatur an einer Decke als Funktion der Wärmefreisetzung, der Höhe und des Einflusses von Wänden
- Wärmestrom durch Strahlung als Funktion des gesamten freigesetzten Wärmestromes und des Abstandes
- Konvektiver Wärmestrom als Funktion des gesamten freigesetzten Wärmestromes und des Abstandes
- Branddauer als Funktion der Brandlastmenge, der Wärmefreisetzung und der spezifischen Verbrennungswärme
- Aufheizzeit für Stahlkonstruktionen

Weiterhin werden Tabellen angegeben, die z.B. Auskunft geben über die zeitliche Wärmefreisetzung einiger Materialien z.B. Holzpaletten, Polystyrol etc.

Von **Kokkala /39/** wurden Löschversuche an 10 brennbaren Flüssigkeiten mit Flammpunkten zwischen -6°C und $+234^{\circ}\text{C}$ mit 7 verschiedenen Sprinklern und Düsen durchgeführt. Unter den brennbaren Flüssigkeiten befanden sich verschiedene Alkohole und Öle. Die Größe der kreisförmigen Lachen wurde zwischen $0,4\text{ m}^2$ und 12 m^2 und die Düsenhöhe zwischen 3 m und 8 m variiert. Der Abbrand wurde durch eine Abbrandwaage ermittelt. Die Wasserbeaufschlagung wurde mittels 49 zylindrischer Kunststoffbehälter (Durchmesser: 295 mm) ermittelt, die symmetrisch auf einer Fläche von $3\text{ m} * 3\text{ m}$ unter den 4 Sprinklerdüsen angeordnet wurden. Der Abstand Behältermitte/Behältermitte betrug 0,5 m. Die Versuche wurden in einer Versuchshalle mit 380 m^2 Grundfläche durchgeführt. Die maximale Ventilationsrate im Raum betrug $30\text{ m}^3/\text{s}$. Die 4 Sprinklerdüsen wurden quadratisch mit einem Abstand von 2,1 m oder 3,0 m über dem Brandherd angeordnet.

Die Löschwirksamkeit von Wasser bei derartigen Bränden beruht auf den Effekten der Oberflächenkühlung, dem Ersticken durch Dampf, der Emulgierung sowie der Verdünnung. Die Löschwirksamkeit hängt weiterhin von den Brennstoffeigenschaften, den räumlichen Verhältnissen und den Eigenschaften des Sprühnebels ab. Zu den Brennstoffeigenschaften zählen der Flammpunkt, der Dampfdruck, die Dichte, die Viskosität sowie die Wasserlöslichkeit. Zu den Eigenschaften des Sprühnebels zählen der Volumenstrom, die Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilung sowie die Wassertemperatur. In der Arbeit finden sich nähere Angaben zu den Eigenschaften der Sprinklerdüsen, den Lachenabmessungen, den Brennstoffeigenschaften, den Löschzeiten, der Strömungsgeschwindigkeit der Luft, den Flammenformen, den ermittelten Wasserbeaufschlagungen, den Lachenoberflächentemperaturen während des Löschens. Es wurde festgestellt, daß die Hauptursache für den Löscherfolg die Kühlung des Brennstoffes auf eine Temperatur unterhalb des Brennpunktes ist. Flüssigkeiten mit Flammpunkten $> 60^{\circ}\text{C}$ und einem Siedepunkt nahe 220°C konnten zuver-

lässig gelöscht werden. Bei niedrigeren Flammpunkten ist die Kühlwirkung durch die Tropfen und die Bildung von Wasserdampf nicht so effektiv. Diese Flüssigkeiten können nur durch Wegblasen der Flammen von der Brennstoffoberfläche gelöscht werden. Es wurde weiterhin festgestellt, daß es für die Löschwirksamkeit von Nachteil sein kann, wenn der Abstand zwischen Lache und Sprinkler sehr groß ist und die großen Tropfen ein Aufsprudeln bewirken. In einigen Fällen erloschen die Flammen, sobald das Wasser abgestellt wurde. Die Löscheffektivität einer Löschdüse hängt nicht nur von der erzielten Wasserbeaufschlagung, sondern auch vom Düsentyp und den Eigenschaften des damit erzeugten Tropfenschwarmes ab. Es wird daraufhingewiesen, daß die ermittelten Versuchsergebnisse als Eingangsdaten für die numerische Simulation nur bedingt brauchbar sind, da u.a. keine genauen Daten über die Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen vorlagen.

Kortt und Fleck /40/ haben die Löscheffektivität von Löschwasser untersucht. Ein Brand wird durch die Kühlwirkung des Wassers gelöscht. Wasser nimmt aus der Umgebung bzw. vom brennenden Stoff Wärme auf und kühlt diesen dadurch ab. In der Arbeit wurden verschiedene Strahlrohre incl. Hochdruckstrahlrohre bezüglich der Tropfengrößenverteilung mit der Laser-Doppler-Velocimetrie untersucht. Weiterhin wurden Löschversuche an brennbaren Flüssigkeiten (Benzin-Diesel-Spiritus-Gemisch) in einer Brandwanne und an festen brennbaren Stoffen (Holzstapel) durchgeführt. Es wurde u.a. festgestellt, daß mit keinem Strahlrohr die brennende Flüssigkeit gelöscht werden konnte. Mit einem Hochdruckstrahlrohr mit 30 bar Druck konnten die Flammen jedoch stark niedergehalten werden. Der Holzstapel wurde mit den Normaldruckstrahlrohren ebenso schnell gelöscht wie mit dem Hochdruckstrahlrohr mit 10 bar Druck.

