

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind
Teil 7: Literaturübersicht über die
Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes
mit einer Heißgasströmung

76

Forschungsbericht Nr. 76

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 7: Literaturübersicht über die Wechsel-
wirkungen eines Tropfenschwarmes mit
einer Heißgasströmung.

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1990

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN LITERATUR	2
3. DARSTELLUNG DER PROBLEMATIK DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN DEM TROPFENSCHWARM EINES SPRINKLERS UND EINEM BRAND	46
4. ZUSAMMENFASSUNG	48
5. LITERATURVERZEICHNIS	50
6. TABELLEN UND BILDER	60

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

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befaßten 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/ untersucht.

Die aus einer Sprinkleranlage austretende Löschwassermenge und die räumliche Verteilung des bei der Versprühung entstehenden Tropfenschwarmes beeinflussen den Löscherfolg ebenso wie die Tropfengröße und der Anfangsimpuls der Tropfen. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Problematik der Wechselwirkungen eines aus einem Sprinkler austretenden Tropfenschwarmes mit dem Brand näher zu untersuchen. Diese Arbeit stellt eine Fortsetzung der Untersuchungen in /8/ dar. Hier wird im Anschluß an eine Literaturlauswertung der Abbau eines Einzeltropfens durch Verdampfen in einer realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung rechnerisch simuliert. Dabei wird angenommen, daß ein Tropfen aus einer Düse in eine senkrecht nach oben gerichtete Strömung eintritt. Die Anfangsgeschwindigkeit des Tropfens, sowie dessen Einsprühwinkel wird vorgegeben und als Rauchgasströmung eine über einer Wärmequelle entstehenden, nach oben gerichteten freien Konvektionsströmung angenommen. Der Tropfenabbau wird durch das Lösen der Wärme-, Massen- und Impulsbilanzen am Einzeltropfen unter Zugrundelegung der für das System relevanten Anfangs- und Randbedingungen gelöst.

2. AUSWERTUNG DER IN- UND AUSLÄNDISCHEN LITERATUR

Nachfolgend wird ein über die Angaben in /8/ weiterführender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Massen- und Impulsaustausch bei schwerpunktmäßiger Betrachtung des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen angegeben, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten für die Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen.

Alpert /13/ untersucht die Wechselwirkungen eines aus einer punktförmigen Düse austretenden axialsymmetrischen Sprühkegels mit einer Brandquelle. Diese wird zum einen durch einen heißen auftriebsbehafteten Heißgasstrahl aus einer Düse auf Erdbodenniveau, zum anderen durch einen natürlichen Brand mit konstanter räumlicher Wärmefreisetzung simuliert. Es wird hierbei für den ersten Fall eine Wärmefreisetzung von 606 kW und für den zweiten von 677 kW angegeben. Beim Heißgasstrahl beträgt die Einströmgeschwindigkeit 2 m/s bei einer Temperatur von 1000 K. Beim Brand tritt eine maximale Temperatur von 1050 °C in einer Höhe von 0,43 m auf. Von besonderem Interesse bei den Untersuchungen sind die durch das zerstäubte Wasser hervorgerufene turbulente Rezirkulation des Rauchgases. Weiterhin werden sowohl der Wasserstrom, der die Rauchgas- und Flammenzone durchdringt, als auch die Kühlwirkung untersucht. Wandeinflüsse auf das Strömungsfeld werden nicht berücksichtigt. Die Berechnungen werden für die äußeren Sprühwinkel 90° und 57,3°, als auch für verschiedene Einsprühgeschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 24 m/s durchgeführt. Innerhalb des 90°-Sprühwinkels wird das Spray durch 20 gleichmäßig verteilte Tropfenbahnkurven dargestellt. Die Sprinklerdüse befindet sich hierbei in einer Höhe von 2,4 m über dem Brandherd. Das Spray wird durch 1 mm große Tropfen simuliert, wobei jeder die gleiche Einsprühgeschwindigkeit aufweist. Als Ergebnis werden die Stromlinien mit und ohne Wechselwirkung mit dem Spray wiedergegeben. Durch das Einsprühen kommt es zu einer Ablenkung der Gasströmung und zu einer Verminderung der Gastemperatur im Deckenbereich. Bei einem engeren Sprühkegel ist ein stärkerer Einfluß auf die Rauchgasströmung festzu-

stellen. Bei einem Spray mit geringem Anfangsimpuls ist festzustellen, daß die Tropfen der innersten Flugbahnen durch die Rauchgasströmung zur Decke transportiert werden. Die Tropfen der weiter außen liegenden Flugbahnen erreichen zwar nicht die Decke, gelangen jedoch erst außerhalb des Brandbereiches auf den Boden. Mit einem engeren Sprühwinkel, der aber weniger typisch für Sprinkler ist, wird eine größere Durchdringungsfähigkeit erzielt. Mit zunehmendem Einfluß des Sprühregens ist eine Verminderung der Gasgeschwindigkeit zu verzeichnen. Die Kühlung des Rauchgases beruht hauptsächlich auf der Erwärmung und der Verdampfung der Tropfen. Bei einem engen Sprühwinkel und bei einem gegenüber der Rauchgasströmung dominierenden Einfluß des Sprühregens kommt es zur Ansaugung von Umgebungsluft in der Wärmefreisetzungszone und dadurch zu keiner nennenswerten Tropfenerwärmung bzw. -verdampfung. Es wird hierfür eine Wärmeabsorptionsrate von ca. 10 % angegeben. Bild 1 zeigt die Kühlwirkung (Wärmeabsorption) $\dot{Q}_{s, \text{absorb.}}$ eines Sprühnebels, bezogen auf die Wärmefreisetzung der unbeeinflussten Energiequelle $\dot{Q}_{p, \text{frei}}$ als Funktion des Verhältnisses aus der vertikal nach unten gerichteten Kraft des Sprays $F_{s, \text{vert.}}$ am Sprinkler und der vertikal nach oben gerichteten Kraft der Heißgasströmung $F_{p, \text{vert.}}$ bei maximaler Wärmefreisetzung für die unterschiedlichen Energiequellen und Sprühkegelformen. Für einen weiten Sprühkegel wird bei einem Kräfteverhältnis von ca. 8 eine Wärmeabsorption bis zu 70 % errechnet. Bild 2 zeigt den Wassermassenstrom der den Brandherd erreicht, bezogen auf den nicht durch eine Heißgasströmung beeinflussten Wasserstrom in % als Funktion des Verhältnisses der vertikal nach unten gerichteten Kraft des Sprays $F_{s, \text{vert.}}$ am Sprinkler und der vertikal nach oben gerichteten Kraft der Heißgasströmung $F_{p, \text{vert.}}$ bei maximaler Wärmefreisetzung. Die Berechnungen haben gezeigt, daß ein höherer Anfangsimpuls des Sprays eine erhöhte Kraft des Sprays auf das Rauchgas nach unten, eine größere Kühlwirkung, eine niedrigere Rauchgastemperatur und Rauchgasgeschwindigkeit an der Decke sowie eine größere Durchdringungsfähigkeit bewirkt. Bei dem untersuchten Spray erreichten 40 % bis 50 % der Tropfen bei einer Deckenhöhe von 2,4 m und einem weiten Sprühwinkel über einen relativ großen Bereich des Kräfteverhältnisses den Brandherd. Bei einem engeren Sprüh-

Kegelwinkel wird ein Wert von 100 % bei einem Kräfteverhältnis von 5,45 erzielt.

Alpert und Mathews /14/ berechnen die durch einen axial-symmetrischen Sprinkler-Sprühkegel bewegte Luft zwischen einer Decke und dem Boden ohne Berücksichtigung der durch einen Brand hervorgerufenen Heißgasströmung. Dabei befindet sich die Luft im Anfangsstadium in Ruhe und weist eine einheitliche Temperatur auf. Zur Beschreibung der Gasströmung werden die Temperatur-, Feuchte- und Strömungsfelder, die durch das Spray beeinflusst werden, durch Lösung der Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsbilanzen für das jeweilige Volumenelement berechnet. Weiterhin wird die Erzeugung von Turbulenzenergie infolge der Schwerkraft berücksichtigt. U.a. werden für die Berechnung der Gasströmung die Annahmen getroffen, daß die Tropfenkonzentration sehr gering ist und damit die Tropfen ein vernachlässigbares Volumen darstellen. Für das Gas wird Idealgasverhalten mit konstanter spezifischer Wärme angenommen. Die Änderung der Gasdichte wird in der Impulsbilanz vernachlässigt. Es wird erwähnt, daß, wenn die Luft den Sättigungszustand erreicht hat, was vor allem bei Umgebungstemperatur vorkommt, die Tropfenverdampfung behindert wird. Die Berechnung der Erhaltungsgleichungen für die flüssige Phase erfolgt in Abhängigkeit für den Tropfendurchmesser, die Tropfengeschwindigkeit und die Temperatur entlang jeder Flugbahn. Hierbei werden unter anderem folgende Annahmen getroffen: Auf den Tropfen wirken ausschließlich die äußeren Kräfte Schwerkraft und Widerstandskraft. Andere Kräfte werden wegen der geringen Tropfenkonzentration und dem Fehlen von Bereichen mit hohen Schergradienten in der beeinflussten Gasströmung vernachlässigt. Die Tropfen werden als kugelförmig betrachtet, wobei ein Temperatúrausgleich im Inneren angenommen wird. An der Tropfenoberfläche wird wegen der geringen Verdampfungsraten Sättigung angenommen. Die Auswirkungen des kleinen Verdampfungsmassenstromes auf den Widerstandsbeiwert und die Wärmeübertragungskoeffizienten werden vernachlässigt. Die Tropfen werden aus einer punktförmigen Quelle in die Gasphase in Form eines axialsymmetrischen Sprays eingedüst. Hierbei entsteht eine diskrete Verteilung der Tropfendurchmesser, Ein-

sprühgeschwindigkeiten und Einsprühwinkel. Die Tropfengrößenverteilung kann bei dem untersuchten Sprinklertyp durch eine Rosin-Rammler-Verteilung dargestellt werden. Die Verteilungsfunktion $F(d)$ hat die Form

$$F(d) = 1 - e^{-(\ln 2) d^2 / d_m^2} \quad (1)$$

Hierbei stellt d den Tropfendurchmesser und d_m den auf die Masse bezogenen mittleren Tropfendurchmesser dar. ($F(d) = 0,5$ wenn $d = d_m$). Im vorliegenden Fall wird diese Verteilung durch 5 Klassen diskretisiert, wobei jede 20 % des gesamten Flüssigkeitsmassenstromes aufweist. Die Werte für $F(d)$ betragen 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 und 0,9. Die untersuchten mittleren, auf die Masse bezogenen Durchmesser betragen 0,65 mm, 0,85 mm, 0,94 mm und 1,07 mm. Hieraus läßt sich der Durchmesser d errechnen. Die Differenz zwischen innerem und äußerem Einsprühwinkel wird in dieser Arbeit durch den Faktor 6 gleichmäßig unterteilt. Es wird angenommen, daß die Verteilung der Einsprühwinkel nur von der Tropfengröße abhängig ist und zwar in der Form, daß es für jede Klasse einen inneren und einen äußeren Einsprühwinkel gibt. Es wird eine Gleichung zur Berechnung des Teilmassenstromes als Funktion der Fraktion und des Winkels angegeben, sodaß ein gleichmäßiger Massenstrom pro Raumwinkel erzielt wird. Es wird angenommen, daß alle Tropfen mit der gleichen Geschwindigkeit eingedüst werden. Die Festlegung der Größe der Volumenelemente erfolgt in der Weise, daß diese im Bereich der Grenzflächen (Decke, Boden, Symmetrieachse, ungestörte Umgebung) am kleinsten und im restlichen Gebiet allmählich größer gewählt werden. Der Wasserdampfmasseanteil, die Gasgeschwindigkeitsänderungen, sowie die Gastemperaturänderung, die durch einen Tropfen hervorgerufen wird, wird innerhalb eines Elementes der Gasphase als konstant angenommen. Die Gaseigenschaften ändern sich nur außerhalb des Volumenelementes. Die Berechnungen werden mit Meßergebnissen anderer Autoren verglichen. Bei der qualitativen Beobachtung des Sprinklersprühkegels im Versuch hat sich gezeigt, daß es infolge des Deflektors unterhalb der Düse zu einem Sprühschatten kommt. Es hat sich weiterhin herausgestellt, daß es

bei einer gleichförmigen Tropfenverteilung und damit von der Tropfengröße unabhängig angenommenen äußeren Sprühwinkels von 45° und einem inneren Sprühwinkel von 0° (Symmetrieachse) zu den größten Abweichungen kommt. Der errechnete Sprühradius ist dabei im Bereich der Symmetrieachse zu klein und im Randbereich zu groß. Zur genaueren Beschreibung der Meßergebnisse werden ungleichmäßige Tropfenverteilungen über dem Sprühkegel angenommen. Hierbei werden die beiden Fälle Vollkegel und Hohlkegel betrachtet. Bei ersterem beträgt der innere Winkel 0° , im 2. Fall 45° , 35° , 25° , 15° und 5° in der Reihenfolge von der Klasse mit der kleinsten zur größten Tropfengröße. Die Abstufung des äußeren Winkels beträgt entsprechend in beiden Fällen 65° , 55° , 45° , 35° und 25° . Beim Vergleich mit den Meßwerten hat sich gezeigt, daß die Annahme eines Hohlkegels mit ungleichmäßiger Tropfenverteilung gerechtfertigt ist. Es wird erwähnt, daß bei zunehmendem Zerstäubungsdruck der maximale Sprühradius geringfügig abnimmt. Die berechneten Bahnkurven und Stromlinien zeigen, daß die Luftströmung beim Eindringen in den Sprühkegel stark nach unten abgelenkt wird. Die Luftströmung verläßt diesen wieder radial in einer dünnen Schicht über dem Boden. Die gesamte Deckenhöhe beträgt 10 m. Die Wände des rechteckigen Versuchsraumes waren genügend weit (6 m und 9 m) von der Sprühachse entfernt, so daß diese nur einen geringen Einfluß auf die Stromlinien hatten. Es werden die beiden Fälle untersucht, daß die Eindüsung 3,36 m und 0,15 m unterhalb der Decke erfolgte. Der Deckeneinfluß führt zu abnehmender Lufteinsaugung aber zunehmender Ablenkung der Tropfenbahnen von kleinen Tropfen nach innen. Es wird weiterhin gezeigt, daß die durch das Spray induzierte Luftströmung wiederum eine Rückwirkung auf die Tropfenbahnen und somit auch auf die Wasserverteilung am Boden hat. Es treten nicht vernachlässigbare Auftriebskräfte durch die induzierte Gasströmung auf, die in die gleiche Richtung wirken wie die Widerstandskräfte der Tropfen. Diese beruhen auf der Kühlwirkung des Sprays auf die umgebende Luft und sind verantwortlich für eine bedeutende Erhöhung der Luftströmung innerhalb des Sprays. Bild 3 zeigt einen Vergleich der Meß- und Rechenwerte des Verhältnisses des durch ein Spray bewegten Luftmassenstromes \dot{m}_a bezogen auf den eingesprühten Wasserstrom \dot{m}_w als

Funktion des auf die Gesamthöhe H normierten Abstandes von der Decke x und des mittleren massebezogenen Tropfendurchmessers nach Kung, Heskestad und Todtenkopf /15/. Es zeigt sich, daß mit zunehmendem Abstand von der Decke bis in die Nähe vom Boden, sowie mit zunehmendem Tropfendurchmesser die beeinflusste Luftmenge größer wird.

Heskestad, Kung und Todtenkopf /16/ untersuchen theoretisch und experimentell die Ansaugung von Luft durch vertikal in eine ruhende Umgebung eingesprühtes Wasser. Die Untersuchungen werden für Vollwinkel-Sprühkegel durchgeführt. Der Hauptmechanismus ist hierbei der Impulsaustausch zwischen den Tropfen und der angesaugten Luft. In den Versuchen wird in verschiedenen Höhen unterhalb der Sprinklerdüse die angesaugte Luftmenge sowie die Luftgeschwindigkeit erfaßt. Für die gemessene Luftgeschwindigkeit wird ein Fehler von $\pm 25\%$ für den Wert zentral unter der Düse angenommen, wobei der Fehler im Randbereich noch größer wird. Für die Werte der angesaugten Luftmenge wird ein Fehler von $\pm 20\%$ angegeben. Bei den Versuchen wird für den Tropfen ein mittlerer volumetrischer Durchmesser von $0,85\text{ mm}$ mit einem Fehler von $\pm 0,05\text{ mm}$ ermittelt. Für die Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen:

- eindimensionale inkompressible Strömung
- kugelförmige Tropfen
- Der Widerstand der einzelnen Tropfen wird durch benachbarte Tropfen nicht beeinflusst.
- Die Tendenz zur Tropfenvereinigung ist im Vergleich zum Tropfenstrom vernachlässigbar.
- Die Luftströmung die durch einen Massenstrom von Tropfen verschiedener Größe erzeugt wird, ist ähnlich derjenigen, die durch den gleichen Massenstrom von Tropfen, jedoch mit konstantem effektivem Durchmesser, gebildet wird. Für die Tropfenphase wird eine eindimensionale vertikale Impulsbilanz unter Berücksichtigung von Schwer- und Widerstandskraft aufgestellt. Für die Luft wird die Impulsbilanz der Strömung in vertikaler Richtung berücksichtigt. Als äußere, auf die Strömung wirkende Kraft wird die Widerstandskraft der Tropfen berücksichtigt. Beim Vergleich der Versuchswerte mit den

theoretisch ermittelten Werten hat sich eine gute Übereinstimmung ergeben.

