

AGF

BERICHTE

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

7

"Wasserzerstäubung in Mehrzweckstrahlrohren"

- Kurzfassung -

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LANDESDIENSTSTELLEN
FÜR FEUERSCHUTZ IN DEN BUNDESLÄNDERN (AGF)

ARBEITSGEMEINSCHAFT FEUERSCHUTZ

AGF

Forschungsbericht Nr. 7

"Wasserzerstäubung in Mehrzweckstrahlrohren"

von

Dr.-Ing. B.R. Hinrichs †

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Technischen Hochschule Karlsruhe

70 Seiten mit 38 Bildern und 26 Literaturstellen

Auszugsweise Wiedergabe von Dr.-IngP.G. Seeger
Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1965

EINLEITUNG

Mehrzweckstrahlrohre der Feuerwehren haben die Aufgabe, das Löschwasser entweder als Voll-, d.h. als geschlossen austretender Strahl, oder in viele feine Tröpfchen aufgeteilt als Sprühstrahl abzugeben. In Stellung Sprühstrahl wird dem Wasserstrom durch zweckentsprechende Einrichtungen eine Drehbewegung (ein Drall) aufgezwungen und dadurch die Zerstäubung vor der Düsenmündung erreicht. Andere Arten einer Zerstäubung ohne Drall-Anwendung, z.B. die Zerstäubung durch Prall, (beispielsweise Auftreffen des Wassers auf parallel in der Düsenmündung angeordnete Drähte oder Zusammentreffen mehrerer Wasservollstrahlen außerhalb der Düse) haben sich bis jetzt aus verschiedenen Gründen nicht durchsetzen können. Die Gefahr einer Verstopfung ist sehr groß und die Verteilung des Sprühstrahls löschtaktisch nicht befriedigend. Man kann sich daher wegen der zahlenmäßig geringen Anwendung solcher Rohre bei den folgenden Überlegungen allein auf die "Drallzerstäubung" beschränken, ohne dabei unzulässige Vereinfachungen vorzunehmen.

Es soll im Rahmen dieser Arbeit versucht werden, die Strömungsvorgänge, die letzten Endes löschtaktisch wirksam sind, in einem Strahlrohr zu klären und die Tropfenwolke zu analysieren, um sie anschließenden Überlegungen zugänglich zu machen. Das Ergebnis dieser Überlegungen und Untersuchungen soll es sein, mit möglichst einfachen und sicheren Meßverfahren die Tropfenverteilung in einem Gemisch zu bestimmen.

STRÖMUNGSVORGÄNGE IM STRAHLROHR

Bei Anordnung des Schaltorgans in Vollstrahlstellung kann das Wasser ungehindert durch das Rohr fließen und die Wasserteilchen vollführen im Wesentlichen eine translatorische Bewegung. Ausserhalb der Düse schießt das Wasser in einem zusammenhängenden Strahl in die freie Atmosphäre. Eine nachfolgende Auflösung erfolgt durch Einwirkung von Oberflächen-, Trägheits- und Zähigkeitskräften auf die Außenschichten des Strahles, die durch die Relativbewegung zwischen dem Wasserstrahl und der Luft zustande

kommen. Zur Erreichung einer möglichst großen Wurfweite sollte der Wasserstrahl lange geschlossen zusammen bleiben, um über große Entfernung Wasser an die Brandstelle zu bringen.

Beim Sprühstrahl wird eine Aufteilung des Wasserstrahles zur Verbesserung der Löschwirkung bewußt unter Inkaufnahme einer geringeren Wurfweite angestrebt. Der Wasserfluß im Strahlrohr sieht beim Sprühstrahl folgendermaßen aus: In dem Schaltorgan wird das Wasser durch Leitbleche oder Drallöffnungen geführt. Beim Austritt aus diesen Öffnungen erhält die Strömung eine Geschwindigkeit in die 3 Koordinatenachsen. Eine dieser Koordinatenachsen (x-Achse) soll mit der Längsachse des Strahlrohres zusammenfallen; die beiden anderen y- und z-Achsen stehen dann senkrecht dazu. Durch das dem Schaltorgan nachfolgende Rohr wird jedoch die freie Bewegung des Wassers in y- und z-Richtung behindert und der translatorischen Bewegung des Wassers wird lediglich eine rotatorische Bewegung überlagert. Damit fließt das Wasser spiralenförmig zur Düsenmündung und kann hier in der freien Atmosphäre nunmehr die ihm aufgezwungenen Geschwindigkeiten in die x-, y- und z-Richtung einschlagen. Aus den Geschwindigkeitskomponenten v_x in x-Richtung, v_y in y-Richtung und v_z in z-Richtung läßt sich vektoriell die effektive Austrittsgeschwindigkeit ermitteln. Sind einem Wasserstrom solche Geschwindigkeiten aufgezwungen worden, so hat er einen Drall erhalten, und die Aufteilung des Wassers in Tropfen wird allgemein mit Drallzerstäubung bezeichnet. Bei der Drallzerstäubung zerlegt sich der Wasserstrom auch ohne Luftreibung außerhalb der Düse in viele einzelne Tropfen.