In der Arbeit von **Lee /41/** wird über Brand- und Löschversuche im realen Maßstab mit in Metallregalen auf Holzpaletten gelagerten Wellpappkartons berichtet. Diese Lageranordnung bewirkt eine beschleunigte Flammenausbreitung nach der Zündung. Es wurden hierbei die Lagerhöhen 3,0 m, 4,5 m, und 6,0 m untersucht. Die

Brandlast, der Lageraufbau und die Wasserlöscheinrichtung werden in der Arbeit näher erläutert. Der Abbrand wurde mittels einer Abbrandwaage ermittelt. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Wasserbeaufschlagung wurde eine eigens hierfür konstruierte Löscheinrichtung mit Sprühdüsen verwendet. Diese konnte zu jedem Zeitpunkt ausgelöst werden, um den Sprinklereinsatz bei verschiedenen Stufen der Brandausbreitung zu simulieren. Die Verbrennungsprodukte wurden kalorimetrisch aufgefangen, um die Wärmefreisetzung zu bestimmen. In der Arbeit befindet sich eine Maßskizze dieser Apparatur. Gemessen wurde der Gasstrom, die Temperatur sowie die Gaskomponenten CO_2 , CO , O_2 und Gesamtkohlenwasserstoffe. Das Verfahren zur Bestimmung der Wärmefreisetzung nach dieser Methode wird in der Arbeit von **Heskestad /42/** näher beschrieben. Es wurden die Auswirkungen der Wasserbeaufschlagung, des Ausmaßes des Brandes zum Zeitpunkt des Löscheinsatzes und der Lagerhöhe untersucht. Hierbei wurde eine kritische Wasserbeaufschlagung von $3,0 \text{ g/m}^2\text{s}$ ermittelt unterhalb derer die gesamte Brandlast verbrannte. In Diagrammen wird der konvektive Wärmestrom als Funktion der Zeit und der Wasserbeaufschlagung sowie die Abbrandgeschwindigkeit als Funktion der Wasserbeaufschlagung dargestellt. Gleichzeitig werden empirische Gleichungen angegeben, die die Abbrandgeschwindigkeit als Funktion der Wasserbeaufschlagung beschreiben.

Kohler /43/ beschreibt Brandversuche, die in einer mit neuen Löschanlagen ausgerüsteten Lagerhalle der Firma Sandoz AG in Muttenz durchgeführt wurden. Hierbei handelte es sich um 25 Versuche im natürlichen Maßstab mit Lagergütern auf Paletten, angeordnet sowohl in Blockstapeln als auch in Regalen. Als Brandlast wurden mit Heptan gefüllte Fässer verwendet. Wie die Erfahrung zeigt, würde bei brennbaren Flüssigkeiten, die nicht wasserlöslich sind, das durch Sprinkler eingebrachte Löschwasser die darauf schwimmenden brennbaren Lachen noch verbreitern, was zu einem Versagen der Löschanlage führen würde. In diesem Versuchsprogramm wurden Zusatzmaßnahmen überprüft, die ein derartiges Versagen ausschließen. Es sind dies das Zumischen des filmbildenden Schaummittels AFFF zum Sprinklerlöschwasser oder die zusätzliche Bodenbeschäumung zur Sprinkleranlage mit reinem

Löschwasser. Es konnte der Nachweis erbracht werden, daß ein Feuer in Lägern mit leichtentzündlichen Flüssigkeiten mittels Sprinkleranlagen bis zum Einsatz der Feuerwehr unter Kontrolle gehalten werden kann, sofern dem Wasser AFFF-Löschschaum zugemischt wird und dieses Löschmittel über Decken-, Regal- und/oder Bodenanlagen verschäumt wird.

Pietrzak und Johanson /44/ beschreiben ein Computer-Modell zur manuellen Bekämpfung eines vollentwickelten Raumbrandes nach dem "flashover" (Fire Demand Model (FDM)). Die Rechenergebnisse werden mit experimentellen Daten verglichen. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß, falls ein direktes Löschen des Brandes nicht möglich ist, die Brandkontrolle dadurch verbessert werden kann, wenn ein Sprühnebel mit einer Rosin-Rammler-Tropfengrößenverteilung und einem mittleren Tropfendurchmesser (volume medium drop diameter) im Bereich zwischen 0,15 mm und 0,35 mm verwendet wird. Dies steht in Übereinstimmung mit den den Verfassern zur Verfügung stehenden experimentellen Daten. Es wird gezeigt, daß durch Rauch- und Wärmeabzüge sowie die durch den Sprühnebel beeinflusste Luft-/Gasströmung das Abströmen des heißen Dampfes und der Rauchgase begünstigt und damit die Sicherheit der Feuerwehr erhöht wird. Während des ungehinderten Abbrandes ohne Löscheinsatz hängt das Brandverhalten von den Eigenschaften des Raumes (Abmessungen, Größe und Form der Ventilationsöffnungen, Dicke und Beschaffenheit der begrenzenden Wände) und der Brandlast (Verbrennungswärme, Menge, Oberfläche) ab. Das Brandverhalten wird u.a. beschrieben durch die mittlere Gastemperatur im Raum, die Bodentemperatur, die im Raum verbleibende Wärme und die Abbrandgeschwindigkeit der Brandstoffe. Die Grundlage hierfür ist die Lösung der Wärme- und Stoffbilanz für die Gasphase. Beim Löscheinsatz wird das Brandverhalten durch die Kühlung der Gase und der Oberflächen infolge der Wasserverdampfung, durch die Drosselung der Ventilation durch den Austritt von Dampf sowie durch das Löschen der brennenden Oberflächen beträchtlich verändert. Dies wird von dem Simulationsmodell berücksichtigt. Das Modell berücksichtigt außerdem die durch den Sprühkegel angesaugte Luft.

Pietrzak /45/ beschreibt die Leistungsfähigkeit des bereits in /44/ beschriebenen Modells zur numerischen Simulation der Bekämpfung eines Raumbrandes nach dem "flashover" mit Sprühwasser (Fire Demand Model (FDM)). Diese Berechnungen basieren auf einer Wärme- und Stoffbilanz unter Berücksichtigung der Kühlung der Gasphase und der Oberflächen, des Löschvorganges, der durch den Sprühnebel beeinflussten Luftströmung sowie des Rauch- und Wärmeabzuges. In der Arbeit wird auf die für die Simulation erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen näher eingegangen. Z.B. sind zur Beschreibung des Sprühnebels die Eingabe des Wasservolumenstromes, des Druckes, der Löschzeit, des mittleren Tropfendurchmessers, des Konuswinkels des Sprühkegels, der zu beaufschlagenden Brandlast und anderer Faktoren erforderlich. Die Berechnungsergebnisse werden mit den Ergebnissen aus Brandversuchen verglichen.

Ramachandran /46/ beschreibt ein statistisches Modell zur Abschätzung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der Verdoppelungszeit aus Brandberichten von Feuerwehren. Die Verdoppelungszeit ist die Zeit, in der sich die Größe des Brandes verdoppelt. Das Modell beruht auf der Annahme, daß die geschädigte Fläche beim Brand exponentiell mit der Branddauer zunimmt. Untersucht wurden 8 Gruppen von industriellen Gebäuden (Lebensmittelindustrie, Chemieindustrie, Metallverarbeitung, Meß- und Regeltechnik, Textilindustrie, Holzverarbeitung, Druckereien), drei verschiedene Brandherdflächen (Produktion, Lager, Sonstige) und zwei verschiedene Stadien der Brandentwicklung. Für vier Gruppen von industriellen Gebäuden wurde die Brandausbreitungsgeschwindigkeit im Frühstadium des Brandes für zwei stofflich unterschiedliche Zündquellen untersucht.