Nach Brauer /17/ ist die größte Schwierigkeit bei der Entwicklung der Schwarmgesetze zur Beschreibung des Verhaltens von Partikelschwärmen die Festlegung der Partikelanordnung innerhalb des Schwarmes. Für theoretische Untersuchungen kann man die Partikel in einem Gitter mit vorgeschriebenen Abständen anordnen oder aber eine statistischen Verteilungsgesetzen gehorchende räumliche Anordnung annehmen. Die Untersuchungen beschränken sich hauptsächlich auf die schleichende Umströmung (Bereich von Stokes) bei der Sedimentation in Flüssigkeiten. Es werden Modelle für die Bewegung von Kugelpaaren, die Partikelbewegung in stark verdünnten Suspensionen sowie bei hohen Konzentrationen aufgestellt. Betrachtet werden der Impulsaustausch und die Gesetzmäßigkeiten für den Strömungswiderstand. Für stark verdünnte Gleichkornsupensionen wird eine Partikelkonzentration c in der Form

$$c = \frac{V_p}{V} = \frac{\pi / 6}{(X / d_p)^3} \quad (2)$$

angegeben. Hierbei wird angenommen, daß innerhalb eines Fluids Partikel von gleichem Durchmesser gleichmäßig verteilt enthalten sind. Dann läßt sich das Gasvolumen in z würfelförmige Elemente mit dem Volumen V unterteilen, in denen sich jeweils ein Partikel mit dem Volumen V_p befindet. Hierbei stellt X die Kantenlänge des Würfels und d_p den Partikeldurchmesser dar. Es werden weiterhin qualitativ Vorzeichenkonventionen für die Richtungen von Strömungsgeschwindigkeit, Partikelgeschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit bei Gleich- bzw. Gegenstrom angegeben.

Brauer und Thiele /18/ gehen auf die technische Bedeutung von Partikelschwärmen ein. Es wird angegeben, daß hierbei die Partikelkonzentration in einem Fluid einen Wert zwischen 0 % und 60 % annehmen kann. Zur Charakterisierung eines Tropfenschwarmes werden verschiedene Begriffe erläutert. Ein

Partikelschwarm besteht aus $j = 1$ bis n Fraktionen. Die jeweils betrachtete Fraktion wird mit i bezeichnet. Jede Fraktion besteht aus Partikeln mit dem einheitlichen Durchmesser d_{pi} und der einheitlichen Partikeldichte ρ_{pi} . Das in einer Fraktion enthaltene Partikelvolumen wird mit V_{pi} bezeichnet. In dem System sind insgesamt das Partikelvolumen V_p und das Fluidvolumen V_f enthalten. Damit erhält man die Fraktionskonzentration zu

$$c_{pi} = V_{pi} / (V_p + V_f) \quad (3)$$

Die Schwarmkonzentration ergibt sich zu

$$c_p = \frac{V_p}{V_p + V_f} = \frac{\sum_{j=1}^n V_{pj}}{V_p + V_f} = \sum_{j=1}^n c_{pj} \quad (4)$$

Es wird zwischen 2 verschiedenen Schwarmformen unterschieden. Ein Monoschwarm besteht aus einer Fraktion, so daß alle Partikel den gleichen Durchmesser und die gleiche Dichte haben. Von einem Polyschwarm spricht man, wenn der Schwarm aus j Fraktionen besteht. Die in einer Fraktion enthaltenen Partikel haben alle den gleichen Durchmesser und die gleiche Dichte. In der Arbeit werden Gesetzmäßigkeiten zur Berechnung der Schwarmgeschwindigkeiten für kleine Re-Zahlen ($Re \leq 1$) angegeben, wobei auch der Fall der durch den Schwarm aufgrund der Kontinuitätsbedingung induzierten Gegenströmung und der Einfluß von Schwarmturbulenz untersucht wird. Diese Gegenströmung tritt hierbei nur in geschlossenen Systemen auf. In offenen Systemen ist die Schwarmturbulenz die einzige Ursache für die Änderung der Schwarmgeschwindigkeit. Die Schwarmbewegung führt zu einer scheinbar erhöhten inneren Reibung des Fluids. Die Folge ist eine Herabsetzung der Sink- und Steiggeschwindigkeit der Partikel. Es wird auf den Korrekturfaktor K_{HRi} von Hadamard und Rybcynski eingegangen. Dieser wird ebenfalls von Brauer in /17/ behandelt. Dieser berücksichtigt die bewegliche Phasengrenzfläche für die Steiggeschwindigkeit und

den Widerstand von Blasen. Bei der Bewegung von Tropfen in Gasen ist diese Korrektur im allgemeinen vernachlässigbar und hat den Wert 1.

Bright, Fletscher und Baum /19/ haben sehr langsame Luftströmungen (0,01 cm/s), die durch einen Tropfenschwarm (Tropfendurchmesser 5 μm bis 15 μm) hervorgerufen werden, in einer zylindrischen Kammer mit einem Durchmesser von 9 mm mit der Laser-Doppler-Methode untersucht. Die Wechselwirkungen der Partikel mit der Luft werden in Form eines einfachen 2-Fluid-Modells mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen exakt gelöst. U.a. werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Tropfen an den verschiedenen Positionen stehen nicht in Wechselwirkung miteinander. Dies erlaubt, daß die Tropfen allein durch eine Dichtekennzahl beschrieben werden können.
- Die innere Phase wird durch einen gedachten Zylinder, der aus Tropfen und Luft besteht, dargestellt. Die äußere Phase ist ein koaxialer Luftring.
- Die mittlere Tropfengeschwindigkeit relativ zur Luft ist vertikal abwärts gerichtet. Die Tropfen bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit (stationär).

Chow /20/ beschreibt ein Modell zur Abschätzung des Wärmeeintrages aus einer Rauchsicht durch Verdampfen eines Sprinklerssprays. Dieses bewirkt zum einen einen Kühleffekt, zum anderen eine Verminderung des Auftriebes der Rauchgase. Tropfen sind bei bestimmten Strömungszuständen nicht in der Lage, die Rauchsicht zu durchdringen und den Brandherd zu erreichen, da die Durchdringungsfähigkeit von dem Verhältnis der Rauchgasgeschwindigkeit zur Tropfengeschwindigkeit abhängt. Dieses Verhältnis kann jedoch nicht dazu verwendet werden, um den Wasserdurchdringungsstrom zu bestimmen, wenn sich der Brandherd außerhalb der Sprühachse des Sprinklers befindet. In dieser Arbeit wird daher versucht, diesen über die Tropfenverdampfung abzuschätzen. Weiterhin wird ein Brandzonenmodell entwickelt, um die Heißgastemperatur und die Dicke der Rauchgassicht vorhersagen zu können. Es wird folgende Annahme getroffen: Die Wassertropfen bewegen sich durch die umgebende Rauchzone und werden durch diese erwärmt. Sobald die Siede-

temperatur erreicht wird, beginnen diese zu verdampfen, d.h. der Tropfendurchmesser nimmt ab. Zur Lösung des Problems werden die Impuls- sowie Energiebilanzen für den Tropfen aufgestellt. Die Brandsimulation erfolgte durch das Harvard V Zonenmodell. Es werden verschiedene numerische Experimente durchgeführt, wobei die Rauchzonendicke, die Tropfengeschwindigkeit sowie die Raumabmessungen variiert werden. Zur Beschreibung des Sprays wird eine Tropfengrößenverteilung in Form eines Blockschaubildes angegeben. Zur Berechnung des Wassermassenstromes M als Funktion des Wasserdruckes P_w am Sprinkler wird folgende Beziehung angegeben:

$$\dot{M} = 3,29 \cdot 10^{-3} \cdot (P_w)^{1/2} \quad (\dot{M} \text{ in kg/s, } P_w \text{ in Pa}) \quad (5)$$

U.a. haben sich bei den Untersuchungen folgende Ergebnisse ergeben:

Die Verdampfungswärme macht nur einen geringen Anteil der an die Tropfen konvektiv übertragenen Wärme aus. Sie erreicht in den untersuchten Fällen für die vorgegebene Tropfengrößenverteilung bis zu 26 % des konvektiven Wärmestromes an die Tropfen bei einer Rauchgasschichtdicke von 1,5 m und einer Temperatur von 273 °C. Bei einem Spray, das ausschließlich aus 0,1 mm - Tropfen besteht, wird für den betrachteten Fall ein Wert von 36 % angegeben. Es wird festgestellt, daß nur die kleineren Tropfen verdampfen. Es kommt zu keiner nennenswerten Verdampfung, wenn alle Tropfen einen Durchmesser größer als 0,5 mm aufweisen. Der Autor betont, daß es sich nur um eine grobe Abschätzung handelt, die auf vielen empirischen Daten, einschließlich der Tropfengrößenverteilung, der Tropfengeschwindigkeit sowie der Temperatur und der Dicke der Rauchschicht basiert. Das Modell berechnet, welche Wärmemenge durch das Wasser absorbiert wird, berücksichtigt jedoch nicht den Effekt der Kühlung des Rauchgases.

Das Buch von Clift, Grace und Weber /21/ beschäftigt sich mit den Grundlagen zur Beschreibung des Strömungsverhaltens, sowie der Wärme- u. Stoffübertragung bei Blasen, Tropfen und Teilchen. U.a. werden kugel- u. nichtkugelförmige Teilchen, deren Deformationsverhalten sowie Oberflächeneffekte be-

handelt.

Dlouhy und Gauvin /22/ untersuchen die Verdampfungs- u. Trocknungsraten von Tropfen einer Lösung in einem Sprüh-trockner. Die Versuche werden von einer theoretischen Lösung des Problems begleitet, wobei hier insbesondere auf die Berechnung der Verdampfungs- und Trocknungszeiten eingegangen wird. Es wird u.a. erwähnt, daß die Gleichungen von Ranz und Marshall zur Berechnung der Nusselt- bzw. Sherwood-Zahlen (siehe /8/) nur bei geringen Verdampfungsraten gelten. Bei höheren Verdampfungsraten ändert der vom Tropfen entweichende Dampf den Temperaturgradienten des den Tropfen umgebenden Gas-filmes, was eine Verminderung der Nusselt-Zahl bewirkt. Diese Korrektur wird in der Arbeit angegeben. Das Problem wird schrittweise gelöst, da es im vorliegenden Fall nicht zulässig ist, mit den mittleren physikalischen Eigenschaften der Partikel zu rechnen. Die Partikelgrößenverteilung wird in Fraktionen aufgeteilt. Für jede Fraktion wird die Berechnung getrennt durchgeführt. Die Wärmebilanz wird in der Weise auf-gestellt, daß die konvektiv von der Gasströmung an die Partikel im differentiellen Zeitschritt übertragene Wärmemenge gleich gesetzt wird mit der für die differentielle Massen-änderung erforderlichen Verdampfungsenthalpie. Die Aufheizung der Tropfen auf die Gleichgewichtstemperatur wird hierbei ver-nachlässigt.

Drysdale /23/ geht in seinem Buch auf die theoretische Be-schreibung von Flammen und Bränden ein, wobei der Wärme- und Stofftransport, der Verbrennungsvorgang, die Flammentypen, die Flammenausbreitung, das Verhalten von Fest- und Flüssigbrenn-stoffen, die Entstehung von Bränden sowie die Rauchentstehung und -bewegung behandelt werden. U.a. werden die Flammen von natürlichen Bränden beschrieben. Diese bestehen aus 3 Be-reichen, die im Englischen unter dem Namen 'Fire Plume' zusam-mengefaßt werden. Der Bereich I (Flammenzone, 'Persistent Flame') ist der Bereich direkt über der brennenden Oberfläche und ist gekennzeichnet durch eine anhaltende Flammen-erscheinung sowie eine beschleunigte Strömung der brennenden Gase. Anschließend kommt ein Bereich mit flackernder Flammen-

erscheinung (Bereich II, 'Intermittent Flame'). Hier ist die Strömungsgeschwindigkeit nahezu konstant. Der Bereich III (Auftriebsbereich, 'Buoyant Plume') ist gekennzeichnet durch die Wechselwirkung mit der Umgebung, wobei es aufgrund der Dichteunterschiede zum Auftrieb der Gase kommt. Gleichzeitig wird Umgebungsluft angesaugt, wodurch es zu einer Verdünnung, zu einer Abnahme der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit sowie zu einer Verbreiterung der Zone kommt. Im Idealfall dehnt sich dieser Bereich in einer unendlich ausgedehnten Atmosphäre achsensymmetrisch soweit aus, bis das aufsteigende Gas zu schwach ist, um den Widerstand aufgrund der Viskosität zu überwinden. Im Realfall kann dies bereits bei relativ niedrigen Höhen eintreten, wenn sich eine Schicht warmer Luft unter der Decke befindet. Dieser Bereich ist maßgebend für die Auslegung von Brandmelde- und Rauchabzugsanlagen. Weiterhin wird die Wechselwirkung zwischen einem Sprinklerspray und dem Brand dargestellt. Damit ein Sprinkler wirksam arbeitet, d.h. einen Brand löscht, ist es wichtig, daß die Tropfen das Rauchgas durchdringen und den Brandherd erreichen. Die maximale Gasgeschwindigkeit wird dabei in Bereich II erreicht. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Der nach unten gerichtete Impuls des Sprays reicht aus, den nach oben gerichteten Impuls des Rauchgases zu überwinden.
2. Die Tropfen erreichen den Brandherd allein durch die Schwerkraft.

Bild 4 zeigt die Endgeschwindigkeit von Wassertropfen definierten Durchmessers in Luft, die noch in der Lage sind, die Heißgasströmung eines Brandes vorgegebener Größe zu durchdringen, für 3 verschiedene Temperaturbereiche der Luft. Die Durchdringungsfähigkeit von Wassertropfen kann durch Erhöhung des Anfangsimpulses vergrößert werden, wobei jedoch berücksichtigt werden muß, daß hierbei beim Zerstäubungsvorgang kleinere Tropfen entstehen. Weiterhin wird die Durchdringungsfähigkeit durch die Verdampfung der Tropfen auf dem Weg durch die Rauchgas-/Flammenzone vermindert. Obgleich die Gase hierdurch gekühlt werden, trägt dieses wenig zur Kontrolle eines sich schnell ausbreitenden Brandes bei.

Fraser, Dombrowski und Johns /24/ behandeln die Kühlung von

heißem Gas in einem Kühlturm. Hierbei wird die Flüssigkeit verdampft und der Dampf anschließend auf Gastemperatur überhitzt. Es wird erwähnt, daß die Gleichung von Ranz und Marshall zur Berechnung der Nusselt-Zahl (siehe /8/) bei Temperaturen bis zu 220 °C und für Re-Zahlen im Bereich zwischen 0 und 200 gültig ist. Bei höheren Temperaturen und Re-Zahlen wird ein Teil der Wärme vom abströmendem Dampf absorbiert. Dadurch wird der Wärmeübertragungskoeffizient vermindert, was in einem Korrekturterm Berücksichtigung findet. Zur Berechnung der Gastemperatur wird die Wärmebilanz in der Weise aufgestellt, daß die Enthalpieänderung des Gases der Verdampfungswärme und der Wärme zur Überhitzung des Dampfes auf die Gastemperatur gleichgesetzt wird.

In der Studie von Gogos und Ayyaswamy /25/ werden die Impuls-, Massen- und Energiebilanz im Zusammenhang mit der Verdampfung eines sich langsam in der Gasphase bewegenden Flüssigkeitstropfens untersucht. Die Gasphase sowie die Flüssigkeitsströmung werden als quasistationär betrachtet. Die Wärmeübertragung wird als zeitlich veränderlich angesehen. Die Lösung des Gesamtproblems erfolgt durch Koppelung der Betrachtung von Gas- und Flüssigphase.

Das Autorenkollektiv /26/ behandelt u.a. das Problem der Turbulenz bei Teilchenbewegungen und Strömungen. Eine laminare bzw. schwach turbulente Anströmung liegt vor, wenn es sich um eine Teilchenbewegung in einem ruhenden Fluid handelt. Strömt das Fluid demgegenüber selbst, so beeinflusst dessen Turbulenzgrad den Widerstand. In einer turbulenten Strömung überlagern sich der Hauptströmung die zufälligen räumlichen Schwankungsbewegungen von Fluidelementen (Fluidballen) verschiedener Größe und Geschwindigkeit. Suspendierte Teilchen folgen diesen Schwankungsbewegungen nach Maßgabe ihrer Frequenzen. Der verstärkte Impulstransport bei der Schwarmturbulenz infolge stark veränderlicher Geschwindigkeitsgefälle um die Teilchen führt zu einer scheinbar inneren Reibung des Fluids. Die daraus resultierende erhöhte Energiedissipation führt zu einer Beeinträchtigung der Bewegung der Teilchen.