Rasbash /47/ untersucht das Löschen von Bränden fester und flüssiger Brandstoffe mit Wasser. Wasser ist zwar normalerweise ein relativ billiges Löschmittel, solange es nicht in sehr großen Mengen benötigt wird bzw. vorgehalten werden muß. D.h. die vorhandenen Wassermengen müssen optimal für den Löschvorgang eingesetzt werden. In dieser Arbeit wird der Halbwertstropfendurchmesser (mass or volume median drop size) als repräsentative

Tropfengröße zur Beschreibung des Wassersprühnebels angenommen. In der Arbeit finden sich Angaben über die flächenspezifischen Wasserströme und die erforderlichen Tropfengrößen zum Löschen von Kerosin u. Benzinbränden sowie Feststoffbränden mit verschiedenen Polymeren und Holz in verschiedenen Formen. Das Löschen von Flüssigkeitsbränden geschieht entweder durch das Löschen der Flammen oder Kühlung des Brandstoffes. Das Löschen der Flammen geschieht durch die Verdünnung der Gasphase mit dem Löschmittel, z.B. N_2 , CO_2 , H_2O -Dampf. Es wurde festgestellt, daß der Grad der Verdünnung, der bei diesen Stoffen für das Löschen erforderlich ist, ausreicht, um die adiabatische Flammentemperatur auf ungefähr Zündtemperatur abzukühlen. Bei Feststoffbränden hat sich herausgestellt, daß die Kühlung der Brandlast die größere Rolle spielt. Hierbei wird der Brandstoff auf eine Temperatur unterhalb des Brennpunktes abgekühlt. In der Arbeit finden sich Angaben über die maximale Kühlwirkung von Wasser, CO_2 und N_2 beim Löschvorgang. Der Autor gibt eine Näherungsgleichung für die Berechnung des zur Kühlung des Brandstoffes notwendigen Entzuges der fühlbaren Wärme pro Flächeneinheit S durch einen Sprühnebel an. Grundlage hierfür ist eine Energiebilanz an der Brandstoffoberfläche unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung.

$$S = (H_f - \lambda_f) \dot{m}'' + R_a - R_s$$

\dot{m}'' = Abbrandgeschwindigkeit pro Flächeneinheit

H_f = Konvektive spezifische Wärmeenergie von den Flammen, ermittelt aus der Abbrandrate

λ_f = Spezifische Wärmeenergie, die unter stationären Bedingungen erforderlich ist, um Zersetzungsgase zu erzeugen.

R_a = andere Formen von Wärmeströmen je Flächeneinheit der Brandstoffoberfläche wie Strahlung von den Flammen, von der Umgebung sowie Wärmeleitung von heißen Metallteilen usw.

R_s = Wärmeverluste von der Oberfläche, die nicht in λ_f enthalten sind, insbesondere Wärmeverluste durch Strahlung

Das Löschen durch Kühlung erfolgt dann, wenn die Kühlwirkung

durch den Sprühnebel größer als der Wert S ist.

Um einen Brand bis zum Brennpunkt abzukühlen, muß der Sprühnebel in der Lage sein, während des gesamten Kühlprozesses von Beginn des Löscheinsatzes bis zum Erreichen des Brennpunktes den vorstehend aufgeführten Wert S zu entziehen. Der Autor bemerkt, daß hierbei die erforderliche Wassermenge beim Feststoffbrand ungefähr konstant ist, wogegen diese bei einem Kerosinbrand bedingt durch die Erniedrigung der Temperatur des Kerosins abnimmt. Die Wärmestrahlung wird während des Kühlprozesses aufgrund der verminderten Abbrandgeschwindigkeit und der damit verbundenen geringeren Flammenhöhe hier ebenfalls reduziert. Es wird darauf hingewiesen, daß beim Löschvorgang beide Vorgänge gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, und zwar zum einen der Wärmeaustausch in der Flamme, der zum Erlöschen führt und zum anderen die Kühlung des Brandstoffes auf den Brennpunkt. Die getrennte Betrachtungsweise stellt die Hauptvereinfachung bei den meisten bisherigen Modellen dar. In der Arbeit finden sich weiterhin experimentelle Untersuchungsergebnisse verschiedener Institutionen zum Abbrand- und Löschverhalten bei Raumbränden.

Rhodes /48/ zeigt einige Prinzipien der numerischen Simulation von Bränden auf. Das einfachste Modell ist das Zonenmodell. Dieses Modell hat jedoch Schwierigkeiten bei der Maßstabsvergrößerung von Bränden. Besser arbeitet hier das CFD(Computational Fluid Dynamics)-Modell. Hierbei wird das Strömungsfeld in kleine Volumina zerlegt. Für jedes Volumenelement werden anschließend die Erhaltungsgleichungen für den Wärme-, Stoff- und Impulstransport gelöst. Die Grundmodelle müssen hierbei so erweitert werden, daß der Einfluß der Turbulenz, der Verbrennungsvorgänge und der Strahlungswärmeaustausch berücksichtigt wird. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß es an festen Begrenzungen z.B. Wänden zu Reibungs- und Wärmeverlusten kommt. Weiterhin haben Raumöffnungen einen starken Einfluß auf die Brandausbreitung bedingt durch Massenzu- und abströmungen. Die Schwierigkeiten bei diesem Modell bestehen gegenwärtig noch bei der Beschreibung der Brandausbreitung bis zum "flashover". Dies liegt u.a. an der fehlenden Beschreibung der Effekte durch den

Wärmestrahlungsaustausch und zwar besonders in Hinblick auf die Bestimmung der Emissions- und Absorptionskoeffizienten.

Thomas /49/ vergleicht Ansätze zur quantitativen Beschreibung des Rauchgasmassenstromes bzw. der Flammenhöhe bei Bränden, die in Großbritannien bzw. den USA verwendet werden und zeigt deren Einsatzgrenzen auf.

Tuovinen /50/ simuliert die Verbrennung eines Methan-/Luftgemisches sowie den Löschvorgang mit thermisch stabilen Gasen. Auf die Besonderheiten bei anderen Löschmitteln wie z.B. Löschpulver oder Wassertropfen wird eingegangen. Hierunter zählen z.B. Schmelzvorgänge, Zersetzungsprozesse und Sublimationsprozesse bei festen Teilchen, Wärmetransport, Stofftransport, Verdampfungsprozesse, Wachstum von Rußpartikeln und Agglomeration etc. U.a. wurde mit Hilfe der Laser-Spektroskopie nachgewiesen, daß es sich bei den Reaktionen in der Flammenfront von Kohlenwasserstoffen um komplexe verzweigte Reaktionen handelt. Hierbei entstehen kurzlebige freie Radikale, die den Reaktionsablauf beeinflussen. Selbst die Verbrennung einfacher Kohlenwasserstoffe bedeutet bereits hunderte von komplizierten Reaktionen. Zusätzliche Schwierigkeiten treten auf, wenn diese reaktionskinetischen Prozesse mit physikalischen Prozessen, wie Zerstäubung, Verdampfung und Turbulenz gekoppelt werden, die immer bei derartigen Verbrennungsprozessen vorliegen. Löschvorgänge sind hierbei noch weitaus komplizierter durch evtl. zusätzliche Reaktionen mit dem Löschmittel, Schmelz- und Verdampfungsvorgänge.

Schneider und Hofmann /51/ haben ein 3dimensionales Feldmodell (FISCO-3 = Field Simulation of Compartment Fires) zur Simulation auftriebsbehafteter Konvektionsströmungen in einem belüfteten Brandraum entwickelt. Hierbei wurden Kohlenwasserstoffbrände mit Schwerpunkt auf der Untersuchung umschlossener Lachenbrände untersucht. In einer 2. Stufe wurde das Feldmodell durch ein Verfahren zur Berücksichtigung der Wechselwirkung der heißen Luftströmung innerhalb des Brandraumes mit einem Tropfenschwarm erweitert (Programm FISCO-3L) und in dem Programm KOBRA-3D

weiter verbessert. Diese Programme sind für den Einsatz auf einem leistungsfähigen PC konzipiert. Das Feldmodell KOBRA-3D basiert auf der Lösung der zeitabhängigen hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen für Masse (Kontinuitätsgleichung), Energie und Impuls (Navier-Stokes-Gleichung) in 3 Raumdimensionen. Auf den Einschluß theoretischer Modelle für Phänomene wie Verbrennung oder Strahlungstransport wurde zunächst verzichtet. Die Modellierung des Verbrennungsprozesses erfolgte durch die explizite Vorgabe zeitabhängiger Wärmefreisetzungsraten oder durch Anwendung geeigneter empirischer Korrelationen. Die hydrodynamischen Grundgleichungen bilden ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, welches für beliebige Rand- und Anfangsbedingungen nur numerisch gelöst werden kann. In KOBRA-3D wird dazu ein finites Differenzenverfahren benutzt. Zur Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Sprühnebeltropfen und heißer Gasschicht werden folgende Annahmen getroffen:

- kugelförmige Tropfen
- keine Wechselwirkungen der Tropfen untereinander
- vertikale Anfangsgeschwindigkeit der Tropfen wird vernachlässigt
- horizontale Anfangsgeschwindigkeit der Tropfen wird vernachlässigt
- statt des realen Sprühnebelkegels wird ein äquivalenter Sprühnebelkegel behandelt

Der Sprühnebel selbst wird durch die Massenrate, den mittleren Tropfendurchmesser (median mass diameter) sowie durch die effektive horizontale Lachenausdehnung charakterisiert. Die wesentlichen Modellgrößen sind die vertikale Tropfengeschwindigkeit, die zeitliche Veränderung des mittleren Tropfendurchmessers sowie die zugehörige Wärmeübergangszahl zur Berechnung des Wärmetransportes. Es wird angenommen, daß sobald die Tropfen die Siedetemperatur erreicht haben, die Verdampfung einsetzt. Dies führt zu einer sukzessiven Verkleinerung der Tropfendurchmesser, bis hin zur völligen Verdampfung. Das weitere Schicksal der Tropfen nach Erreichen einer festen Oberfläche und das Verhalten des entstehenden Dampfes werden nicht berücksichtigt. Daher ist eine Analyse der Löschwirkung nur bezüglich des Effektes der Abküh-

lung der heißen Rauchgase möglich. Ein Löschen durch Ersticken oder durch antikatalytische Wirkung wird im Rahmen dieses Modells nicht behandelt. Zum Vergleich der Berechnungen mit Experimenten wurden verschiedene Lachenbrandversuche bzw. Versuche mit durch Propangasbrenner simulierten brennenden Lachen durchgeführt. Variiert wurden hierbei der Brennstofftyp, die Lachengröße, die Temperatur des zugeführten Brennstoffes, die Ventilationsbedingungen, die Wasserzufuhr rate und der mittlere Tropfendurchmesser. Eine wichtige Größe zur Bewertung der Effektivität eines Sprühnebels stellt das Verhältnis der durch die Wirkung des Löschmittels entzogenen Wärme pro Zeiteinheit zur gesamten freigesetzten Wärmerate dar. Dieser Wert lag je nach Wasserzufuhr rate, Gastemperatur und Tropfendurchmesser im Bereich zwischen 0,28 und 0,46. Über die genauen Ergebnisse wird in der Arbeit berichtet. Es wurde festgestellt, daß der mittlere Tropfendurchmesser ein äußerst sensitiver Parameter bei der Interpretation der Löschexperimente und der Simulationsrechnungen darstellt und daher eine weitere Verbesserung des Abkühlungsmodelles durch den Übergang von einer uniformen Tropfengröße zu einer geeigneten Tropfengrößenverteilung erzielt werden kann.