Hanisch /27/ untersuchte die strömungstechnischen Eigenschaften der Sprühstrahlen von Druckluftdüsen und der Wärmeübergang im Sprühkegel. Bei Druck- oder Einstoffdüsen tritt das zu versprühende Gut unter erhöhtem Druck aus der Düse aus und zerfällt infolge freiwerdender Druckkräfte in kleine Tropfen. Für den Verdunstungsvorgang im Sprühstrahl ist der Strömungsmechanismus der Strahlvermischung des kalten Sprühstrahles mit dem diesen umgebenden aufgeheizten gasförmigen Trocknungsmittel (Eintrittstemperatur 150 °C bis 250 °C) ausschlaggebend. Beim Mechanismus der Strahlvermischung treten kleine Ballen des Luft- und Flüssigkeitsgemisches in den Randgebieten in einen Impuls-, Massen- und Energieaustausch mit dem Trocknungsmittel. Teile des Trocknungsmittels werden dabei vom Strahl mitgerissen und durch Nachströmen aus der weiteren Umgebung ersetzt. Dadurch vermindert sich die Geschwindigkeit im Strahl und es entsteht eine zum Strahl hinggerichtete Sekundärströmung. Der Sprühstrahl verbreitert sich, in dem immer mehr Trocknungsluft aus der Umgebung angesaugt wird. Es kommt zu einer intensiven Vermischung des Sprühstrahles mit dem Trocknungsmittel, als deren Folge die Flüssigkeitstropfen über eine größere Querschnittsfläche verteilt werden. Darüber hinaus zieht der Impulsaustausch auch einen Austausch der Energie nach sich. Dieser führt seinerseits zu Trocknungserscheinungen (Massenaustausch) im Sprühstrahl und beeinflusst rückwirkend die Vermischung, da die kalte Zerstäubungsluft bei Erwärmung expandiert, wodurch sich der Strahl weiter ausbreitet, als dies bei Temperaturgleichheit der Fall wäre. Für den Sprühstrahl einer Druckluftdüse gelten einige Besonderheiten, die auch auf die Problematik des Sprinklers anwendbar sind:

1. Der Sprühstrahl ist kein Kontinuum, sondern er besteht aus einem Tropfen-Gas-Gemisch, wobei Tropfen und Gas im allgemeinen unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen und in einem dauernden Austausch von Impuls, Masse und Energie stehen.
2. Die Geschwindigkeits- und Temperaturdifferenz und demgemäß auch die Dichtedifferenz zwischen Strahl und Umgebung ist groß.
3. Die resultierende Geschwindigkeit der Umgebungsluft ist

meist nicht genau zu definieren. Sie ist nur in den seltensten Fällen parallel zur Strahlachse gerichtet und ist im allgemeinen dreidimensional. Eine Beschreibung der Strömungsvorgänge im Strahl ist durch die Kontinuitätsgleichungen für die Masse, den Impuls und die Energie möglich. Die Strömung wird als im zeitlichen Mittel stationär betrachtet. Da die Tropfen mit der Luft in einem laufenden Impuls-, Energie- und Massenausgleich stehen, können die beiden Komponenten nicht separat, sondern nur gemeinsam betrachtet werden. Die benötigte Verdunstungswärme wird vom Trocknungsmittel an die Tropfenwolke bzw. an die einzelnen Tropfen übertragen und die verdunstete Flüssigkeit des Aufgabegutes in Dampfform von dem sich abkühlenden Trocknungsmittel aufgenommen. Der entstehende Dampf, der während der Verdunstung bei relativ niedriger Temperatur vorliegt, nimmt anschließend die Temperatur und die Geschwindigkeit des Trocknungsmittels an. Zur Abschätzung der Tropfenbewegung werden in der Impulsbilanz als äußere Kräfte Trägheits-, Schwerkraft-, Auftriebs- und Widerstandskraft angenommen. In Gebieten erhöhter Tropfenkonzentration stellt sich eine Beeinflussung der Tropfen untereinander ein. Dieser Einfluß bleibt unberücksichtigt. Bei der Beschreibung des Tropfenspektrums wird angegeben, daß sich die größten Tropfen in Strahlmitte befinden. Diese sind bei niedrigen Drücken größer als bei höheren. Der mittlere Tropfen gibt einen Anhalt für das zu erwartende Verhalten der Sprühwolke. Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen sollten zur Bildung des mittleren Durchmessers die Teilchenabmessungen verwandt werden, die Einfluß auf den ablaufenden Prozeß haben. Für den Wärme- und Stoffaustausch, gekoppelt mit einer Bewegung der Tropfen, ist dies der SAUTER'sche Durchmesser D_{TRS} , der die Summe aller Tropfenvolumina zu der Summe aller Tropfenoberflächen ins Verhältnis setzt.

$$D_{TRS} = \frac{k \sum_{i=1} n_i D_{Ti}^3}{k \sum_{i=1} n_i D_{Ti}^2} \quad (6)$$

k : Anzahl der Durchmesserfraktionen
 n_i : Anzahl der Tropfen in der Fraktion i
 D_{Ti} : Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm

Zu Berechnung des SAUTER-Durchmessers wird ein Auswertungsbeispiel angeführt. Unter Bezugnahme auf die Aussagen verschiedenener Autoren wird angenommen, daß die Tropfen verhältnismäßig schnell ihre Beharrungstemperatur (Gleichgewichtstemperatur) annehmen, so daß der Anlaufvorgang vernachlässigt und als Tropfentemperatur und Zustand des Trocknungsmittels an der Tropfenoberfläche die Kühlgrenztemperatur (oder die Beharrungstemperatur) und der entsprechende Sättigungszustand des Trocknungsmittels bei dieser Temperatur angenommen werden kann. Diese stellt sich für einen bestimmten Luftzustand (Feuchte, Lufttemperatur) je nach dem vorherrschenden Strömungszustand ein. Die Gleichungen zur Berechnung des Wärme- und Stoffüberganges werden angegeben. Die wechselseitige Beeinflussung der Tropfenbewegung und der Verdunstung, d.h. des Wärme- und Stoffaustausches macht eine schrittweise Berechnung der Vorgänge im Sprühtrockner erforderlich. Die Zeitschrittweiten werden im Bereich zwischen $5 \cdot 10^{-2}$ s und $1 \cdot 10^{-5}$ s ausgewählt.

Von Hein, Rafflenbeul und Beckmann /28/ werden neue Erkenntnisse der Technologie der Düsen-Zerstäubungstrocknung dargestellt. Eine mathematisch-analytische Formulierung der Trocknung des Tropfens innerhalb des für die Kornbildung entscheidenden 1. Trocknungsabschnittes bildet hierbei die Grundlage für die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse. Es wird ein mathematisches Modell erarbeitet, das sowohl die während der Trocknung abnehmende Tropfengröße wie auch die unter adiabaten Bedingungen gegebenen Veränderungen der Wärmeübergangszahl berücksichtigt. Die Wärmebilanz für die Tropfen wird in der Weise aufgestellt, daß die konvektiv von der Luft an die Tropfen übertragene Wärme gleichgesetzt wird mit der zur Verdunstung erforderlichen Verdunstungswärme. Die Wärmebilanz für die Kühlung des umgebenden Gases setzt sich aus der Verdunstungswärme und der Enthalpieänderung des anteiligen Luftvolumens pro Tropfen zusammen.

Krämer /29/ beschäftigt sich mit der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Partikel bzw. Tropfen und turbulenter Gasströmung, also den beiden, dem Zerstäubungsvorgang unmittelbar nachgeschalteten Teilvorgängen bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen. Die theoretische Betrachtung umfaßt hierbei die Beschreibung turbulenter Strömungen, die Berechnung der Teilchenbewegung im Turbulenzfeld sowie die Tropfenverdunstung. Die Beschreibung der Bewegung von Teilchen oder Tropfen in einer Gasströmung geschieht durch die Partikelbewegungsgleichung. Man erhält diese Gleichung aus der Bilanzierung aller auf das Teilchen im Strömungsfeld wirkenden Kräfte. Hierbei ist die Trägheitskraft gleich der Summe aller äußeren Kräfte. Diese setzen sich zusammen aus der Widerstandskraft, der Druckkraft, der Trägheitskraft auf die Partikel, die vom beschleunigten Fluid in der Umgebung der Partikel auf diese ausgeübt wird ('Term der virtuellen Masse'), der um den Auftrieb verminderten Schwerkraft sowie den Grenzschichttreibungsanteil, der bei instationärer laminarer Strömung zusätzlich auftritt (Basset-Term). Aufgrund der großen Phasendichteunterschiede bei Festpartikel/Gas- oder Tropfen/Gas-Systemen sind der Basset-Term, die Auftriebskraft und der Term der virtuellen Masse sehr klein und können vernachlässigt werden. Die Druckunterschiede in der Fluidphase entsprechen in ihrer Größenordnung den Beschleunigungskräften der Trägerströmung. Aufgrund der gegenüber der Gasdichte sehr viel größeren Dichte der Partikel sind diese für die Partikelbeschleunigung vernachlässigbar. Die äußeren Kräfte in einer turbulenten Gasströmung reduzieren sich daher auf die Gewichtskraft und die Widerstandskraft, d.h. es treten nur Terme auf, die auch bei der stationären Kugelströmung wirken ('quasistationäres Verhalten'). Zur Berechnung der Tropfenverdunstung unter der Annahme, daß der Tropfen seine Beharrungstemperatur erreicht hat, wird angenommen, daß der gesamte an die Tropfenoberfläche übertragene Wärmestrom (Konvektion, Strahlung) zur Verdunstung des Tropfens (Verdunstungsenthalpie) aufgewendet wird. Wenn die Tropfen mit einer Temperatur in das Strömungsfeld eintreten, die nicht ihrer Gleichgewichtstemperatur entspricht, muß die Enthalpie, die nötig ist um diese Erwärmung zu erzielen, berücksichtigt

werden. Es wird jedoch erwähnt, daß die zur Aufheizung benötigte Zeit im Vergleich zur gesamten Verdunstungszeit gering ist. Hierfür werden Beispiele angegeben. Da die Gleichgewichtstemperatur während des Verdunstungsprozesses nur einige Grade unterhalb der Siedetemperatur liegt, kann bei hohen Gastemperaturen der Tropfenumgebung ohne großen Fehler die Verdunstungs-Gleichgewichtstemperatur der Siedetemperatur gleichgesetzt werden. Diese Annahme ist allerdings bei niedrigen Gastemperaturen nicht mehr gerechtfertigt. Die Gleichgewichtstemperatur ist dann aus dem verdunstenden Massenstrom, der durch einseitige Diffusion und Konvektion an die Umgebung übertragen wird, durch Koppelung von Wärme- und Stoffaustausch, zu bestimmen. Bei der Verdunstung von Brennstofftropfen, insbesondere bei höheren Umgebungstemperaturen, kann die Reduktion des Wärmeübertragungskoeffizienten durch den von der Tropfenoberfläche ausgehenden, im Verhältnis zur Tropfenumgebung kalten Dampfstromes nicht mehr vernachlässigt werden. Dieses wird durch den Ackermannschen Korrekturfaktor berücksichtigt. Zum Vergleich der Messungen wird als charakteristischer Tropfendurchmesser der SAUTER-Durchmesser gewählt, der als Durchmesser einer Kugel definiert ist, die das gleiche Verhältnis von Volumen zur Oberfläche besitzt, wie die gesamte Verteilung. (s.a. Hanisch /27/)

Masters /30/ trifft zur Verdampfung reiner Flüssigkeitstropfen folgende Aussagen: Die Verdampfungseigenschaften von Tropfen in einem Sprühnebel weichen von denjenigen eines Einzeltropfens ab. Jede Beschreibung eines Sprays hängt von der Annahme eines repräsentativen Tropfendurchmessers, der dazugehörigen Tropfengrößenverteilung, der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und umgebender Luft, den Tropfenbahnkurven und der Anzahl der Tropfen pro Trocknungsluftvolumen- und Zeiteinheit ab. Weiterhin bestehen große Schwierigkeiten, diese Faktoren in der Nähe des Zerstäubers zu bestimmen. Für Sprühnebel, die sich mit geringer Geschwindigkeit in Luft mit ebenfalls geringer Strömungsgeschwindigkeit bewegen oder wenn eine niedrige Relativgeschwindigkeit bei hoher Luftgeschwindigkeit vorliegt, können folgende Aussagen getroffen werden:

- 1) Die Spray- Verdampfung ruft eine Abnahme der Lufttemperatur hervor und die Verdampfungsrate nimmt ab.
- 2) Sprühnebel mit einer breiten Tropfengrößenverteilung verdampfen zu Beginn schneller als homogene Sprühnebel mit einem äquivalenten mittleren Durchmesser. Die erhöhte Verdampfungsrate ist auf die kleineren Tropfengrößen im ersten Fall zurückzuführen. Die größeren Tropfen verdampfen viel langsamer, so daß die Gesamtverdampfungszeit größer wird.
- 3) Die Tropfen können während des Verdampfungsvorganges des Sprühnebels durch einen mittleren Durchmesser nur unzureichend beschrieben werden.
- 4) Die Tropfengrößenverteilung gibt bei der Verdampfung des Sprühnebels den Sachverhalt am besten wieder.
- 5) Die Tropfengrößenverteilung ändert sich während des Verdampfungsvorganges.
- 6) Bei homogenen Sprays nimmt der Tropfendurchmesser während des Verdampfungsprozesses ab.
- 7) Bei nicht-homogenen Sprühnebeln nimmt der mittlere Durchmesser am Anfang zu, bevor dieser bis zur vollständigen Verdampfung abnimmt.

Morgan /31/ hat eine Theorie zur Berechnung der Wärmeübertragung von einer Rauchsicht unterhalb einer Decke an ein Sprinkler-Spray entwickelt. Die theoretische Betrachtung wird an einem Einzeltropfen durchgeführt. Mittels Informationen aus experimentellen Untersuchungen über die Eigenschaften dieser Sprühnebel wird der Berechnungsansatz des Wärmetransportes für das gesamte Spray hergeleitet. Bei Anwesenheit von Flammen in der Rauchsicht wird durch deren vorherrschend auftretende Niederfrequenz-turbulenz die Flugbahn der Wassertropfen beeinflusst. Gleichzeitig kommt es zu großen Temperaturschwankungen. Es wird bemerkt, daß weder Informationen über den Geschwindigkeitsvektor beim Einsprühen der Tropfen aus dem Sprinkler, noch über die Tropfengrößenverteilung zu diesem Zeitpunkt vorliegen. Bei der Einsprühgeschwindigkeit wird angenommen, daß die Tropfen den Sprinklerkopf ohne vertikale, dafür aber mit verschiedenen horizontalen Geschwindigkeiten verlassen. Es liegen nur Werte für die durchschnittliche Tropfengrößenverteilung für das gesamte Spray vor und diese nur für eine be-

grenzte Zahl von Sprinklertypen und Wasserdrücken. Hierfür wird in der Arbeit eine Tropfengrößenverteilung als Funktion verschiedener Wasserdrücke als Beispiel angegeben. Bei der Impulsbetrachtung wird der turbulente Widerstand zur Vereinfachung und wegen fehlender experimenteller Daten vernachlässigt. Bei der Berechnung des Wärmetransportes wird dieser jedoch bei der vertikalen Geschwindigkeitskomponente berücksichtigt. Es wird angegeben, daß die Eigenschaften der durch das Sprinklerspray in der Rauchschiicht induzierten Turbulenz nicht bekannt sind. Experimente haben ergeben, daß die Basis der Rauchschiicht relativ ungestört bleibt, sodaß die innere Turbulenz vernachlässigt werden kann. Querströmungen in der Rauchschiicht infolge des Spray-Einflusses werden wegen der schwierigen Berechnung ebenfalls vernachlässigt. Die Kühlung des Rauchgases im Volumen, das vom Spray beeinflusst wird, ruft lokale Temperaturgradienten im Sprühnebel hervor. Es wird angenommen, daß die Wasserverdampfung vernachlässigbar ist. Die auf dem Boden entstehende Wasserverteilung wird gleichmäßig angenommen, d.h. die Zahl der Tropfen pro Flächeneinheit des beaufschlagten Radius ist konstant. Als Ergebnis der Berechnungen wird eine Tabelle aufgeführt, die Auskunft über die Spray-Temperatur, die Temperatur des Gases, den Wärmeentzug aus der Umgebung sowie das Verhältnis der nach unten wirkenden Kraft des Sprays zum Auftrieb der Gasströmung gibt. Der Autor kommt zu folgenden Ergebnissen: In den meisten Fällen reicht die Schleppwirkung des Sprays nicht aus, den Rauch nach unten zu drücken. Der Wärmeentzug durch ein Spray eines einzelnen Sprinklers stellt nur einen geringen Anteil des Wärmehaltes der Rauchschiicht dar. In keinem der betrachteten Fälle nimmt die Wassertemperatur so stark zu, daß es zu einer nennenswerten Verdampfung kommen könnte. Beim Einsatz mehrerer Sprinkler in verschiedenen Ebenen ist der Wärmeentzug sowie die Verminderung des Auftriebes von viel größerer Bedeutung. Dies führt zu viel tiefer liegenden Rauchschiichten, deren erfolgreiche Bekämpfung durch Rauchabzugsanlagen unwahrscheinlich erscheint.

Morgan und Baines /32/ beschreiben experimentelle Untersuchungen, bei denen der Wärmetransport von einer heißen,

strömenden und auftriebsbehafteten Rauchschrift an ein Sprinkler-Spray in einer Passage beschrieben wird. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß die gemessenen Werte 150 % der errechneten Werte betragen.

Pilhofer und Mewes /33/ beschreiben einen Schwarm als eine große Anzahl von Tropfen, die sich in einem fluiden Kontinuum bewegen und sich dabei gegenseitig beeinflussen. Dabei ändern sich sowohl die Abstände zwischen den Tropfen als auch die Geschwindigkeit der Tropfen nach Größe und Richtung. Alle diese Änderungen sind stochastischer Natur. Tropfen und umgebende kontinuierliche Phase bilden eine Fluiddispersion. In ihr wirkt ein Tropfen nicht nur auf das Verhalten benachbarter Tropfen, sondern ebenso auf das Verhalten der kontinuierlichen Phase ein. Das aber hat eine Rückwirkung der kontinuierlichen Phase auf das Verhalten der Tropfen zur Folge. Je größer diese Rückwirkung ist, desto mehr verliert die Eigenbewegung der Tropfen an Bedeutung.

Prahl und Wendt /34/ haben ein Modell für das Sprühbild eines Sprinklers mit einer gleichmäßigen Wasserverteilung über der größtmöglichen Fläche in dimensionsloser Form entwickelt. Die experimentellen Untersuchungen werden von einer theoretischen Betrachtung begleitet. Der Grundgedanke ist, daß ein Sprinkler in der Lage sein soll, einen Brand in der Auslegungsfläche zu kontrollieren und zu löschen. Um diesen Erfordernissen gerecht zu werden, muß der Wasserstrom so groß sein, daß das Feuer gelöscht werden kann. Die Tropfen müssen hierbei so groß ein, daß diese den Rauchgas/Flammenbereich durchdringen und den Brandherd erreichen können. Die Tropfengrößenverteilung eines Sprinklers ist abhängig von den mechanischen und thermischen Eigenschaften der Flüssigkeit, dem Anfangsimpuls und der Geometrie der Flüssigkeits- und Gasströmungen sowie der Gestalt des Sprinklers selbst. Abhängig von der Gestalt des Sprinklers, bewegen sich die Tropfen auf einem einzelnen Einsprühvektor, wenn sich die Tropfen aus dem Wasserstrahl aus einer Düse bilden, oder auf mehreren Einsprühvektoren bei vielen handelsüblichen Sprinklertypen. Hierbei ist es sinnvoll, eine Bahnkurvenverteilung zu

definieren, die alle möglichen Anfangsvektoren enthält. Das radiale Sprühbild eines Sprinklers ist eine Funktion der Tropfengrößen- und Bahnkurventeilung, welches in Wechselwirkung mit der gasförmigen Umgebung steht. In den Versuchen wird der Sprinkler durch ein Modell simuliert. Hierbei trifft ein vertikaler zylindrischer Wasserstrahl aus einer Düse auf das Zentrum einer polierten flachen horizontalen Scheibe. Der Wasserfilm verläßt diese Scheibe zunächst in schirmförmiger Gestalt. Anschließend kommt es zur Wellenbildung und ab einem bestimmten Radius zum Zerfall in Tropfen. Die Amplitude und Frequenz der Wellen kann durch eine vertikale Vibration der Scheibe beeinflußt werden. Das Sprühwasser wird in Sammeltrögen bei verschiedenen Abständen, die den gesamten Sprühradius abdecken, aufgefangen. Die Wasserbeaufschlagung wird mit einem realen Sprinkler mit gezacktem Deflektor verglichen. Die theoretische Betrachtung umfaßt die Beschreibung des Zertropfungsradius als Funktion der Frequenz und Amplitude. Weiterhin werden die Impulsbilanzen des Tropfens in vertikaler und horizontaler Richtung unter Berücksichtigung der Schwerkraft und Widerstandskraft aufgestellt. Es wird angenommen, daß sich die Tropfen in einem ruhenden Gas bewegen. Weiterhin wird angenommen, daß die Tropfendichte so gering ist, daß der Widerstandsbeiwert für einen Einzeltropfen gültig ist, wobei gleichzeitig betont wird, daß diese Annahme nicht gerechtfertigt ist, da die Tropfendichte im Bereich um die Düsenachse so hoch ist, daß eine gegenseitige Beeinflussung nicht auszuschließen ist. In diesem Zusammenhang wird auch die Luftansaugung durch das Spray vernachlässigt. Das Tropfenspektrum wird in Form einer Rosin-Rammler-Verteilung angenommen, wobei die Impulsbilanz für den Tropfengrößenbereich von 0,2 mm bis 3,2 mm und einem mittleren volumetrischen Tropfendurchmesser von 2 mm gelöst wird. Die Wärme- und Stoffbilanz wird in den Ausführungen nicht berücksichtigt, d.h. die Tropfengrößenverteilung verändert sich nicht. Die Einsprühvektoren werden mittels einer Wahrscheinlichkeitsfunktion im jeweiligen Winkelbereich 10° , 20° , 30° und 40° zur Horizontalen verteilt.