Madrzykowski und Vettori /52/ führten eine Untersuchung durch zur Berechnung der Brandbekämpfungzeit durch einen Sprinkler. Hierzu wurden Brandversuche mit verschiedenen Brandlasten, die im Bürobereich vorkommen können, im Großmaßstab durchgeführt und jeweils die Wärmefreisetzung mit und ohne Sprinkler-Einsatz bestimmt. Die jeweilige Brandlastzusammensetzung wird in der Arbeit angegeben. Die Autoren weisen auf die Problematik hin, daß diese Brandlasten aus Holz, Kunststoff, Schaumstoff, Textilien oder aus Kombinationen davon bestehen können. Die Anordnung des Mobiliars kann so sein, daß einige Oberflächen direkt vom Sprinklerspray benetzt werden, während andere Oberflächen davon abgeschirmt werden. Die Position der Zündquelle ist für die Brandausbreitung ebenfalls entscheidend. In dieser Untersuchung wurde in einem 1. Schritt ein Berechnungsverfahren entwickelt, das durch eine einfache empirische Funktion die Problematik zu beschreiben versucht. Das Berechnungsverfahren soll dem Brandschutzingenieur dazu dienen, ausschließlich mit der Kenntnis der

Brandlast, der Art der Brandstoffe und der Wasserbeaufschlagung zu rechnen. In der Arbeit wird auch auf frühere Untersuchungsergebnisse bezüglich der Wärmefreisetzung bei Holzkrippenbränden ohne Löscheinsatz sowie bei verschiedenen Wasserbeaufschlagungen eingegangen. Das Ergebnis der Arbeit stellt einen zeitabhängigen Verminderungsfaktor für die Wärmefreisetzung (Heat Release Rate (HRR) Reduction Factor) dar. Für die verschiedenen Büromöbelkonfigurationen ergab sich hierbei eine obere Grenzkurve (geringste Verminderung der Wärmefreisetzung) der Form:

$$\text{HRR Reduction Factor} = e^{-0,0023 \Delta t}$$

Δt stellt hierbei die Zeit nach Löschbeginn in s dar. Der Wärmefreisetzungsstrom $\dot{Q}(\Delta t)$ nach der Löschzeit Δt ergibt sich aus dem Wärmefreisetzungsstrom bei Löschbeginn \dot{Q}_{act} zu

$$\dot{Q}(\Delta t) = \dot{Q}_{\text{act}} e^{-0,0023 \Delta t} .$$

Unoki /53/ hat eine Gleichung entwickelt, um die Löschzeit für einen Brand in einem Raum mit nicht zu großer Deckenhöhe sowie vergleichsweise niedriger Abbrandrate und Wasserausflußrate zu bestimmen. Es wird angenommen, daß der Löschprozeß von den Wechselwirkungen des Sprinklersprays mit der auftriebsbehafteten Rauchgasströmung und dem Kühleffekt am Brandherd abhängt. Zum einen wird bei der Berechnung die Geschwindigkeit der Rauchgase und der Tropfen, zum anderen die Abbrandrate und die Wasserausflußrate berücksichtigt. Die Löschwirksamkeit von Sprinklern hängt davon ab:

1. wie weit die Tropfen die nach oben gerichtete Brandgasströmung durchdringen können.
2. welche Wassermenge an den Brandherd herangebracht werden muß, um die Wärmefreisetzung zu unterbinden und die kontinuierliche Verbrennung zu unterbrechen.

Die aufgestellten Gleichungen enthalten Faktoren, die erst aus Experimenten gewonnen werden müssen. Parallel zu den theoretischen Untersuchungen wurden Brand- und Löschversuche mit Holz-

krippen durchgeführt. Hierbei wurden die Zeit von der Zündung bis zum Löscheinsatz, die Zeit von Beginn des Löscheinsatzes bis zum Löscherfolg, der Wasserstrom und die Abbrandgeschwindigkeit ermittelt. Der Löscheinsatz erfolgte jeweils bei einer Abbrandmasse von 30%.

Wighus /54/ berichtet über Brand- und Löschversuche in einem 2,5 m * 2,5 m * 5 m großen Raum. Der Brandherd in Form eines Lachenbrandes wird durch einen 1 MW - Propanbrenner der Größe 0,3 m * 1,3 m simuliert. Eine Ventilation im Raum wird durch eine Einströmöffnung knapp über dem Boden und eine Auslaßöffnung knapp unterhalb der Decke erzeugt. Die verwendeten Sprühdüsen weisen einen Vollkegel auf, wobei der mittlere Tropfendurchmesser zwischen 0,5 mm und 1,6 mm liegt. Die Ergebnisse werden in Form einer Wärmebilanz für den Sprühnebel, den Raum und den Rauch dargestellt. Es wurde beobachtet, daß der Brand gelöscht wird, wenn der Sprühnebel einen bestimmten Teil der freigesetzten Wärme absorbiert. Der Autor sieht den Löschprozess als eine Kombination von Inertisierung der Verbrennungszone mit Wasserdampf und eine Verminderung der Temperatur an. Selbst wenn der Sprühnebel nur einen kleinen Teil der freigesetzten Wärme absorbiert, wird die Rauchgastemperatur und der Gesamtwärmestrom beträchtlich reduziert. Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Tropfengröße und der Löschwirksamkeit. Bei der Wärmebilanz für den Raum ist zu beachten, daß ein Teil der Wärme im Raum gespeichert und ein Teil an die Umgebung abgegeben wird. Der Hauptteil der Wärme wird durch Konvektion und Strahlung an Wände, Decke und Boden, ein anderer großer Teil der Wärme wird durch die Ventilation mittels Konvektion an die Umgebung übertragen. Die ersten Minuten des Brandes sind durch schnelle Abläufe bei der Brandausbreitung und der Wärmespeicherung in Wand-, Decken- und Bodenmaterialien gekennzeichnet. Die stationäre Phase liegt vor, wenn das Wärmespeichervermögen gegen Null geht. Die Wärmemenge, die durch den Sprühnebel entzogen wird, hängt von der Wassermenge ab, die verdampft wird.

Das Wasser beeinflusst den Wärmetransport vom Brand an den Raum auf unterschiedliche Weise:

- Kühlung der Gase im Inneren des Raumes und der aus der Austrittsöffnung strömenden Gase.
Diese führt zu einem geringeren Wärmetransport an die Wände, die Decke und den Boden und an die Objekte nahe der Austrittsöffnung.
- Direkte Kühlung der Oberflächen durch Wassertropfen
- Durch den Gehalt an Wassertropfen und Wasserdampf nimmt der Absorptionsgrad der Gase im Brandraum zu. Hierdurch kommt es zu einer geringeren Wärmestrahlung von den Flammen an die Oberflächen.

Für das Löschen eines Brandes sind mehrere Mechanismen verantwortlich:

- Kühlung der Flammen auf eine Temperatur unterhalb des Flammpunktes, bei der die chemischen Reaktionen nicht aufrecht erhalten werden können.
- Reduktion des Sauerstoffgehaltes auf eine Temperatur, bei der die Reaktionen nicht aufrechterhalten werden können.
- Erhöhung der nach oben gerichteten Strömungsgeschwindigkeit, damit die für die chemische Reaktion erforderliche Verweilzeit zu gering wird.
- Zugabe von Stoffen in die Verbrennungszone, die zum Abbruch der Kettenreaktionen infolge endothermer Reaktionen führen.