Ravigururajan und Beltran /35/ haben ein Modell für die Abschwächung der durch einen Brand freigesetzten Wärmestrahlung

durch Wassertropfen entwickelt. Untersucht wird das Problem im Hinblick auf Flugzeugbrände. Die Infrarotstrahlung von einer Brandquelle, die das 'Zielobjekt' erreicht, kann durch Wasserspray oder -nebel vermindert werden. Dabei spielt die Tropfengröße eine bedeutende Rolle bei der Abschwächung der Strahlung, da sowohl die Wärmeübertragungsrate als auch die optischen Eigenschaften eine Funktion des Tropfenradius sind. Es wird herausgefunden, daß die maximale Abschwächung erzielt wird, wenn der Tropfenradius ungefähr identisch mit der Wellenlänge des Infrarot-Lichtes ist. Es werden Wellenlängen im Bereich zwischen $0,6 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$ untersucht. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Beurteilung der Durchlässigkeit ist die Tropfenbeladung. Es werden Tropfenbeladungen bis 200 g/m^3 untersucht. Es hat sich herausgestellt, daß die optimale Tropfengröße bei einem Radius von $2 \mu\text{m}$ liegt. Hier ist die erforderliche Beladung gering. Bei großen Tropfen z.B. mit einem Radius von $1000 \mu\text{m}$ ist der Sprühnebel auch bei einer hohen Beladung von 50 g/m^3 durchlässig, was sich in einem Transmissionsgrad von über 70 % der emittierten Strahlung bei einem Abstand von 3 m zwischen Strahlungsquelle und Strahlungsempfänger äußert.

Sellens und Brzustowski /36/ beschreiben die gekoppelten Tropfengrößen- und Geschwindigkeitsverteilungen eines Sprays mit Hilfe des Zustandes maximaler Entropie sowie der Erhaltungsgleichungen. Die Tropfengrößenverteilung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Rosin-Rammler-Verteilung, die Geschwindigkeitsverteilung jeder einzelnen Tropfengröße mit einer Gauß-Verteilung. U.a. werden bei der Betrachtung die Annahmen getroffen, daß die Gasgeschwindigkeit konstant ist. Der Verdampfungsvorgang bei den Tropfen wird vernachlässigt. Das Spray ist so verdünnt, daß Tropfenkollisionen vernachlässigt werden können und somit das Verhalten des Tropfenkollektivs gleich der Summe der Eigenschaften der Einzeltropfen ist.

Schirrmann und Brauer /37/ untersuchen den instationären Stofftransport durch die Phasengrenzfläche fluider Partikel. Dabei wird der Einfluß der Volumenänderung berücksichtigt, die

sich aufgrund des Stofftransportes ergibt. U.a. werden die Annahmen gemacht, daß sich eine einzelne kugelförmige Partikel in einer ungestörten, ruhenden fluiden Umgebung bewegt. Es existieren keine Wechselwirkungen zu anderen Partikeln und Systembegrenzungen. In der Arbeit werden die Transportvorgänge aus zwei miteinander gekoppelten Differentialgleichungen, deren Lösung das Konzentrationsfeld beschreibt, dargestellt.

Schmidt und Walzel /38/ befassen sich mit der Tropfenbildung und den verschiedenen Zerstäubungsvorrichtungen. Die physikalischen Vorgänge lassen sich mit Hilfe von dimensionslosen Kennzahlen beschreiben. Bei der Flüssigkeitsströmung durch Düsen kann man die wichtigen Bereiche Abtropfen, Zertropfen und Zerstäuben unterscheiden. In den beiden ersten Bereichen herrscht meist eine laminare Strömung vor und es bilden sich Tropfen definierter Größe. Das Zerstäuben hingegen ist ein Strahlzerfall im turbulenten Strömungszustand mit einem breiten Tropfengrößenspektrum.

Nach Schubert und Viehweg /39/ ist es für die Dimensionierung des Sprühraumes bei Sprühtürmen wichtig zu entscheiden, ob man die aerodynamischen Verhältnisse am Einteilchen-Modell untersuchen kann oder ob durch eine Wechselwirkung der Partikel untereinander eine ausgeprägte Schwarmbildung vorliegt. Als Richtwert ergibt sich, daß bei Flüssigkeitsanteilen von mehr als etwa 0,05 Vol.-% man nur noch unter Vorbehalt mit dem Modell des Einzelteilchens rechnen sollte. Grundsätzliche Untersuchungen über die durch statistische Dichteschwankungen bedingten örtlichen Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit im gasförmigen Medium fehlen noch. Es wird weiterhin erwähnt, daß ein im gasförmigen Medium fallender Teilchenschwarm im Gegensatz zu den Verhältnissen in der flüssigen Phase eine im Vergleich zum Einzelteilchen erhöhte Fallgeschwindigkeit besitzt. Bei Erzeugung sehr kleiner Tropfen und sehr hoher Austrittsgeschwindigkeiten der Tropfen aus der Düse kann die im Sprühkegel mitgerissene Luft eine merkliche Verlängerung der Bremsstrecke ergeben. Bei Tropfendurchmessern, die wesentlich kleiner als 200 μm sind, müssen die Strömungsverhältnisse des gasförmigen Mediums bei der Dimensionierung berücksichtigt

werden. Wegen der niedrigen stationären Relativgeschwindigkeit der Tropfen durch den Einfluß der Gasbewegung sind die verschiedensten Absolutgeschwindigkeiten und Flugrichtungen möglich. Die Intensität des Wärme- und Stoffüberganges zwischen dem Einzelteilchen und dem umgebenden Gas wird bestimmt durch die Stoffwerte des Gases, der Größe des Tropfens sowie dessen Relativgeschwindigkeit. Da immer ein Tropfenspektrum vorliegt, ergeben sich für die Einzelteilchen des Sprühkegels sehr unterschiedliche Übergangsbedingungen. Die Bestimmung eines mittleren Übergangskoeffizienten ist nur dann möglich, wenn entweder auf der häufigsten Tropfengröße aufgebaut werden darf oder die genaue Verteilung des Tropfenspektrums vorliegt. Auf Grund seiner Abmessungen hat der größte Tropfen die ungünstigsten Übergangsbedingungen und den maximalen Bedarf an überzugehender Stoff- und Wärmemenge, weist jedoch die höchste Fallgeschwindigkeit auf. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die größten Tropfen bei Druckdüsen im Inneren des Sprühkegels, also in der Nähe der Sprühkegelachse, auftreten. Das Konzentrationsprofil weist durch unkontrollierbare Gasströmungen Unregelmäßigkeiten auf. Diese Schwankungen lassen sich bei der Berechnung des Stoff- und Wärmeüberganges kaum erfassen. Die üblichen Beziehungen zur Berechnung der Nusselt-Zahlen sind nur an einem einzelnen Teilchen bzw. an einem einzelnen zerfallenen Sprühstrahl ermittelt worden. Sie gelten somit bei wachsender Berieselungsdichte nur näherungsweise, wenn eine ausgeprägte Schwarmbildung auftritt. Darf den Rechnungen keine genau festlegbare Tropfengröße zugrunde gelegt werden, so kann der Übergang nur anteilmäßig für jeweils eine vorgegebene Kornbreite ermittelt werden. Man erhält dadurch Anhaltswerte für die Gesamtbilanz von Energie- und Stoffmengen. Der zeitliche Verlauf der Teilchengeschwindigkeit wirkt sich nicht nur auf die Fallhöhe aus, sondern beeinflusst auch den in dieser Wegstrecke auftretenden Stoff- und Wärmeübergang. Dadurch verändern sich gleichzeitig die Stoffwerte. Von diesen ist, wenn man vom Einzelteilchen-Modell ausgeht, nur die Verschiebung der Teilchendaten eindeutig berechenbar. Änderungen der Gasdaten (Dichte, Zähigkeit, Temperatur) sind nur in Abhängigkeit von der mit dem meist relativ breiten und oft unterschiedlichen Tropfenspektrum insgesamt ausgetauschten

Stoff- und Wärmemenge zu erfassen. Es ist deshalb nicht richtig, die Veränderung der Gasdaten auf der Grundlage des Einzelteilchen- Modells berechnen zu wollen, d.h. sie in Verbindung mit dem Austausch am Einzelteilchen bestimmter Größe zu bringen. Man kann daher bei dem Rechenverfahren des Einzelteilchen- Modells nur die mittleren Werte des Gases als exakt bekannt ansehen.

Viehweg /40/ gibt u.a. die Voraussetzungen dafür an, unter denen das Einteilchenmodell bei Berechnungen verwendet werden kann:

- 1) Eine Voraussetzung ist es, die Rechnung für eine bestimmte Tropfengröße, z.B. den mittleren oder den maximalen Tropfen durchzuführen zu können. Durch die Festlegung der Tropfendurchmesser wird jedoch immer eine Ungenauigkeit in das Ergebnis der technischen Berechnung gebracht, da sich die ausschlaggebende Tropfengröße selten exakt bestimmen läßt, der Durchmesser sich aber sehr auf die Rechnung auswirkt.
- 2) Das Flüssigkeit/Gasvolumenverhältnis muß so klein sein, daß die Rechnung für Einzelteilchen erlaubt ist und keine schlecht kalkulierbare Schwarmgeschwindigkeit wirksam wird. Als Richtwert ergibt sich, daß bei Flüssigkeitsanteilen von mehr als etwa 0,05 Vol.-% man nur noch unter Vorbehalt mit dem Modell des Einzelteilchens rechnen sollte. Hierbei wirkt sich ebenfalls stark aus, wenn durch eine örtliche ungleichmäßige Flüssigkeitsbeaufschlagung wesentliche Konzentrationsunterschiede in der Gasphase auftreten, die starke örtliche Unterschiede im Triebkraftgefälle hervorrufen.
- 3) Örtlich unterschiedliche Gasgeschwindigkeiten dürfen die Teilchenbahn nicht wesentlich beeinflussen, d.h. die Gasgeschwindigkeit muß, bezogen auf die ausgewählte bestimmte Tropfengröße erheblich kleiner als die stationäre Fallgeschwindigkeit der Partikel bleiben. Treten örtlich starke Inhomogenitäten bei der Gasgeschwindigkeitsverteilung auf, so lassen sich die Auswirkungen der Gasströmung rechnerisch nicht mehr erfassen.
- 4) Flugbahn und Geschwindigkeit der Teilchen dürfen sich nicht infolge thermisch bedingter Turbulenzverhältnisse oder durch plötzliche Vorgänge, z.B. Verdampfungen, unkontrollierbar ver-

ändern, d.h. Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit der Partikel müssen eindeutig sein.

5) Für beide Medien müssen mindestens abschnittsweise gemittelte Stoffwerte verwendet werden können.

6) Das in den Wirkungsbereich eintretende Teilchen muß als ein Teilchen erhalten bleiben. Hierbei ergeben sich besonders kritische Abweichungen, wenn z.B. ein Teilchen durch Zusammenlagerung von mehreren Teilchen während des Fallens vergrößert wird.

7) Der Zusammenhang des zeitlichen Ablaufes des Prozesses mit den aerodynamischen Verhältnissen, den Konzentrationsverhältnissen und den thermischen Bedingungen sowie den Stoffwerten muß bekannt sein. Die Beziehungen zur Berechnung des Wärme- und Stoffüberganges sind nur am einzelnen Teilchen ermittelt worden. Sie gelten bei wachsender Berieselungsdichte nur näherungsweise.

8) Es muß entschieden werden können, ob die aerodynamischen Verhältnisse mit Hilfe des Modells der starren Kugel berechnet werden können oder ob z.B. die Besonderheiten des Tropfens zu berücksichtigen sind. Der Zusammenhang zwischen der Reynolds-Zahl Re und dem Widerstandsbeiwert C_w bei Wassertropfen ist bis maximal $Re = 1000$ mit ausreichender Genauigkeit gleich dem von starren Kugeln. Zwischen $Re = 10^3$ und $2 \cdot 10^3$ ergibt sich eine mittlere Abweichung von 20 %, bei größeren Re -Zahlen steigt jedoch der Fehler stark an. Der C_w - Wert ist in der Tendenz bei Tropfen im Gasraum immer gleich groß oder größer als bei starren Kugeln. Benutzt man bei Überschlagsrechnungen für Tropfen das Modell der starren Kugel auch bei $Re > 10^3$, so rechnet man mit einem zu kleinen C_w - Wert, wodurch sich zu große Geschwindigkeitswerte ergeben. Für die Untersuchung des instationären Strömungsverhaltens im Wirkungsbereich eines Sprühturmes kann im wesentlichen das Modell der starren Kugel herangezogen werden, wenn die Tropfengröße kleiner als 2 mm ist.

Viehweg, Biess und Weber /41/ haben bei der Dimensionierung von Sprühtürmen u.a. festgestellt, daß der Wärme- und Stoffübergang zwischen Teilchen und Gas meist instationär ist. Durch die Veränderung der Teilchendaten z.B. des Durchmessers

infolge des Stoff- und Wärmeüberganges wird die Relativgeschwindigkeit merklich beeinflußt. Dieses hat wiederum einen Einfluß auf die Intensität der Austauschvorgänge. Wenn man vom Einzelteilchenmodell ausgeht, sind nur die Teilchendaten eindeutig berechenbar. Änderungen der Gasdaten (Dichte, Zähigkeit, Temperatur) sind nur in Abhängigkeit von der insgesamt mit dem Teilchenschwarm ausgetauschten Stoff- und Wärmemenge zu erfassen. Dieser Weg bereitet jedoch Schwierigkeiten, da normalerweise ein relativ breites und meist auch unterschiedliches Teilchenspektrum vorhanden ist.

Yao und Kalelkar /41/ beschreiben die grundsätzlichen Erfordernisse an einen Sprinkler sowie die Wirkung des Tropfensprays. Die Hauptaufgabe des Brandschutzes durch Sprinkler ist das schnelle Löschen eines Brandes, soweit dies möglich ist bzw. dessen Kontrolle, um eine weitere Ausbreitung zu verhindern. Dies soll mit einer minimalen Zahl von auslösenden Sprinklern erreicht werden, um den Wasserschaden zu begrenzen. Daher müssen die Tropfen folgende Aufgaben erfüllen:

- Durchdringen der aufwärts gerichteten Rauchgasströmung, um die brennende Oberfläche zu löschen.
- Kühlung der Flamme und der Umgebung, besonders unter der Decke, um zu vermeiden, daß eine übergroße Zahl von Sprinklern ausgelöst wird.
- Benässen und Kühlen von umgebender Brandlast, die der direkten Einwirkung des Brandes ausgesetzt ist.

Es hat sich herausgestellt, daß größere Tropfen infolge der größeren Schwerkraft eher in der Lage sind, die Rauchgasströmung zu durchdringen und die brennende Oberfläche zu erreichen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, daß ein kugelförmiger Wassertropfen mit hoher Anfangsgeschwindigkeit abgebremst und zum Ellipsoiden deformiert wird. Es ist möglich, daß der Tropfen durch die Gasströmung seine Bewegungsrichtung umkehrt. Große Tropfen mit sehr großen Anfangsgeschwindigkeiten tendieren dazu zu zerfallen und haben dadurch eine geringere Durchdringungswirkung. Tabelle 1 zeigt die Eindringtiefe für verschiedene Tropfen-Größen und Einsprühgeschwindigkeiten als Funktion der Rauchgasgeschwindigkeit. Die Rauchgasströmung treibt die kleineren

Tropfen direkt über dem Brandherd gegen die Decke. Dies vermindert die Schädigung der Dachkonstruktion. Diese feinen Tropfen entweichen in der gleichen Richtung wie die heißen Verbrennungsprodukte. Je feiner die Tropfen, desto effektiver ist die Kühlung der sich ausbreitenden heißen Verbrennungsprodukte und die Möglichkeit, daß entferntere Sprinkler ausgelöst werden, wird geringer. Die Auslösung von Sprinklern außerhalb des Brandherdes benässt die nichtentzündete Brandlast und verhindert oder verzögert deren Entzündung. Wenn sich jedoch kein Sprinkler direkt über dem Brandherd befindet, wird fast das gesamte Wasser auf dem Boden verteilt, so daß es nur zu einer geringen Kühlung durch Verdampfung kommt. Es wird weiterhin ausgesagt, daß die Wasserdichteverteilung in diesem Fall im kalten Zustand völlig von derjenigen abweicht, die auftritt wenn sich ein Brandherd unterhalb des Sprinklers befindet. Im Brandentwicklungsstadium sollte möglichst viel Wasser den Brandherd erreichen, sonst breitet sich der Brand zu schnell aus und es werden zuviele Sprinkler ausgelöst, auch in weiterer Entfernung vom Brandherd, die nichts zur Löschwirkung beitragen und im Endeffekt einen größeren Wasserschaden bewirken. Die optimale Löschwirkung (Erreichen der Brandoberfläche) liegt bei Tropfen mit 4 bis 5 mm Durchmesser. Die optimale Kühlwirkung wird mit Tropfen $< 0,5$ mm erzielt. Standard-Sprinkler erzeugen Tropfenspektren mit einem mittleren Durchmesser von 1 mm. In der Arbeit werden verschiedene Diagramme dargestellt, die

- die Auswirkung des Sprinklerdruckes und -durchmessers auf die Tropfengröße
- die Auswirkung des Sprinklerdruckes auf die Durchdringungsfähigkeit in der Rauchgas/Flammensäule sowie
- die Auswirkung der Tropfengröße auf die Durchdringungsfähigkeit aufzeigen.

Rost /43/ befaßt sich in seiner Dissertation mit der Gesamtproblematik des Systems Automatische Wasserfeuerlöschanlage/ Entstehungsbrand. Die Wirkung dieser Anlagen beruht auf der Kühlung der Brandlastoberfläche, der Kühlung der Flammenzone sowie der freigesetzten Verbrennungsgase, der Ver- bzw.

Behinderung der Sauerstoffzufuhr zur Flammenzone und zur Brandlastoberfläche sowie der Verdünnung der mit Wasser mischbaren brennbaren Flüssigkeiten. Von besonderem Interesse ist die flächen- und zeitabhängige, zur Bindung der freigesetzten Wärmemenge notwendige Löschwassermenge und die flächen- und zeitabhängige, zur Bildung der inertisierenden Konzentration an Wasserdampf erforderliche Löschwassermenge. Die Analyse der erforderlichen Löschwasserintensität zur Erreichung des Stickeffektes ist sehr kompliziert, da:

- das aufgebrachte Löschwasser gleichzeitig kühlend wirkt und so eine genaue Differenzierung erschwert ist,
- die Strömungsverhältnisse der Luft und des Wasserdampfes in Brandlastnähe infolge der Vielgestaltigkeit der Brandlastkontur und -oberfläche nicht ausreichend genau darstellbar sind,
- infolge der Vielgestaltigkeit möglicher Brandräume sowie der Lüftungseinflüsse eine genaue Aussage zur Rückführung verdampften Wassers zum Brandstoff nicht möglich ist.

Lediglich für sehr kleine, abgeschlossene Räume ($\leq 100 \text{ m}^3$) sind begrenzte Aussagen zum Stickeffekt möglich, wenn die Berechnung der Wasserdampfkonzentration aus Wärmefreisetzungsrate und Tropfendurchmesser durchgeführt wird. Eine Abhängigkeit des Stickeffektes vom mittleren Tropfendurchmesser wird von Kung /44/ nachgewiesen. Der zur Löschung notwendige Molanteil Wasserdampf (30 % bis 39 %) ist in diesem Fall auf das Raumvolumen bezogen. Bei Räumen mit größerem Volumen ist ein zur Löschung notwendiger Molanteil Wasserdampf im gesamten Raum in der Regel nicht erreichbar und örtlich begrenzte zur Löschung ausreichende Wasserdampfanteile sind infolge der durch Brand und Löschmittelaufbringung hervorgerufenen Turbulenzen der Strömungsverhältnisse nicht allgemeingültig vorhersagbar. Aus diesem Grund beziehen sich die Untersuchungen von Rost nur auf den Hauptlöscheffekt, der Kühlung der Brandstoffoberfläche. Der Verfasser geht hierbei auf die Auslegungskriterien dieser Anlagen ein, d.h. auf die Wärmefreisetzung beim Entstehungsbrand, die Brandmeldung, die Wirkungsweise, die Einordnung in das Bauwerk sowie die Dimensionierung des Rohrsystemes. U.a werden verschiedene Brandmodelle für die Wärmefreisetzung als Funktion der Zeit

wie t^2 -, Potenz-, Exponential- und Flächenbezogenes Brandmodell beschrieben. Als besonders geeignet werden die Potenzbrandmodelle eingestuft, da durch die Wahl der Exponenten charakteristische Brandentwicklungen dargestellt und zeitabhängig unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden können. Für die betrachteten Löschanlagen wird ein Exponent von 2,5 hervorgehoben. Zur Kennzeichnung der Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung wird ein Verteilungsfaktor eingeführt. Für die Bewegung der Tropfen wird eine Gleichung zur Berechnung eines Durchschlagsfaktors angegeben, der dem Volumenanteil der Tropfen entspricht, der unter Brandbedingungen die Brandstoffoberfläche erreicht. Aus den Ergebnissen von Schatz /8/ wird eine Abschätzung für die Flugweite S_w der Wassertropfen mit dem Durchmesser d_T [m] in der Auftriebsströmung entwickelt. Diese lautet

$$S_w \sim d_T^{C_{DT}} v_D^{C_{VD}} \quad [m] \quad (7)$$

v_D stellt hierbei die Düsenanfangsgeschwindigkeit des Tropfens in m/s dar. Die Konstante C_{DT} beschreibt das Verhältnis von Düsenfließdruck und mittlerem Tropfendurchmesser und hat ungefähr den Wert 1,5. C_{VD} ist der Koeffizient der Tropfenanfangsgeschwindigkeit an der Düse und beträgt ca. 0,5. Unter der Verwendung der Ergebnisse von Albert /13/ und Schatz /8/ wird auf eine Abhängigkeit des Flugweges vom konvektiven Teil der Wärmefreisetzungsrate Q_k [kW] geschlossen.

$$S_w = C_{SW} Q_k^{-1/3} d_T^{C_{DT}} v_D^{C_{VD}} \quad [m] \quad (8)$$

C_{SW} stellt einen Proportionalitätsfaktor des Verhältnisses von Tropfenflugweite und -durchmesser dar und hat ungefähr den Wert 4,4. Zur Berechnung des Düsenwasserstromes \dot{V}_D als Funktion des Düsendruckes p_D [kPa] wird die Beziehung

$$\dot{V}_D = K p_D^{0,5} \quad [l/min] \quad (9)$$

unter Berücksichtigung des Düsenleistungsfaktors K [$l \text{ min}^{-1} \text{ kPa}^{-0,5}$] angegeben.

Kung /44/ entwickelt eine Versuchsanordnung um in Verbindung mit einer dazugehörigen Wärmebilanz die Wärmeabsorptionsrate durch ein Sprinkler-Spray bei Wohnungsbränden zu ermitteln. Die Kühlung der Verbrennungsprodukte und des Raumes ist ein bedeutender Mechanismus bei der Kontrolle von Wohnungsbränden. Weitere Mechanismen sind der direkte Kontakt der Wassertropfen mit dem brennenden Material, um zu verhindern, daß weitere brennbare Zersetzungsprodukte entstehen, und um brennbares Material zu befeuchten, damit eine weitere Brandausbreitung vermieden wird. In Zusammenhang mit dem ersten Mechanismus stehen die Inertisierung des brennbaren Gasgemisches durch verdampftes Wasser sowie die Verdrängung großer Luftvolumina durch den Dampf. Die relative Wirksamkeit der verschiedenen Faktoren unterscheidet sich bei Wohnungs- bzw. Industriegebäuden. Wohnungegebäude sind üblicherweise in viele kleine Räume unterteilt. Die Brand- und Wärmeentwicklung ist in der Anfangsphase gewöhnlich auf einen einzelnen Raum begrenzt. Es ist daher wichtig, die Ausbreitung der heißen Verbrennungsgase auf benachbarte Räume zu verhindern. Hierzu müssen diese soweit abgekühlt werden, damit sie nicht in der Lage sind, brennbares Material zu entzünden. Die relativ niedrige Deckenhöhe und die geringe Größe dieser Räume erhöhen den konvektiven und radiativen Wärmetransport von den brennenden Stoffen zu den übrigen brennbaren Stoffen. Der Hauptaugenmerk wird bei den Untersuchungen auf die Ausflußrate, den Düsendurchmesser sowie auf die daraus resultierenden Tropfendurchmessern gelegt. Es hat sich gezeigt, daß sich der mittlere volumetrische Durchmesser der Tropfengrößenverteilung von geometrisch ähnlichen Sprinklern mit der $1/3$ -Potenz des Wasserdruckes und der $2/3$ -Potenz des Düsendurchmessers ändert. Die Wärmeabsorption durch Sprinkler-Wasser ist eine Funktion der Wärmefreisetzung, der Wasserausflußmenge, der relativen mittleren Tropfengröße sowie der Einflußgrößen Raumgeometrie, Position der Brandquelle und der Position des Sprinklers. Die letzten 3 Einflußgrößen waren bei diesen Untersuchungen konstant. Für den verwendeten Versuchsaufbau ergab sich folgende Korrelation für die Wärmeabsorption E:

$$E = (0,11) d_r^{-0,73} \quad [MW^{-1}] \quad (10)$$

Diese besagt, daß die verdampfte Sprinklerwassermenge direkt proportional zur Wärmefreisetzung und der Wasserausflußrate ist und mit der $-0,73$ -Potenz des relativen mittleren Tropfendurchmessers d_r [mm] variiert. Der Faktor $0,11$ wird aus der speziellen Raumgeometrie sowie der Position der Brandquelle und des Sprinklers ermittelt.

Chow und Fong /45/ untersuchen die Wechselwirkungen zwischen Brand und Sprinkler. Die Berechnung der durch den Brand hervorgerufenen Luftströmung sowie der Temperaturfelder erfolgt durch die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Enthalpie unter Berücksichtigung der Turbulenz. Das eingesprühte Sprinkler-Spray wird durch eine Anzahl von Tropfen verschiedener Anfangsgröße und -geschwindigkeit simuliert. Die Tropfenflugbahnen werden unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes und der Kühlwirkung durch Konvektion beim Durchtritt durch die durch den Brand beeinflusste Rauchschiicht berechnet. In den Untersuchungen wird weder die Unterdrückung der Verbrennung noch die Löschwirkung berücksichtigt. Das verwendete Feldmodell, das die Finite-Elemente-Methode verwendet, ist in der Lage, die 3-dimensionalen Strömungs-, Temperatur- und Druckfelder, die durch eine volumetrische Wärmequelle induziert, werden zu beschreiben. Der Verdampfungseffekt wird vernachlässigt, da von Chow /18/ gezeigt wird, daß der Wärmetransport rein zur Verdampfung wahrscheinlich wesentlich geringer als der konvektive Wärmetransport ist. Die Tropfenflugbahnen werden durch 3-dimensionale Impulsbilanzen unter Berücksichtigung der Schwer- und Widerstandskraft dargestellt. Unter Verwendung der jeweils neuen Tropfenposition, werden Abschnitte auf der jeweiligen Bahnkurve so definiert, daß eine gleichmäßige Tropfenverteilung erzielt wird. Mittels dieser Abschnitte kann die Anzahl der Tropfen im jeweiligen Kontrollvolumen errechnet werden. Die Tropfengrößen jeder Flugbahn werden durch eine Rosin-Rammler-Verteilung (siehe auch Gl. (1)) der Form

$$F(d) = 1 - e^{-(\ln 2) d^2 / d_m^2} \quad (11)$$

dargestellt. $F(d)$ ist hierbei der Massenanteil der Tropfen mit einem Durchmesser kleiner d , d_m ist der mittlere Tropfendurchmesser, der nach folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$d_m = 3,21 We^{-1/3} d_n \quad [m] \quad (12)$$

Die Weber-Zahl We ergibt sich zu

$$We = \rho_w u^2 d_n / \sigma \quad (13)$$

- ρ_w = Dichte des Wassers in kg/m^3
- u = Gasgeschwindigkeit in m/s
- d_n = Düsendurchmesser in m
- σ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit in N/m

Die Wärmemenge, die der Umgebung durch das Sprinkler-Spray entzogen wird, kann durch Aufsummieren der konvektiven Wärmeströme über alle Tropfen erhalten werden. In den Ausführungen wird die Wärmefreisetzungsrates und die Rauchgaserzeugung als Eingabewert vorgegeben, da der Verbrennungsvorgang, abgesehen von einfachen chemischen Reaktionen, nicht genau genug simuliert werden kann. Bei den numerischen Experimenten wird der Raum in Kontrollvolumina mit den Abmessungen $51 \text{ mm} * 9 \text{ mm} * 19 \text{ mm}$ unterteilt. Bei einer Zeitschrittweite von $0,1 \text{ s}$ wird für einen Vax 6420 Minicomputer eine Rechen(CPU)-Zeit von 40 Stunden benötigt. In der Zusammenfassung wird darauf verwiesen, daß sowohl der Verbrennungsprozeß als auch die Effekte durch die Wasserverdampfung berücksichtigt werden sollten. Die theoretischen Ergebnisse konnten bisher nicht durch Versuchsergebnisse belegt werden.

Steen /46/ untersucht einen Sprühstrahl aus Hexan bzw. Heptan, der in einen Raum ohne Wandeinflüsse, in dem sich ruhende Luft befindet, eingespritzt wird. Durch Übertragung des Impulses der versprühten Flüssigkeit an die Luft wird diese mit gerissen, wodurch sich ein Geschwindigkeitsfeld ausbildet, das den Stoffübergang mitbestimmt. Untersucht wird hierbei der Wärme- und Stoffübergang am Einzeltropfen.

Dundas /47/ behandelt in seiner Arbeit die Zielvorstellung, die aufwendigen Tropfengrößenbestimmungen nur für einen Sprinkler und einen Druck durchzuführen und die Werte für andere Sprinkler und Drücke rechnerisch zu ermitteln. Die Kenntnis der Tropfengrößen ist von großer Bedeutung, um die Kühl- bzw. Löschwirkung eines Sprinklers beurteilen zu können. Die beiden Hauptfaktoren, die die Qualität eines Sprinklers ausmachen, sind zum einen die Fähigkeit, die Decke soweit zu kühlen, daß ein vorzeitiges Auslösen von Sprinklern außerhalb der Brandzone verhindert wird, und zum anderen ein Wasserspray zu erzeugen, das in der Lage ist, den Rauchgas-/Flammenbereich bis zur brennenden Oberfläche zu durchdringen und einen Löscheffekt zu erzielen. Kleine Tropfen haben zwar bedingt durch die größere Anzahl eine größere Tropfenoberfläche und erzielen hierdurch eine größere Kühlwirkung, sind jedoch nicht in der Lage, die Auftriebsströmung zu durchdringen. Stattdessen werden kleine Tropfen von dieser mitgerissen. Das Problem wird mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie behandelt. Zur Beschreibung des Sprühnebels wird der mittlere volumetrische Tropfendurchmesser berücksichtigt. Dieser teilt das gesamte Sprayvolumen in zwei gleiche Teile. Der eine Teil enthält Tropfen, die kleiner, der andere Teil Tropfen, die größer als der mittlere Tropfendurchmesser sind. Wenn dieser auf den Düsendurchmesser bezogen wird ergibt sich folgender funktionaler Zusammenhang bei Vorliegen geometrischer Ähnlichkeit der Sprinkler:

$$d_m/d = f[\rho_w / \rho_L, Re, We, \mu_w / \mu_L] \quad (14)$$

f = Funktion von []

d_m = mittlerer volumetrischer Durchmesser

d = Düsendurchmesser

ρ_w = Dichte der Wasser

ρ_L = Dichte von Luft

Re = Reynolds-Zahl

We = Weber-Zahl

μ_w = Viskosität von Wasser

μ_L = Viskosität von Luft

Der Verfasser gibt eine Beziehung zur Berechnung des Tropfendurchmessers d_p als Funktion des Düsendurchmessers d und der Weber-Zahl We an:

$$d_p/d = N / We^{1/3} \quad (15)$$

Diese Gleichung gilt für den Bereich $800 < We < 40000$. Die Konstante N wird für verschiedene Düsen angegeben. Für Standard 1/2-in. Sprinkler beträgt $N = 3,10$. Des weiteren wird in der Arbeit die Theorie der Tropfenerzeugung behandelt. Um die Einflüsse von Druck und Düsendurchmesser zu erfassen, werden Versuche an 6 geometrisch ähnlichen Sprinklern mit Durchmessern von 1/8" bis 1" sowie 5 verschiedenen Drücken durchgeführt. Die Tropfengrößenverteilung wird hierbei mit photographischen Methoden ermittelt und mit den errechneten Werten verglichen. Die Untersuchungen zeigen, daß die gemessenen Tropfengrößenverteilungen am besten durch eine Rosin-Rammler-Verteilung der Form

$$V = 1 - e^{-0,693 d_i^2 / d_m^2} \quad (16)$$

dargestellt werden kann. V ist hierbei der Volumenanteil, der Tropfendurchmesser kleiner als d_i enthält.

Beyler /48/ befaßt sich mit dem Auslöseverhalten von Sprinklern, der Bildung und dem dynamischen Verhalten von Tropfen mit und ohne Brand sowie der Brandbekämpfung. Untersuchungen haben gezeigt, daß der Hauptanteil der Wärme an das Auslöseelement eines Sprinklers durch Konvektion übertragen wird. Die Wärmeübertragung durch Strahlung beträgt ca. 10 % bis 20 % der konvektiven Wärmemenge und wird in dieser Untersuchung vernachlässigt. Der Modellrechnung für das Auslösen eines Sprinklers liegt u.a. die Arbeit von Alpert /49/ zugrunde, wobei eine punktförmige Wärmequelle simuliert wird. Die Tropfenbildung und -größenverteilung wird nach den Angaben von Dundas /47/ beschrieben. Weiterhin wird die Deformation von größeren Tropfen zu Ellipsoiden berücksichtigt. Tropfen, die einen Durchmesser größer als 7,9 mm aufweisen, zerfallen bei Reynolds-Zahlen von 4000 bis 5000. Zur Beschreibung der

Tropfenbewegung wird die Impulsbilanz in 2-dimensionaler Form aufgestellt, wobei die Schwerkraft, die Auftriebskraft und die Widerstandskraft berücksichtigt werden. Bei den Berechnungen kommt man zu dem Ergebnis, daß die Tropfengrößenverteilung sowie die Verteilung der Einsprühgeschwindigkeiten berücksichtigt werden muß. Die Tropfengrößen- und geschwindigkeitsverteilungen sind eine Funktion des Druckes und der Einsprühwinkel. Für die Beschreibung der Tropfenverdampfung wird ein Modell aufgestellt. Es wird daraufhingewiesen, daß man keinen großen Fehler macht, wenn bei der Untersuchung, ob ein Tropfen in der Lage ist, den Rauchgas/Flammenbereich zu durchdringen oder nicht, die Verdampfung vernachlässigt wird. Die Untersuchungen haben ergeben, daß ab einem kritischen Wert der Wärmefreisetzung eine bestimmte Tropfengröße nicht mehr in der Lage ist, den Brandherd zu erreichen. Der Verdampfungsvorgang erlangt erst an Bedeutung, wenn die Kühlwirkung von kleinen Tropfen auf die heißen Gase betrachtet wird. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß der Strahlungswärmeanteil für die Tropfenverdampfung von untergeordneter Bedeutung ist. Nur sehr große Tropfen mit kleinem Oberflächen-/Volumenverhältnis dringen in die Verbrennungszone ein. Die Verweildauer ist gewöhnlich sehr gering (0,1 s bis 0,3 s). Bei der Beschreibung der Löschwirksamkeit bezieht sich der Verfasser u. a. auf die Arbeit von Kung und Hill /50/. Diese untersuchten das Löschen von Holzkrippen- sowie Holzpalettenbränden. Das Löschwasser wird hierbei über gelochte Rohre zugeführt. Es werden empirische Gleichungen aufgestellt, die die Abbrandmasse während des Löschvorganges als Funktion der Wasserbeaufschlagung beschreiben.