Das Löschen mit Wassertropfen hat seine Hauptwirkung in einer Sauerstoffverdrängung durch die Bildung von Wasserdampf sowie in der Kühlwirkung durch die Bildung von Wasserdampf. In vollständig gemischten Reaktoren hat man festgestellt, daß bei einem Molanteil von 30% Wasserdampf Löschen erzielt wird. In einem Brandraum bei nicht idealer Mischung liegt dieser Wert über 30 % jedoch noch unter 40 %. Es wird darauf hingewiesen, daß bei einem normalen Sprinkler die kleinen Tropfen bereits in den oberen Schichten verdampfen, bevor diese den Brandherd erreichen. Der größte Teil des Dampfes wird vom Rauch durch Entlüftungsöffnungen ausgetragen. Die Dampfentwicklung bewirkt jedoch, daß durch den Expansionsvorgang die weitere Sauerstoffzufuhr verringert wird. Dies wird jedoch stark von der Position des Brandherdes gegenüber dem Sprinkler und den Raumöffnungen be-

stimmt. Bei Lachenbränden wurde festgestellt, daß diese mit kleinen Tropfen durch Kühlung unter den Flammpunkt gelöscht werden können. In der Arbeit wird ein Wärmeabsorptionsverhältnis SHAR verwendet, das die vom Sprühnebel absorbierte Wärme beschreibt.

$$\text{SHAR} = 1 - [(Q_{\text{wall}} + Q_{\text{ceil}} + Q_{\text{floor}} + Q_{\text{vent}}) / Q]$$

Q: Gesamte beim Brand freigesetzte Wärme

Q_{wall} : Wärmeabsorption durch die Wände

Q_{ceil} : Wärmeabsorption durch die Decke

Q_{floor} : Wärmeabsorption durch den Boden

Q_{vent} : Konvektive Wärmeübertragung durch Ventilation

Die Wärme die von den im Raum vorhandenen Gasen gespeichert wird und die Wärme, die durch Öffnungen im Raum abgestrahlt wird, wird vernachlässigt. Man hat festgestellt, daß diese Wärme in dem verwendeten Raum im Bereich um 0,1 % liegt.

Die Größe SHAR kann auch in der Form

$$\text{SHAR} = Q_{\text{water}} / Q$$

dargestellt werden. Q_{water} stellt hierbei die durch den Sprühnebel absorbierte Wärme dar. Diese kann in 4 Teile aufgeteilt werden:

- 1) Wärme, die erforderlich ist, um das Wasser auf den Siedepunkt aufzuheizen
- 2) erforderliche Verdampfungswärme
- 3) Überhitzung des Wasserdampfes auf Rauchgastemperatur
- 4) Aufheizung des Wassers, das neben den Brandherd gelangt

Bei den durchgeführten Experimenten wurde festgestellt, daß der Brand nicht gelöscht wurde, wenn die absorbierte Wärme unterhalb 60 % lag ($\text{SHAR} = 0,6$). Es wurde weiterhin festgestellt, daß die Gastemperatur im Raum und der Wärmestrom zu angrenzenden Oberflächen oder Räumen wesentlich stärker durch kleine als durch große Tropfen reduziert wird.

You /55/ berichtet über Untersuchungen mit einem Tropfenmeßsy-

stem der Factory Mutual Research Corporation. Dieses arbeitet mit Laserlicht. Das Verfahren ist in der Lage, Tropfen im Größenbereich zwischen 100 μm und 6400 μm aufzulösen. Es wurden 7 Sprinkler bei den Höhen 3,05 m und 6,1 m und den Drücken 206 kPa und 393 kPa bezüglich des Tropfenspektrums untersucht. Über die Durchführung der Messungen und die Ergebnisse in Form von Tropfengrößenverteilungen wird in der Arbeit näher eingegangen.

Suzuki und Hirano /56/ berichten über die vertikale und horizontale Flammenausbreitung auf Papier sechs verschiedener Stärken mit und ohne Tränkung mit Methanol oder Dekan. Hierbei wurde die Auswirkung der Flüchtigkeit der brennbaren Flüssigkeiten auf die Brandausbreitung untersucht. Es wurde festgestellt, daß wenn der Flammpunkt unterhalb der Umgebungstemperatur liegt (Methanol), die Flammenausbreitung so schnell vonstatten geht, daß die Flammenspitze das Ende des Papiers erreicht, bevor die Pyrolyse des Papiers beginnt. Wenn der Flammpunkt über der Umgebungstemperatur liegt (Dekan), eilt die Flammenfront einer braunen Zone, die die Pyrolyse des Papiers anzeigt, voraus. Es hat sich gezeigt, daß die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bei einem mit brennbarer Flüssigkeit getränkten Papier größer als bei trockenem Papier ist.

Chow und Wong /57/ haben das Durchdringungsvermögen des Wasserflusses eines Sprinklers mit und ohne Brandherd in einem Raum der Größe 4 m * 2,96 m * 2,9 m hoch untersucht. Das Wasser wurde in 120 Behältern am Boden aufgefangen. Als Brandherd wurden Holzkrippen verwendet. Diese bestanden aus 40 Holzstäben der Größe 25 mm * 25 mm * 310 mm in 8 Lagen. Die Wärmefreisetzung wurde aus der Abbrandmasse ermittelt. Der Sprinkler wurde bei einem Durchsatz von 57,6 l/min und einem Druck von 2,7 bar betrieben. Die Position der Holzkrippe wurde gegenüber dem Sprinkler variiert. Das Durchdringungsvermögen wird in Form eines Durchdringungsverhältnisses quantitativ dargestellt.

$$\text{Durchdringungsverhältnis} = \frac{V_f}{V_i} * 100 \%$$

V_f : Aufgefangene Wassermenge bei Anwesenheit eines Brandherdes
 V_i : Aufgefangene Wassermenge ohne Brandherd

Die Wasserbeaufschlagung der 120 Behälter wird hierbei in Zeitintervallen von 20 s gemessen. Die Meßergebnisse werden in Form von Linien konstanten Durchdringungsverhältnisses über der Meßfläche dargestellt. Das Durchdringungsverhältnis lag bei den durchgeführten Versuchen im Bereich zwischen 40% und 150%. Die höheren Werte wurden seitlich vom Brandherd ermittelt. Größere Werte als 100% wurden darauf zurückgeführt, daß die Tropfenbahnkurven durch den Brand beeinflußt wurden.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Literaturlauswertung soll dazu dienen, die Grundlagen für eine Verfeinerung und Erweiterung der bisherigen numerischen Simulation der Wechselwirkungen des Tropfenschwarmes eines Sprinklers mit der Rauchgasströmung eines Brandes bereitzustellen.