Zukoski, Kubota und Cetegen /51/ beschreiben den apparativen Aufbau und die Meßmethode zur Erfassung der Massenströme von auftriebsbehafteten Bränden. Diese werden durch 10 kW bis 200 kW - Methandiffusionsflammen simuliert. Die Luftansaugung wird durch die Größe der Brandquelle, die Wärmefreisetzung und die großen Dichteunterschiede beeinflusst. Der gesamte Massenstrom \dot{m}_c setzt sich aus 4 Anteilen zusammen:

$$\dot{m}_c = (\dot{m}_f + \dot{m}_E + \dot{m}_1) + \dot{m}_2 \quad [\text{kg/s}] \quad (17)$$

\dot{m}_f ist hierbei der Anteil aus dem Verbrennungsprozeß, \dot{m}_e wird im Flammen/Rauchgasbereich aus der Umgebung angesaugt und in den Flammen durch den Verbrennungsprozess bzw. im Rauchgas durch Vermischung erwärmt. Diese beiden Anteile strömen der Decke entgegen und bilden dort eine Rauchzone. Der Anteil \dot{m}_1 kommt durch Wirbelbildung im Deckenbereich, \dot{m}_2 durch weitere Mischprozesse aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen heißem Rauchgas und kalter Umgebungsluft zustande. Letzterer ist oft vernachlässigbar bei Fehlen anderer aktiver Mischprozesse wie der Luftströmung durch eine Tür oder ein Fenster. Die Anteile im Klammerausdruck in der Gleichung (17) stehen im direkten Zusammenhang mit dem Brand und werden als Massenstrom \dot{m}_p bezeichnet. Die Kenntnis dieses Massenstromes ist wichtig, um die Brandentwicklungsphase beschreiben zu können. Die dazugehörige Modellrechnung berücksichtigt u.a. radiale Gauß-Profile für Temperatur und Geschwindigkeit. Der theoretische Rauchgasmassenstrom \dot{m}_{pt} wird in der Form

$$\dot{m}_{pt} = 0,210 \rho_o (g Z)^{1/2} Z^2 / Q^{*1/3} \quad [\text{kg/s}] \quad (18)$$

dargestellt.

ρ_o = Dichte der Umgebung in kg/m^3

g = Erdbeschleunigung in m/s^2

Z = Höhe über dem Brandherd in m

Q^* = dimensionsloser Parameter für die Wärmeentwicklung

Weiterhin wird der Enthalpiestrom, der aus dem Massenstrom \dot{m}_p resultiert, mit der Wärmefreisetzung aus der Verbrennung verglichen. Die Ergebnisse zeigen, daß im Mittel ca. 70 % der Verbrennungswärme in diesen Rauchgasanteil umgesetzt werden. Der größte Anteil der verbleibenden 30 % resultiert aus Strahlungswärmeverlusten. 1/6 oder weniger dieser 30 % wird schätzungsweise durch konvektive Wärmeübertragung an die über dem Brandherd installierte, Haube übertragen.

Alpert /52/ hat die Wechselwirkungen eines Tropfensprays mit

einem Brand vorgegebener Intensität untersucht. Betrachtet wird eine 2-dimensionale achsensymmetrische Strömung von Gas und Tropfen. Der Brand wird durch einen Zylinder mit einer Wärmefreisetzung von 800 kW/m^3 , was einer Gesamtbrandintensität von $3,8 \text{ MW}$ entspricht, simuliert. Der Sprinkler wird durch eine punktförmige Tropfenquelle $0,18 \text{ m}$ unterhalb der Decke dargestellt. Zur Berechnung einer stationären Gasströmung wird ein Gitter von $38 * 38$ finiten Elementen, jeweils vertikal vom Boden zur Decke sowie horizontal von der Symmetrieachse (Brandachse) zur ungestörten Umgebung angeordnet. Untersucht werden die Wassermassenströme $2,3 \text{ kg/s}$, $4,6 \text{ kg/s}$ und $7,0 \text{ kg/s}$, die Tropfeneinsprühgeschwindigkeiten 8 m/s und 16 m/s sowie die mittleren Tropfendurchmesser $0,6 \text{ mm}$, $1,0 \text{ mm}$ und $1,4 \text{ mm}$. Zur Simulation des Sprühnebels eines Sprinklers werden die Tropfen gleichzeitig auf 50 gleichmäßig verteilten Flugbahnen von der Brandachse bis zu einem Winkel von 77° eingesprüht. Die Einsprühdichte auf jeder dieser Tropfenbahnen wird in der Nähe der Sprinklerdüse gleichmäßig über der Raumwinkeleinheit angenommen. Zur Verringerung der Rechenzeit wird nur eine einzige Tropfengröße berücksichtigt. Für die Einsprühgeschwindigkeit des Tropfens wird ein Wert von 60% der Geschwindigkeit aus der Düse angenommen. Hierdurch wird eine gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Wasserverteilungen ca. 3 m unterhalb des Sprinklers erzielt. Der Sprühschatten durch den Sprinklerdeflektor wird nicht berücksichtigt. Bei der Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Sprinkler und Brand muß die zusätzliche Gasmasse durch die Verdampfung des Wassers, der Impulstransport durch die Widerstandskräfte sowie die Kühlwirkung des Sprühnebels infolge Tropfenaufheizung und -verdampfung berücksichtigt werden. Hierzu werden in der Untersuchung die repräsentativen Tropfendurchmesser verfolgt und die Massenvergrößerung, der Impulstransport sowie die Kühlwirkung im Volumenelement erfaßt. Iterativ wird dann die Änderung der Gasströmung durch den Tropfeneinfluß sowie die entsprechenden Änderungen der Tropfenflugbahnen durch die Gasströmung bestimmt. Es wird erwähnt, daß $0,6 \text{ mm}$ große Tropfen in der Nähe der Sprühachse zurück zur Decke abgelenkt werden und schließlich außerhalb der Brandzone auf den Boden ge-

langen. Für 1,4 mm große Tropfen wird eine 50 % größere Durchdringungsfähigkeit angegeben. In der Arbeit werden die Ergebnisse für die Berechnung der Temperatur- und Strömungsfelder mit und ohne Sprayeinfluß, die Tropfenflugbahnen sowie das Verhältnis von Sprayimpuls zum Impuls der Rauchgasströmung in Diagrammen wiedergegeben. Weiterhin wird der kritische Tropfendurchmesser berechnet, der die maximale Tropfengröße darstellt, die gerade noch durch eine vorgegebene Auftriebsströmung gestoppt wird. Es wird angegeben, daß bei Überschreitung dieses kritischen Wertes mehr als 80 % der Wassermenge, die den Brandherd ohne Auftriebsströmung erreichen würde, den Brandherd im realen Brandfall erreicht. Die Berechnung des Rauchgasimpulses sowie des kritischen Tropfendurchmessers erfolgt nach Heskestad /53/. Weiterhin wird eine Gleichung zur Abschätzung des kritischen Wasserstromes, der erforderlich ist, um die Auslösung von weiteren Sprinklern zu verhindern, angegeben.

Heskestad /53/ hat eine Reihe von Beziehungen zur Berechnung von Kenngrößen für die " Fire Plume " (s.a. Drysdale /23/) zusammengestellt. Hierzu zählen Flammenhöhe, Temperatur, Geschwindigkeit, Rauchgaszusammensetzung sowie die Ansaugung von Luft aus der Umgebung. Der Verfasser geht weiterhin ein auf die Wärmefreisetzung bei Bränden. Es wird u.a. erwähnt, daß bei einem Lachenbrand von z.B. Methanol oder Heptan die gemessene Wärmefreisetzung ungefähr mit der theoretischen Wärmefreisetzung bei vollständiger Verbrennung übereinstimmt, daß dagegen bei einem Polystyrolbrand ca. 45 %, bei einem Holzpalettenstapel ca. 63 % des theoretischen Wertes freigesetzt werden. Bei der Ermittlung der Flammenhöhe ist festzustellen, daß der untere Teil einer Flamme eine ziemlich gleichmäßige Helligkeit aufweist, während der obere Teil flackert. Dieses Flackern ist mit einer Wirbelbildung verbunden. Zur Berechnung einer mittleren Flammenhöhe L wird die folgende Beziehung angegeben:

$$L/D = - 1,02 + 15,6 N^{1/5} \quad (19)$$

mit

D : Äquivalenter Durchmesser des Brandherdes in m

N : Dimensionsloser Parameter zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^5$

$$N = \left[\frac{c_p T_\infty}{g \rho_\infty^2 (H_c / r)^3} \right] \frac{\dot{Q}^2}{D^5} \quad (20)$$

c_p : Spezifische Wärmekapazität von Luft in kJ/kg K

g : Erdbeschleunigung in m/s^2

T_∞ : Umgebungstemperatur in K

ρ_∞ : Dichte der Umgebung in kg/m^3

H_c : Unterer Heizwert in kJ/kg

r : stöchiometrischer Massenanteil Luft/Flüchtige Bestandteile in kg/kg

\dot{Q} : = $\dot{m}_f H_c$: Gesamte Wärmefreisetzung in kW

\dot{m}_f : Abbrandmasse in kg/s

Diese Beziehung gilt für horizontale Brandoberflächen, wie z.B. bei Flüssigkeitslachenbränden, aber nicht für Brände mit ausgeprägter Verbrennung im Inneren des Materials. Sie kann jedoch näherungsweise dann angewendet werden, wenn gleich oder weniger als 1/3 der flüchtigen Bestandteile im Inneren der Brand-last durch eindringenden Luftsauerstoff oxidiert wird. Brandquellen mit ausgeprägter innerer Verbrennung sind z.B. auch mit großen Öffnungen versehene oder gut durchlüftete Holzkrippen. Zur Berechnung des Radius der Rauchgassäule b_{dT} sowie der Achswerte für die Temperaturerhöhung ΔT_0 und Rauchgasgeschwindigkeit u_0 werden folgende Beziehungen angegeben:

$$b_{dT} = 0,12 \left(T_0 / T_\infty \right)^{1/2} (z - z_0) \quad [m] \quad (21)$$

$$\Delta T_0 = 9,1 \left[T_\infty / (g c_p^2 \rho_\infty^2) \right]^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad [K] \quad (22)$$

$$u_0 = 3,4 \left[g / (c_p \rho_\infty T_\infty) \right]^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{-1/3} \quad [m/s] \quad (23)$$

T_0 : Mittlere Achstemperatur in der Rauchgassäule in K

z : Höhe über der Brandlastoberfläche in m

z_0 : Abstand des virtuellen Ursprunges von der Brandlastoberfläche in m
(Bei negativem z_0 liegt der virtuelle Ursprung unterhalb der Brandlastoberfläche)
Zur Erläuterung s. Bild 5

\dot{Q}_c : konvektiver Wärmestrom in der Rauchgassäule in kW

Die Gleichungen (21) bis (23) gelten nur für Brände ohne innere Verbrennungsvorgänge. Durch die Schwierigkeit, bei Hochregallagern zu entscheiden, ob beträchtliche innere Verbrennungsvorgänge vorliegen oder nicht, ist es in diesem Fall zulässig, für eine Abschätzung den virtuellen Ursprung des Brandes mit der Brandoberfläche zu identifizieren und $z_0 = 0$ zu setzen. Es wird angegeben, daß bei Bränden mit konvektiven Wärmeströmen zwischen 10 kW und 10000 kW die maximale Strömungsgeschwindigkeit der Gase zwischen 3,0 m/s und 11,8 m/s liegen. Zur Berechnung der Konzentration der Verbrennungsprodukte im nichtreagierenden Gasstrom wird folgende Beziehung angegeben:

$$C_i / \Delta T = (M / M_i) c_p \dot{m}_i / \dot{Q}_c \quad (24)$$

$C_i / \Delta T$ ist hierbei das Verhältnis aus mittlererem Volumenanteil C der Gaskomponente i an einem Ort bezogen auf die Temperaturerhöhung ΔT am gleichen Ort.

C_i : in m^3 / m^3

\dot{m} : Gasentwicklung der Komponente i in kg/s

M : Molekulargewicht von Luft

M_i : Molekulargewicht der Gaskomponente i

Für die Berechnung des Massenstromes in der Flammen/Rauchgassäule unter der Berücksichtigung der Ansaugung von Luft gilt unter Normalbedingungen:

- für den Bereich des nicht reagierenden Rauchgasstromes

$z \geq z_1$:

$$\dot{m} = 0,071 \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} [1 + 0,026 \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}] \quad (25)$$

in [kg/s].

Diese Gleichung ist begrenzt auf Lachenbrände oder Brände mit horizontalen Oberflächen und liefert ungenaue Ergebnisse bei Brandquellen mit innerer Verbrennungszone.

-für den mit reaktiven Flammenbereich $z < z_1$:

$$\dot{m} = 0,0054 \dot{Q}_c z / (0,166 \dot{Q}_c^{2/5} + z_0) \quad [\text{kg/s}] \quad (26)$$

z_1 wird hierbei als diejenige Höhe definiert, bei der der Achswert der Temperaturerhöhung 500 K beträgt. Diese läßt sich nach der Beziehung

$$z_1 = z_0 + 0,166 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (27)$$

unter Normalbedingungen berechnen.

Die Gleichungen (19) bis (27) gelten unter der Bedingung, daß sich die Größe des Brandes mit der Zeit nicht verändert. Es ist jedoch möglich, die Beziehungen für den stationären Fall im instationären Fall quasi-stationär anzuwenden, wenn der Brand die anfängliche Zündphase überschritten hat.

Alpert /54/ untersucht für den stationären achsensymmetrischen Fall einen in der Nähe einer Decke eingesprühten Sprühnebel, der auf eine auftriebsbehaftete Rauchgasströmung trifft. Die Gasbewegung wird iterativ analog zu turbulenten, rezirkulierenden 2-dimensionalen Strömungsfeldern behandelt. Die Koppelung zwischen Tropfen- und Gasphase geschieht durch die " Particle-Source-In-Cell "-Methode nach Crowe, Sharma und Stock /55/. Hierbei werden für jedes Volumenelement die Tropfenverdampfung, die Widerstandsänderungen sowie der Kühl-effekt als Funktion der Massen-, Impuls- und Energieänderung gelöst. Zur Berechnung der geänderten Viskosität aufgrund der Wirbelbildung wird ein Turbulenz-Modell berücksichtigt. Die Diskretisierung erfolgt durch jeweils 16 bis 22 Elemente in

horizontaler und vertikaler Richtung. Deren Größe wird variabel gestaltet, so daß an der Düse und in der Nähe des Bodens die größte Auflösung erzielt wird. Es werden einige verschiedene Strömungssituationen simuliert, wie ein Wasserschleier in ruhender Luft oder ein Wasserschleier in einer durch Wind bewegten Erdgasströmung. Der Sprühnebel wird durch Tropfenbahnkurven mit gleichmäßig zwischen 0° und 90° verteilten Einsprühwinkeln simuliert. Zur Ermittlung des Kühleffektes des Sprays wird ein engerer Sprühkegel, bestehend aus 8 im Bereich zwischen der Symmetrieachse und einem Winkel von 57° gleichmäßig verteilten Einsprühwinkeln gewählt. Die auf jeder Bahnkurve eingesprühte Flüssigkeitsmasse wird in jedem Raumwinkel des Sprühkegels gleichmäßig verteilt angenommen. Alle Tropfen werden mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit eingesprüht. Aus Messungen des Anfangsaxialimpulses des Sprühnebels eines automatischen Sprinklers wird die Einsprühgeschwindigkeit zu ungefähr 12,4 m/s bei einem Druck an der Düse von 207 kPa entsprechend einem Wassermassenstrom von 1,94 kg/s ermittelt. Unter Variation des Sprayimpulses ergaben sich für die durch die Wassertropfen absorbierte Wärmemenge Werte zwischen 4 % und 34 % des Gesamtenergiestromes im Rauchgas. Diese Energieabsorption entspricht einem nahezu konstanten Wert von 2,5 % der möglichen Kühlwirkung durch Tropfenaufheizung und -verdampfung. Die Spitzenwerte der Gasgeschwindigkeit und -temperatur werden auf 37 % bis 50 % gegenüber den ungestörten Werten herabgesetzt. Kleine Änderungen im Tropfendurchmesser scheinen diesbezüglich ebenfalls bedeutende Auswirkungen zu haben.

3. DARSTELLUNG DER PROBLEMATIK DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN DEM TROPFENSCHWARM EINES SPRINKLERS UND EINEM BRAND

Bei der Literaturlauswertung hat sich gezeigt, daß es nur relativ wenige Untersuchungen gibt, die sich mit den Wechselwirkungen von Partikeln in einem Schwarm befassen. Die Mehrzahl dieser Arbeiten behandeln die Sedimentation von Partikeln in Flüssigkeiten bei schleichender Umströmung.

Beim Tropfenschwarm eines Sprinklers, der sich in einer Rauchgasgegenströmung bewegt, sind die Verhältnisse weitaus komplizierter. Das Sprinklerspray hat die Hauptaufgabe, die auftriebsbehaftete Rauchgasströmung zu durchdringen und die brennende Oberfläche zu löschen. Weiterhin werden die Flamme, die heißen Rauchgase, besonders unter der Decke, gekühlt. Dadurch wird das Auslösen einer zu großen Zahl von Sprinklern verhindert. Weiterhin wird die Brandlast, die der direkten Einwirkung des Brandes ausgesetzt ist, benässt und gekühlt. Der Wassersprühnebel kann ebenfalls die Infrarotstrahlung des Brandes vermindern.

Während des Löschvorganges laufen 3-dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas/Luftgemisch, ab. Beim Einsprühen des Sprühwassers aus dem Sprinkler liegen bisher nur wenige Erkenntnisse über die Größe und Richtung der Geschwindigkeit der Tropfen vor. Hier machen sich besonders die Einflüsse der verschiedenen Deflektoren bemerkbar. Durch den Zerstäubungsvorgang wird ein Tropfenspektrum erzeugt, das durch einen mittleren Tropfendurchmesser nur bedingt beschrieben werden kann. Dieses Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung. Durch das Einsprühen kommt es zu einer mehr oder weniger starken Ablenkung der Gasströmung. Gleichzeitig wird durch das Spray Umgebungsluft angesaugt. Die Kühlwirkung des Sprays hat eine Verminderung des Auftriebes der Gase zur Folge. Durch die Kühlung wird somit der Temperaturgradient als auch die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Rauchgas beeinflusst, was wiederum Einfluß

auf die Reynolds-, Nusselt- und Sherwood-Zahlen zur Berechnung des Impuls-, Wärme- und Stoffaustausches hat. Sowohl durch die Verdampfung der Wassertropfen als auch durch den bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampf wird die Feuchtigkeit des umgebenden Gases erhöht, was einen verminderten Konzentrationsgradienten in der Stoffbilanz zur Folge hat. Hierdurch und durch die Änderung der Temperatur werden vor allem die Stoffwerte der Gasphase beeinflusst. Die Verringerung des Tropfendurchmessers hat einen geringeren Impuls und damit eine geringere Durchdringungsfähigkeit des Sprays, sprich Löschwirkung, zur Folge. Die Kühlwirkung ist allerdings bei kleineren Tropfen durch einen größeren Wärmeübergangskoeffizienten besser. Der Stoffübergangskoeffizient nimmt ebenfalls mit abnehmendem Tropfendurchmesser zu. Die Größe des Brandes ist, bedingt sowohl durch den Abbrand als auch durch den Löscheintritt eine Funktion der Zeit. Die Menge der durch den Brand angesaugten Luft ist hiervon direkt abhängig. Innerhalb des Tropfenschwarmes kommt es je nach Tropfenzkonzentration zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Wechselwirkungen. Die Tropfenzkonzentration im Strömungsfeld hängt zum einen vom Bewegungszustand der Tropfen durch die Wechselwirkung mit der Rauchgasströmung und zum anderen vom Sprühbild des Sprinklers ab, ob z.B. ein Sprühschatten vorhanden ist oder nicht. Dabei ändern sich sowohl die Abstände zwischen den Tropfen als auch deren Geschwindigkeit nach Größe und Richtung. Alle diese Änderungen sind stochastischer Natur. Beim Rauchgas kommt es zu einer turbulenten Rezirkulation. Gleichzeitig wirkt sich das turbulente Flammenflackern des Brandes auf das Tropfenverhalten aus. Die Wirkung der Turbulenz besteht darin, daß sich der Hauptströmung die zufälligen räumlichen Schwankungsbewegungen von Fluidelementen verschiedener Größe und Geschwindigkeit überlagern. Die Tropfen folgen diesen Schwankungsbewegungen nach Maßgabe ihrer Frequenzen. Einen weiteren Einfluß üben benachbarte Wände, Bauteile, Lagerstapel, Lüftungsöffnungen etc. auf das Strömungsfeld aus. Bei Sprinklern, die große Tropfen erzeugen, gewinnen die Effekte der Tropfendeformation und des Tropfenzerfalles an Bedeutung. Bei der Tropfendeformation sind die Gesetzmäßigkeiten für die starre Kugel nur noch bedingt anwendbar. Bei Tropfen, die auf-

grund der Rauchgasgegenströmung ihre Bewegungsrichtung umkehren, treten nichtvorhersagbare Wechselwirkungen mit den nachfolgenden Tropfen auf. Hier sei besonders auf die Auswirkungen von Kollisionen und Koagulationen hingewiesen.

Wie aus diesen komplexen Vorgängen und Wechselwirkungen zu ersehen ist, müssen für die geplante rechnerische Simulation Vereinfachungen, auch in bezug auf die Rechenzeit und Speicherkapazität der verwendeten EDV-Anlage, getroffen werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Ein Sprinklerspray hat die Hauptaufgabe, die auftriebsbehaftete Rauchgasströmung eines natürlichen Brandes zu durchdringen und die brennende Oberfläche zu löschen. Weiterhin werden die Flamme, die heißen Rauchgase sowie benachbarte Bauteile und Brandlast gekühlt.

Als Fortsetzung der bisher an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung der Wechselwirkungen eines Einzeltropfens mit einer, realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung, unter besonderer Berücksichtigung der Löschwirksamkeit, wird damit begonnen, dieses auf den realen Fall eines Tropfenschwarmes zu erweitern.

Der geplanten rechnerischen Simulation geht eine Literaturliteraturauswertung voraus, die sich mit dieser Problematik beschäftigt.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß es sich hierbei um sehr komplexe Wechselwirkungen innerhalb des Systems Sprinkler/Brand handelt, die in den einzelnen Arbeiten nur zum Teil oder nur qualitativ erfaßt werden. Während des Löschvorganges laufen 3-dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas/Luftgemisch, ab. Durch den Zerstäubungsvorgang wird ein Tropfenspektrum erzeugt, das

durch einen mittleren Tropfendurchmesser nur bedingt beschrieben werden kann. Dieses Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung. Durch das Einsprühen kommt es zu einer mehr oder weniger starken Beeinflussung der Rauchgasströmung, welche wiederum eine Rückwirkung auf das Spray hat. Die hierdurch hervorgerufene Änderung der Relativgeschwindigkeit hat einen Einfluß auf die jeweiligen Kennzahlen des Wärme-, Stoff- und Impulstransportes. Die Verdunstung und die Verdampfung der Wassertropfen erhöhen die Feuchtigkeit der umgebenden Luft bzw. des Rauchgases. Dieses hat ebenfalls einen Einfluß auf die Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen, u.a. durch Änderung des Konzentrationsgradienten zwischen Tropfen und Umgebung sowie durch die Veränderung der Stoffwerte, vor allem auf der Gasseite.

Bei einer rechnerischen Simulation müssen zum einen wegen bisher quantitativ nicht erfaßbarer Einflußgrößen, zum anderen zur Begrenzung der Rechenzeit und der Anforderungen an die Speicherkapazität der EDV-Anlage Vereinfachungen getroffen werden.

5. 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-
wehrrangelegenheiten.
Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1985.
- /8/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 2: Literaturübersicht und Be-
rechnungsgrundlagen für die Wärme-
übertragung bei Tropfen in einer
Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrrangelegenheiten.
Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1985.
- /9/ 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-
wehrrangelegenheiten.
Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1986.

- /10/ 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.
- /11/ 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.
- /12/ 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.
- /13/ Alpert R.L.: Numerical Modeling of the Interaction
Between Automatic Sprinkler Sprays
and Fire Plumes.
Fire Safety Journal, 9, 1985,
S. 157-163

- /14/ Alpert R.L. Calculation of Large-Scale Flow Fields
Mathews M.K.: Induced by Droplet Sprays.
Factory Mutual Research Corporation
Norwood, Massachusetts, 1979
- /15/ Heskestad G., Air Entrainment into Water Spray
Kung H.C. Curtains.
Todtenkopf ASME Paper No. 76-WA/FE-40, 1976
N.F.:
- /16/ Heskestad G. Air Entrainment into Water Sprays.
Kung H.-C. Factory Mutual Research Corporation
Todtenkopf Norwood, Massachusetts, 1981
N.F.:
- /17/ Brauer H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehr-
phasenströmungen.
Frankfurt/Main: Verlag Sauerländer
1971
- /18/ Brauer H. Bewegung von Partikelschwärmen.
Thiele H.: Chemie-Ing.-Techn., 45. Jahrg.,
Nr. 13, 1973, S. 909 - 912
- /19/ Bright D.S. Air Flows Induced by Sparse Clouds
Fletcher R.A. of Droplets.
Baum H.R.: Aerosol Science and Technology,
Vol. 3, 1984, S. 187 - 193
- /20/ Chow.W.K.: On the Evaporation of a Sprinkler
Water Spray.
Fire Technology, Vol. 25, No.4,
1989, S. 364 - 373
- /21/ Clift R. Bubbles, Drops and Particles.
Grace J.R. New York: Academic Press 1978
Weber M.E.:

- /22/ Dlouhy J. Heat and Mass Transfer in Spray Drying.
Gauvin W.H.: American Institute of Chemical Engineers
(A.I.C.H.E.) Journal Vol.6, No. 1, 1960,
S. 29 - 34
- /23/ Drysdale D.: An Introduction to Fire Dynamics.
Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
1985
- /24/ Fraser R.P. Cooling Hot Gas with Evaporating Spray.
Dombrowski N. British Chemical Engineering, Vol. 8,
Johns W.R.: No. 6, 1963, S. 390 - 391
- /25/ Gogos G. A Model for the Evaporation of a Slowly
Ayyaswamy P. Moving Droplet.
S.: Combustion and Flame, 74, 1988,
S. 111 - 129
- /26/ Gruhn G. Mechanische Verfahrenstechnik.
Fratzscher W. Bd. 1, Leipzig: VEB Deutscher
Krug H. Verlag für Grundstoffindustrie
Militzer K.-E. 1977
Schubert M.
Schulze R.:
- /27/ Hanisch E.: Untersuchung des Wärme- und Stoff-
überganges in Sprühwolken von
Druckluftdüsen.
Dissertation Technische Universität
Dresden, 1970
- /28/ Hein J.-C. Fortschritte in der Zerstäubungs-
Rafflenbeul trocknungs-Technologie.
R. Chem.-Ing.-Tech. 54, Nr. 9, 1982,
Beckmann M.: S. 787 - 792

- /29/ Krämer M.: Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Tropfen in turbulenter Strömung im Hinblick auf Verbrennungsvorgänge. Dissertation Universität Karlsruhe, 1988
- /30/ Masters K.: Spray Drying Handbook. 3.Auflage, New York: John Wiley & Sons Inc. 1979
- /31/ Morgan H.P.: Heat Transfer From a Buoyant Smoke Layer Beneath a Ceiling to a Sprinkler Spray. 1- A Tentative Theory. Fire and Materials, Vol. 3, No.1, 1979, S. 27 - 33
- /32/ Morgan H.P. Baines K.: Heat Transfer From a Buoyant Smoke Layer Beneath a Ceiling to a Sprinkler Spray. 2- An Experiment. Fire and Materials, Vol. 3, No. 1, 1979, S. 34 - 38
- /33/ Pilhofer Th. Mewes D.: Siebboden-Extraktionskolonnen. Weinheim: Verlag Chemie, 1979
- /34/ Prah J.M. Wendt B.: Discharge Distribution Performance for an Axisymmetric Model of a Fire Sprinkler Head. Fire Safety Journal, 14, 1988, S. 101 - 111
- /35/ Ravigururajan R.S. Beltran M.R.: A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets. Fire Safety Journal 15, 1989, S. 171 - 181

- /36/ Sellens R.W. A Simplified Prediction of Droplet
Brzustowski Velocity Distributions in a Spray.
T.A.: Combustion and Flame, 65, 1986,
 S. 273 - 279
- /37/ Schirrmann J. Instationäre Stofftransportprozesse
Brauer H.: an fluiden Partikeln veränderlichen
 Volumens.
 VDI Forschungsheft 652, Düsseldorf
 1989
- /38/ Schmidt P. Zerstäuben von Flüssigkeiten.
Walzel P.: Chem.-Ing.-Techn. 52, Nr. 4, 1980,
 S. 304 - 311
- /39/ Schubert M. Sprühturmtechnik.
Viehweg H.: Leipzig: VEB Deutscher Verlag für
 Grundstoffindustrie 1969
- /40/ Viehweg H.: Die Bedeutung des Einteilchen- Model-
 les für die Sprühturmtechnik.
 Dissertation Universität Dresden,
 1973
- /41/ Viehweg H. Die Dimensionierung von Sprühtürmen
Biess G. mit Hilfe von elektronischen Rechen-
Weber B.: maschinen.
 Chem. Techn., 20. Jg, Heft 10, 1968
- /42/ Yao C. Effect of Drop Size on Sprinkler
Kalelkar A.S.: Performance.
 Fire Technology, 6, Nr. 4, 1970,
 S. 254 - 268
- /43/ Rost M.: Stationäre automatische Feuerlösch-
 anlagen- ihre risikogerechte
 Dimensionierung und Gestaltung.
 Dissertation Technische
 Universität Magdeburg, 1988

- /44/ Kung H.C.: Cooling of Room Fires by Sprinkler Spray.
Journal of Heat Transfer, Vol. 99, 1977,
S. 353 - 359
- /45/ Chow W.K. Numerical Studies in the Sprinkler Fire
Fong N.K.: Interaction Using Field Modelling
Technique.
Proceedings of the Interflam '90
Conference, University of Kent,
Canterbury, England 1990
- /46/ Steen H.: Untersuchungen zur Verdunstung
in Sprühstrahlen.
Dissertation Technische Hochschule
Aachen, 1973
- /47/ Dundas P.H.: The Scaling of Sprinkler Discharge:
Prediction of Drop Size.
Progress Report No.10
Factory Mutual Research Corporation
Norwood, Massachusetts, 1974
- /48/ Beyler C.L.: The Interaction of Fire and Sprinklers.
National Bureau of Standards,
Washington, 1977
- /49/ Alpert, R.L.: Turbulent Ceiling- Jet Induced by
Large- Scale Fires,
Combustion Science and Technology,
Vol. II, 1975, pp. 197 - 213
- /50/ Kung H.-C. Extinction of Wood Crib and Pallet
Hill J.P.: Fires.
Combustion and Flame, 24, 1975,
S. 305 - 317
- /51/ Zukoski E.E. Entrainment in Fire Plumes.
Kubota T. Fire Safety Journal, 3,
Cetegen B.: 1980/81, S. 107 - 121

- /52/ Alpert R.L.: Calculated Spray Water-Droplet Flows
in a Fire Environment.
Technical Report,
Factory Mutual Research Corporation
Norwood, Massachusetts 1986
- /53/ Heskestad G.: Engineering Relations for Fire Plumes.
Fire Safety Journal, 7, 1984,
S.25 - 32
- /54/ Alpert R.L.: Calculated Interaction of Sprays with
Large-Scale Cross Flows and Buoyant
Opposed Flows.
Technical Report,
Factory Mutual Research Corporation
Norwood, Massachusetts 1982
- /55/ Crowe C.T. The Particle-Source-In-Cell Model for
Sharma M.P. Gas Droplet Flows.
Stock D.E.: Journal of Fluids Engineering, June
1977, p. 325

6. TABELLEN UND BILDER

Tabelle 1 : Eindringtiefe für verschiedene Tropfengrößen und Anfangsgeschwindigkeiten als Funktion der Rauchgasgeschwindigkeit nach Yao und Kalelkar /42/.

V [ft/s]	Z ₁ [ft]	Z ₂ [ft]	Z ₃ [ft]	Z ₄ [ft]
20	∞	∞	∞	1,50
30	∞	3,02	1,85	0,67
40	(0,25)	(0,75)	0,81	0,35
50	Zerfall	(0,17)	0,39	0,22
60	Zerfall	Zerfall	0,18	0,13

V = Rauchgasgeschwindigkeit

Z₁ = Eindringtiefe von Tropfen mit 6 mm Durchmesser mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 10 ft/s.

Z₂ = Eindringtiefe von Tropfen mit 4 mm Durchmesser mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 20 ft/s.

Z₃ = Eindringtiefe von Tropfen mit 2 mm Durchmesser mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 20 ft/s.

Z₄ = Eindringtiefe von Tropfen mit 1 mm Durchmesser mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 15 ft/s.

Bei den Werten in Klammern besteht eine große Tendenz zum Zerfall.

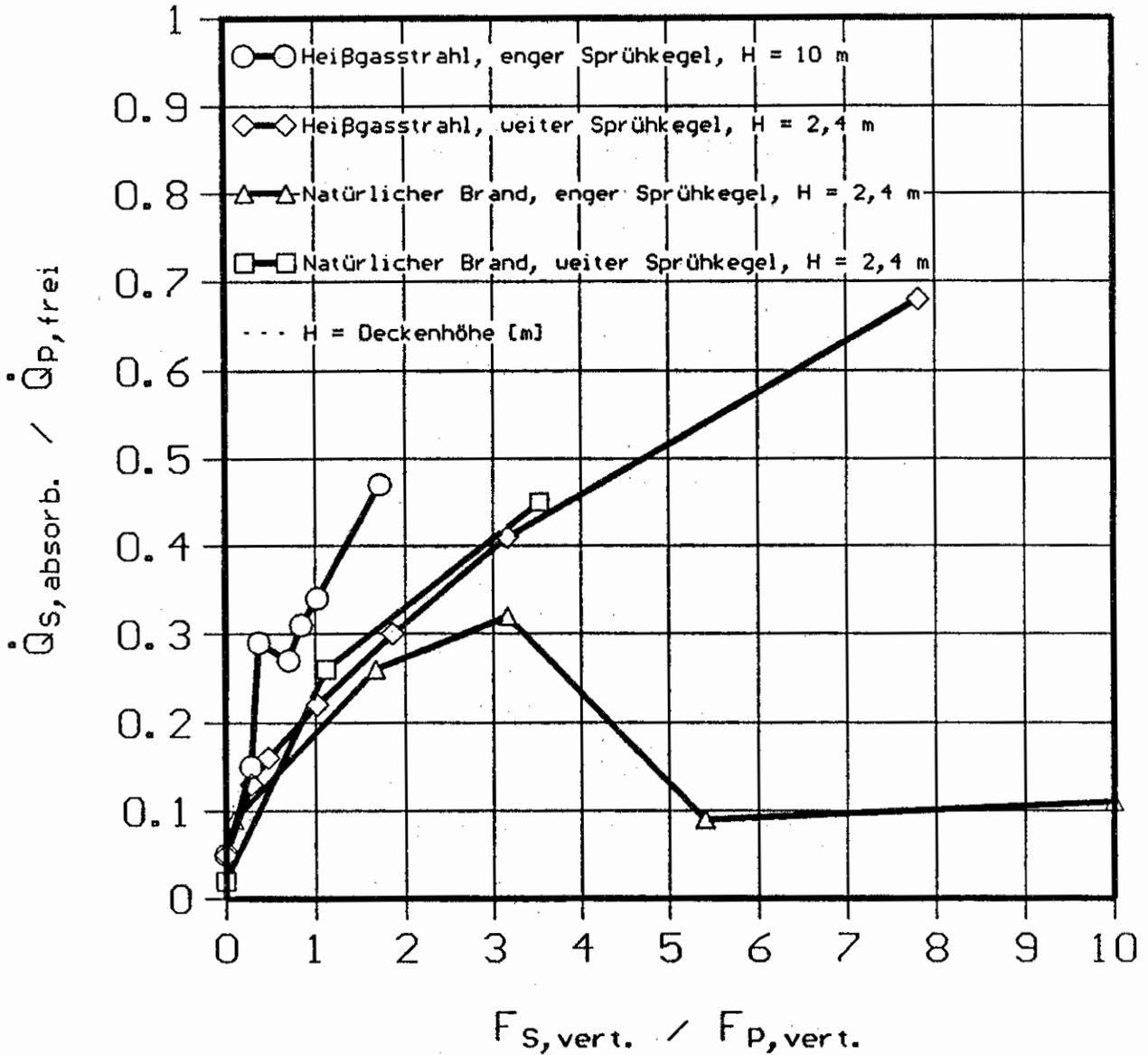


Bild 1 Kühlwirkung (Wärmeabsorption) $\dot{Q}_{S, \text{absorb.}}$ eines Sprühnebels bezogen auf die Wärmefreisetzung der unbeeinflussten Energiequelle $\dot{Q}_{P, \text{frei}}$ als Funktion des Verhältnisses aus der vertikal nach unten gerichteten Kraft des Sprays $F_{S, \text{vert.}}$ am Sprinkler und der vertikal nach oben gerichteten Kraft der Heißgasströmung $F_{P, \text{vert.}}$ bei maximaler Wärmefreisetzung nach Alpert /13/.