Die Arbeiten befassen sich mit der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz mit Sprinklern. Hierbei geht es u.a. um die Bestimmung und Simulation der Wasserbeaufschlagung von Sprinklern, der Arbeitsweise von Zonen- und Feldmodellen, dem Ausbreiten der Pyrolyse- und Flammenfront auf Festkörpern, der Kühlwirkung des Sprühnebels, der Durchdring- bzw. Eindringfähigkeit von Sprinklertropfen sowie dem Einfluß der Tropfengröße auf die Löschwirksamkeit. Es wurde hierbei keine neuere Arbeit gefunden, die sich mit der quantitativen Ansaugung von Umgebungsluft durch den Sprühnebel eines Sprinklers beschäftigt.

Bei den Untersuchungen hat man u.a. festgestellt, daß die Eindring- bzw. Durchdringfähigkeit bei einem Tropfenschwarm größer als bei einem Einzeltropfen ist. Die Wassertropfen- und Wasserdampfbildung beim Löschen hat einen Einfluß auf die Brandausbreitung bzgl. der Sauerstoffverdrängung und der Änderung des Emissions- bzw. Absorptionsgrades bei der Wärmestrahlung. Die Bestimmung des exakten Emissions- bzw. Absorptionsgrades und der Winkelverhältnisse, die für die Berechnung des Wärmetransportes bei der Brandausbreitung erforderlich sind, erweist sich als schwierig. Die vom brandinduzierten Strömungsfeld angesaugten kleinen Tropfen werden evtl. zu noch nicht ausgelösten Sprinklern geschleppt und bewirken dort eine Kühlung der Auslöseelemente, wodurch die Auslösung verzögert oder verhindert wird. Bei der Wechselwirkung von Wassertropfen mit der auftriebsbehafteten Gasströmung eines Sprinklers wurden im gesamten Sprühkegel Tropfenkollisionen und -zerteilungen beobachtet. Weiterhin ergeben sich Unterschiede und Probleme bei der Brandausbreitung und beim Löscheinsatz bei willkürlicher Brandlastverteilung, bei aus mehreren Materialien zusammengesetzter Brandlast und ob die

brennende Brandlast direkt vom Sprinkler benetzt wird oder ob die Oberflächen vom Sprinklerspray abgeschirmt werden. Es stellte sich weiterhin heraus, daß der Zusatz von filmbildendem Schaummittel zum Sprinklerlöschwasser in Lagern mit leichtentzündlichen Flüssigkeiten von Vorteil ist.

4. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.:
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 1: Literaturlauswertung.
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /2/ Brein, D.:
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 2: Großbrandversuche 1.
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986)
- /3/ Brein, D.:
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 3: Großbrandversuche 2.
Forschungsbericht Nr. 64 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)

- /4/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 4: Großbrandversuche 3.
Forschungsbericht Nr. 65 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)
- /5/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 5: Großbrandversuche 4.
Forschungsbericht Nr. 68 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /6/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 6: Großbrandversuche 5.
Forschungsbericht Nr. 72 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /7/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 1: Literaturlauswertung und

Errichtung der Versuchsanlage.
Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1985.

/8/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 3: Entwicklung und Einsatz von
Sprinklern.

Forschungsbericht Nr. 57 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1986)

/9/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 4: Löschversuche mit Sprinklern 1.
Forschungsbericht Nr. 62 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1987)

/10/ Schatz, H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 5: Löschversuche mit Sprinklern 2.
Forschungsbericht Nr. 67 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für

Brandschutztechnik (1988)

- /11/ Schatz,H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 6: Löschversuche mit Sprinklern 3.
Forschungsbericht Nr. 70 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1989)
- /12/ Schatz,H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 7: Literaturlauswertung und
Simulation der Wasserbeaufschlagung.
Forschungsbericht Nr. 74 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1990)
- /13/ Schatz,H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 8: Literaturlauswertung und
Simulation der Wasserbeaufschlagung.
Forschungsbericht Nr. 78 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1991)
- /14/ Schatz,H.
Kunkelmann,J.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 2: Literaturübersicht und Be-
rechnungsgrundlagen für die Wärme-
übertragung bei Tropfen in einer

Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)

/15/ Kunkelmann, J.:

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

Teil 7: Literaturübersicht über die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 76 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1990)

/16/ Kunkelmann, J.:

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

Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 80 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)

/17/ Kunkelmann, J.:

Brandausbreitung bei verschiedenen

Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.

Teil 9: Simulation der Wasserbeaufschlagung eines Sprinklers.

Forschungsbericht Nr. 83 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)

- /18/ Alpert, R.L.: Modeling of Sprinkler Spray Suppression of Fires.
First International Conference on Fire Suppression Research, Stockholm und Boras, 1992, S.245 - 259
- /19/ Bill, R.G., Jr.
Kung, H.-C.
Brown, W.R.
Hill, E.E., Jr.
Spaulding, R.D.: Predicting the Suppression Capability of Quick Response Sprinklers in a Light Hazard Scenario.
Part 1: Fire Growth and Required Delivered Density (RDD).
Journal of Fire Protection Engineering, 3(3), 1991, S. 81 - 93
- /20/ Bill, R.G., Jr.
Kung, H.-C.
Brown, W.R.
Hill, E.E., Jr.
Vincent, B.G.: Predicting the Suppression Capability of Quick Response Sprinklers in a Light Hazard Scenario.
Part 2: Actual Delivered Density (ADD) Measurements and Full-Scale Fire Tests.
Journal of Fire Protection Engineering, 3(3), 1991, S. 95 - 107
- /21/ Bill, R.G., Jr.: Numerical Simulation of Actual Delivered Density (ADD) Measurements.
Fire Safety Journal, 20, 1993, S. 227 - 240