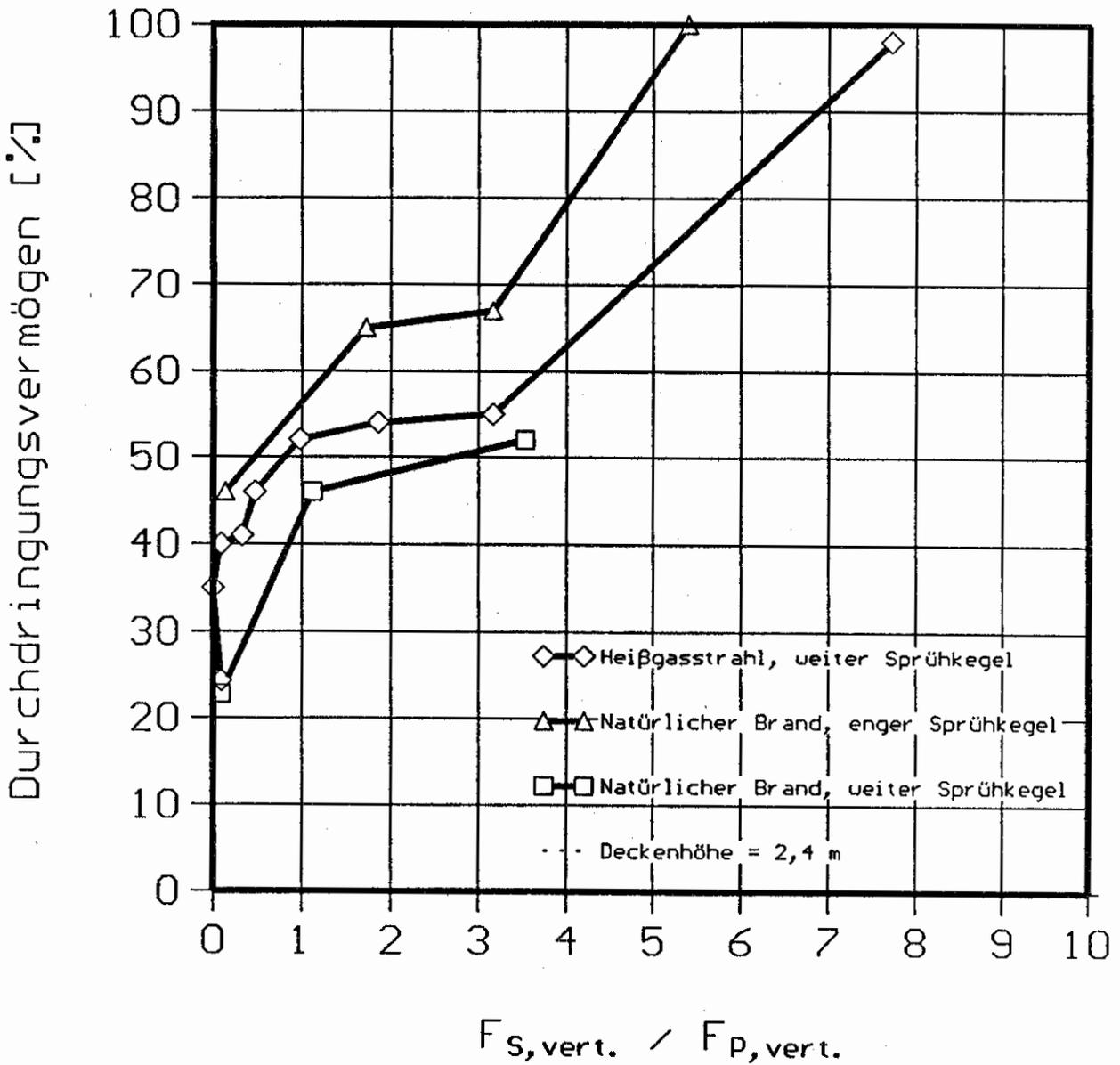


Bild 2 Wassermassenstrom der den Brandherd erreicht, bezogen auf den nicht durch eine Heißgasströmung beeinflussten Wasserstrom als Funktion des Verhältnisses der vertikal nach unten gerichteten Kraft des Sprays $F_{S,vert.}$ am Sprinkler und der vertikal nach oben gerichteten Kraft der Heißgasströmung $F_{P,vert.}$ bei maximaler Wärmefreisetzung nach Alpert /13/.

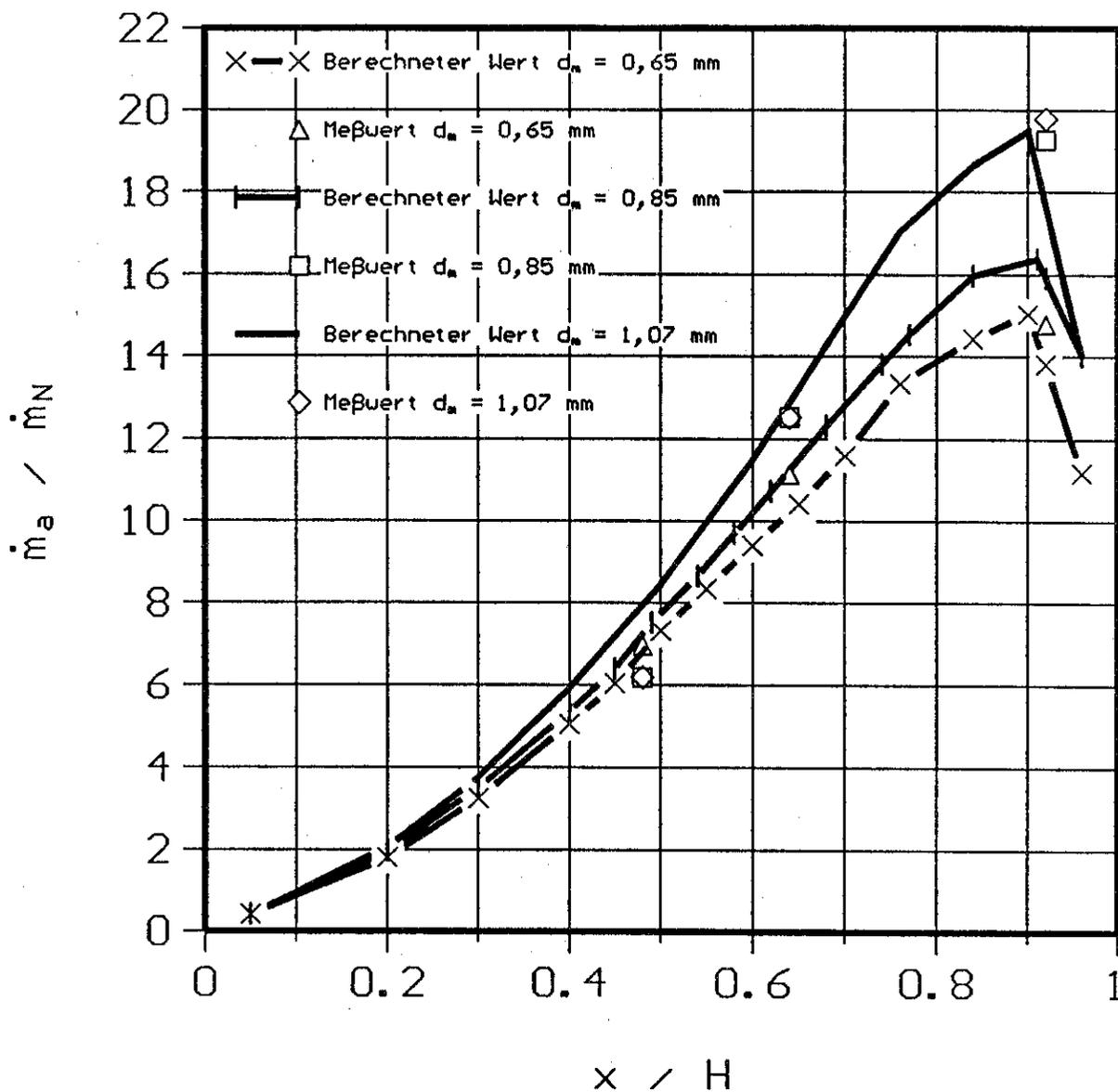


Bild 3 Verhältnis des durch ein Spray bewegten Luftmassenstromes \dot{m}_a bezogen auf den eingesprühten Wasserstrom \dot{m}_N als Funktion des auf die Gesamthöhe H normierten Abstandes von der Decke x und des Tropfendurchmessers nach Heskestad, Kung und Tottenkopf /15/.

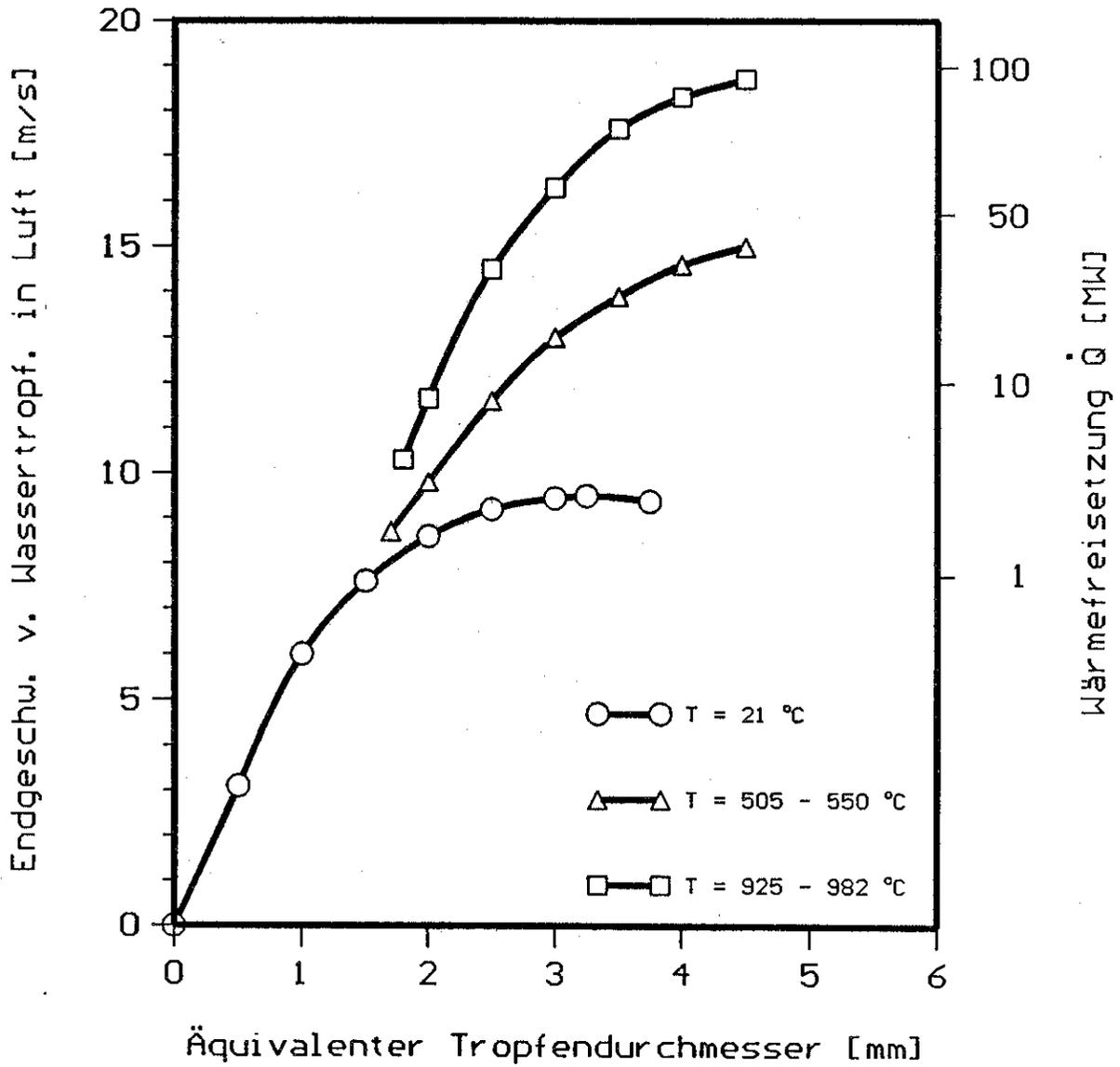


Bild 4 Endgeschwindigkeit von Wassertropfen definierten Durchmessers in Luft, die noch in der Lage sind, die Heißgasströmung eines Brandes vorgegebener Größe zu durchdringen nach Drysdale /23/.

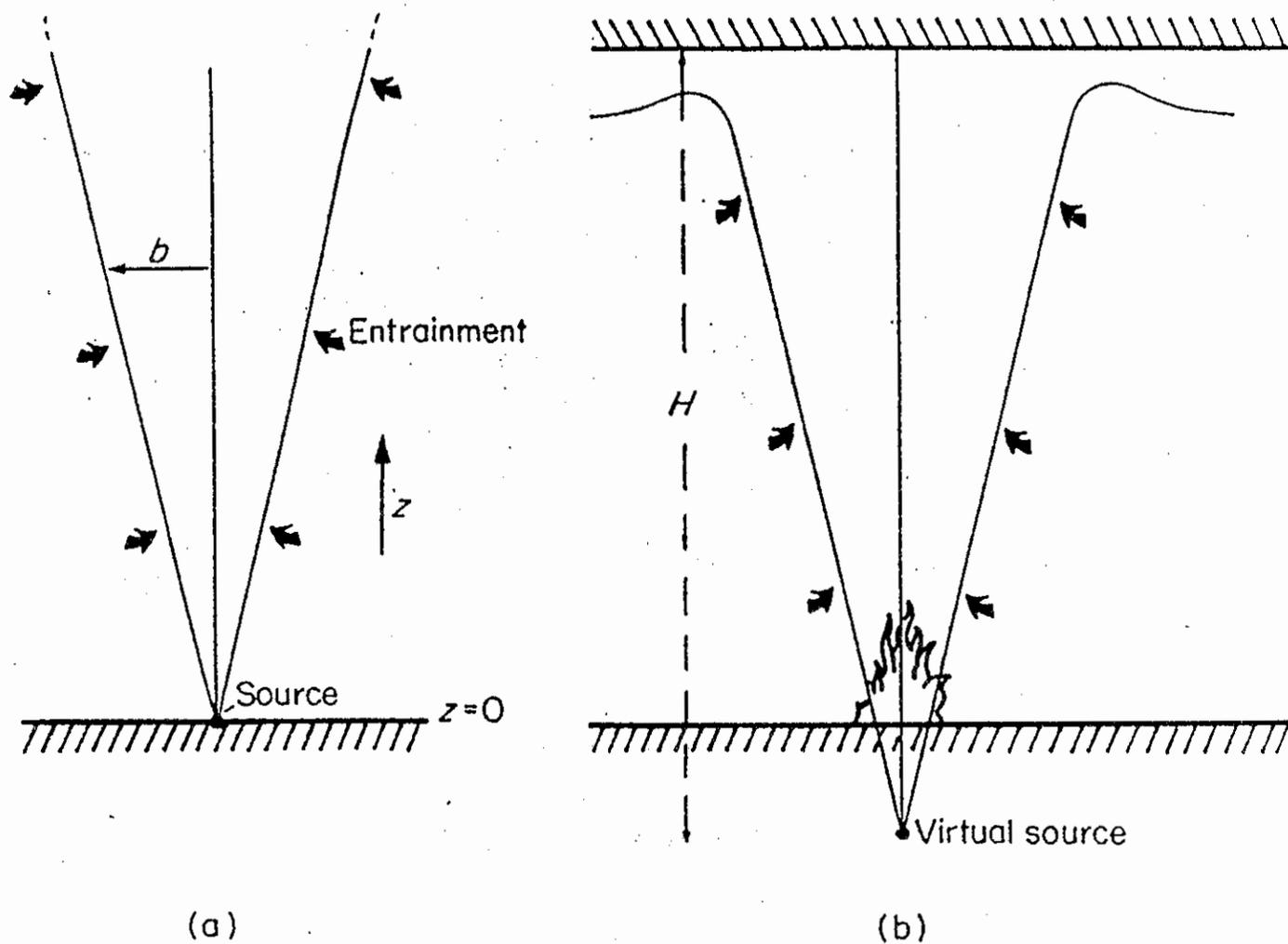


Bild 5 Der Auftriebsbereich einer Heißgasströmung ('buoyant plume') bei einer punktförmigen Energiequelle (a) bzw. einem realen Brand (b), der mit einer Decke in Wechselwirkung steht, unter Kennzeichnung dessen virtuellen Ursprunges nach Drysdale /23/.