- /22/ Chow,W.K. Numerical Simulation on Cooling of the
Fong,N.K.: Fire-induced Air Flow by Sprinkler
Water Sprays.
Fire Safety Journal, 17, 1991,
S. 263 - 290
- /23/ Crowe,C.T. The Particle Source-In Cell (PSI-Cell)
Sharma,M.P. Model for Gas-Droplet Flows.
Stock,D.E.: ASME Journal of Fluids Engineering,
99, 2, 1977, S. 325 - 332
- /24/ Cooper,L.Y.: Interaction of an Isolated Sprinkler
Spray and a Two-Layer Compartment Fire
Environment.
U.S. Department of Commerce, National
Institute of Standards, Building and
Fire Research Laboratory
Gaithersburg 1991
- /25/ Davis,W.D. A Computer Model for Estimating the
Cooper,L.Y.: Response of Sprinkler Links to
Compartment Fires with Draft Curtains
and Fusible Actuated Ceiling Vents.
U.S. Department of Commerce, National
Institute of Standards, Building and
Fire Research Laboratory
Gaithersburg 1991
- /26/ Delichatsios,M.M. An Upward Fire Spread and Growth
Mathews,M.K. Simulation.
Delichatsios,M.A.: Fire Safety Science - Proceedings of
the Third International Symposium,
Edinburgh, Scotland 1991,
S. 207 - 216
- /27/ Delichatsios,M.A. Upward Fire Spread: Key Flammability
Saito,K.: Properties, Similarity Solutions and
Flammability Indices.

Fire Safety Science - Proceedings of
the Third International Symposium,
Edinburgh, Scotland 1991,
S. 217 - 226

- /28/ Delichatsios, M.A.: Procedure for Calculating the Air
Entrainment into Turbulent Pool
and Jet Fires.
Journal of Fire Protection
Engineering, 2(3), 1990, S. 93 - 98
- /29/ Friedman, R.: An International Survey of Computer
Models for Fire and Smoke.
Journal of Fire Protection
Engineering, 4(3), 1992, S. 81 - 92
- /30/ Hasemi, Y.: Thermal Modelling of Upward Wall
Flame Wall.
Fire Safety Science - Proceedings of
the First International Symposium,
Springer-Verlag, Berlin 1986,
S. 87 - 96
- /31/ Heskestad, G. Update: The Initial Convective Flow
Delichatsios, M.A.: in Fire.
Fire Safety Journal, 15, 1989,
S. 471 - 475
- /32/ Hoffmann, N.A. On the Eulerian-Eulerian Approach
Galea, E.R.: to Fire-Sprinkler Modelling.
Journal of Fire Protection
Engineering, 3(4), 1991, S. 123 - 136
- /33/ Jackman, L.A. Characterization of Water Drops
Nolan, P.F. from Sprinkler Sprays.
Morgan, H.P.: International Conference on Fire
Suppression Research, Stockholm und
Boras, 1992, S. 159 - 184

- /34/ You, H.Z.
Symonds, A.P.:
Sprinkler Drop Size Measurements
Part 1: An Investigation of the
FRMC PMS Drop Size Measuring System.
Factory Mutual Research Corporation
Technical Report No. J.I.OG1E7.RA,
December 1982
- /35/ Jackman, L.A.
Nolan, P.F.
Gardiner, A.J.
Morgan, H.P.:
Mathematical Model of the
Interaction of Sprinkler Spray
Drops with Fire Gases.
International Conference on Fire
Suppression Research, Stockholm und
Boras, 1992, S. 209 - 227
- /36/ Chen, K.H.
Trezek, G.J.:
The Effect of Heat Transfer
Coefficient, Local Wet Bulb
Temperature and Droplet Size
Distribution Function on the
Thermal Performance of Sprays,
Journal of Heat Transfer, 99,
S. 381 - 385, Aug. 1977
- /37/ Ranz, W.E.
Marshall, W.R.:
Evaporation from Drops.
Part I, II
Chemical Engineering Progress 48
(1952) Nr.3, S. 141 - 180
- /38/ Alpert, R.L.
Ward, E.J.:
Evaluation of Unsprinklered Fire
Hazards.
Fire Safety Journal, 7, 1984,
S. 127 - 143
- /39/ Kokkala, M.A.:
Fixed Water Sprays Against Open
Pool Fires.
Suppression Research, Stockholm und
Boras, 1992, S.129 - 158

- the First International Symposium,
Springer-Verlag, Berlin 1986,
S. 657 - 666
- /47/ Rasbash, D.J.: The Extinction of Fire with Plain
Water: A Review
Fire Safety Science - Proceedings of
the First International Symposium,
Springer-Verlag, Berlin 1986,
S. 1145 - 1163
- /48/ Rhodes, N.: Fire-Modelling - Good for Design
but Fundamentals need more Research.
Fire Surveyor, December 1990
- /49/ Thomas, P.H.: Comparisons between Plume Theories.
Fire Safety Journal 20, 1993,
S. 289 - 292
- /50/ Tuovinen H.: The Computer Modelling of Extinction.
Lund University, Sweden, 1990
ISSN 0284-933X
- /51/ Schneider V. Feldmodell-Simulation von Kohlen-
Hofmann J.: wasserstoff-Raumbränden und Sprüh-
nebel-Löschversuchen.
vfdb-Zeitschrift 2, 1993,
S. 67 - 73
- /52/ Madrzykowski D. A Sprinkler Fire Suppression
Vettori R.L.: Algorithm.
Journal of Fire Prot. Engr., 4(4),
1992, S. 151 - 164
- /53/ Unoki J.: Fire Extinguishing Time by Sprinkler.
Fire Safety Science - Proceedings of
the First International Symposium,
Springer-Verlag, Berlin 1986,

S. 1187 - 1196

- /54/ Wighus R.: Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Spray.
Fire Safety Science - Proceedings of the Third International Symposium, Edinburgh, Scotland 1991,
S. 997 - 1006
- /55/ You H.-Z.: Investigation of Spray Patterns of Selected Sprinklers with FMRC Drop Size Measuring System.
Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium, Springer-Verlag, Berlin 1986,
S. 1165 - 1176
- /56/ Suzuki T.
Hirano T.: Flame Spread over Paper Soaked with Combustible Liquid.
Fire Science and Technology - Proceedings of the First Asian Conference.
International Academic Publishers, Hefei, China, 1992, S. 455 - 460
- /57/ Chow W.K.
Wong V.M.K.: Water Penetration Ratio of a Sprinkler Water Spray.
Fire Science and Technology - Proceedings of the First Asian Conference.
International Academic Publishers, Hefei, China, 1992, S. 467 - 474