Auf dem Wege durch das dem Schaltorgan nachfolgende Rohr wird die Geschwindigkeit der Flüssigkeit nochmals gesteigert, weil zur Düse hin eine Einengung im Durchmesser stattfindet. Es erfolgt eine Umsetzung des Druckes in kinetische Energie, was eine Geschwindigkeitssteigerung in achsparalleler Richtung zur Folge hat. Die rotatorische Bewegung bleibt in ihrer Größe dagegen konstant.

THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR BERECHNUNG DES ZERSTÄUBUNGSVORGANGES

Bei theoretischer Berechnung der Strömungsverhältnisse in einer Dralldüse muß von der idealen Strömung ausgegangen werden. Die Einflüsse durch innere und äußere Reibungskräfte können nur empirisch Berücksichtigung finden, d.h. sie können in den Gleichungen nur durch Zusatzglieder ausgedrückt werden. Für diese Strömung gilt zunächst die Bernoullische Energiegleichung.

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{const.} \quad (1)$$

Hierin bedeutet: p der statische Druck, ρ die Dichte und v die Strömungsgeschwindigkeit.

In jeder Querschnittsebene des Rohres muß, (unter der Voraussetzung der Reibungsfreiheit) die Energie konstant bleiben. Das gilt bis zur Düsenmündung. Außerhalb des Rohres, also in der freien Atmosphäre, wirken Luftwiderstände auf die Strömung ein, welche die Annahme eines reibungsfreien Verlaufes des Wasserflusses nicht mehr zulassen. Bis zur Mündung der Düse ist die Flüssigkeit geschlossen zusammen. Erst nach Austritt aus der Mündung findet eine Aufteilung des Strahles in viele kleine Tropfen statt. Die zur Zerstäubung aufzubringende Energie wird demzufolge auch erst in der freien Atmosphäre dem Wasserstrom entzogen und der kinetischen Strömungsenergie entnommen. Innerhalb des Strahlrohrsystems kann dieser Betrag rechnerisch nicht in Erscheinung treten.

Bei der theoretischen Behandlung des Strömungsvorganges in dem Strahlrohr gilt neben der Bernoulli-Gleichung (1) der Drallsatz für die drehungsfreie Kreisbewegung, aus dem folgt, daß

$$v_t \cdot r = \text{const.} \quad (2)$$

sein muß. In Gleichung (2) ist v_t die Strömungsgeschwindigkeit in tangentialer Richtung und r der Radius. Der Drall bleibt in dem gesamten Strahlrohr unter der Annahme der Reibungsfreiheit konstant.

In der Mitte der Düsenachse muß ein flüssigkeitsfreier Raum bleiben, da mit $r \rightarrow 0$ die Geschwindigkeit nicht unendlich groß werden kann. Dieser achsnahe flüssigkeitsfreie Raum steht mit der Außenatmosphäre in Druckgleichheit. Aus dieser Bedingung folgt, daß sich bei Drallzerstäubung Hohlstrahlen ausbilden.

Weiterhin gilt die Kontinuitätsbedingung:

$$Q = F \cdot v_a = \text{const.} \quad (3)$$

Hierin ist Q die Durchflußmenge und F die Fläche im Strahlrohr mit v_a als der zugehörigen Axialgeschwindigkeit.

Der Impulssatz hat bei diesen im Mittel stationären Strömungen ebenfalls Gültigkeit. Er lautet:

$$\rho \cdot F_D \cdot v_a^2 = \text{const} \quad (4)$$

mit F_D als Fläche des Düsenquerschnittes, wenn die betrachteten Ebenen senkrecht zur Mittelachse des Förderstromes liegen. Mit ihr läßt sich die Reaktionskraft der ausströmenden Flüssigkeit (allgemein als Rückdruck bezeichnet) leicht berechnen:

$$Rü = \rho \cdot \pi (R^2 - r_i^2) v_a^2 \quad (5)$$

Hierin bedeutet R der Radius der Düse und r_i der Radius des in der Düse rotationssymmetrisch freien Wasserraumes.

Aus Gleichung (3) und Gleichung (5) ergibt sich für den Radius r_i folgende Beziehung:

$$r_i = R^2 - \frac{Q^2 \cdot \rho}{Rü} \quad (6)$$

Diese Beziehung macht es möglich, aus dem experimentell bestimmten Wert des Rückdruckes und dem Düsendurchmesser den flüssigkeitsfreien Raum im Strahl zu ermitteln.

Beim Ausfluß von Flüssigkeiten aus Düsen in die freie Atmosphäre tritt eine Reaktionskraft auf. Die Größe dieser Kraft richtet

sich nach der durchfließenden Menge, der Geschwindigkeit und der Flüssigkeitsdichte. Beim Sprühstrahl ist dieser Rückdruck geringer als beim Vollstrahl. Es ist deshalb naheliegend, den Rückdruck oder die Rückdruckdifferenz zwischen Voll- und Sprühstrahl zur Beurteilung der Zerstäubung heranzuziehen.

Eine rechnerisch analytische Bestimmung der Größe der entstehenden Tropfen wurde von verschiedenen Seiten versucht. Da jedoch mehrere Einflußgrößen sowohl der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten als auch der konstruktiven Ausführung der Zerstäubungsorgane in eine theoretische Erfassung eingehen, bereitet die Aufstellung von Formeln erhebliche Schwierigkeiten. Die meisten Veröffentlichungen enthalten deshalb vorwiegend experimentelle Versuchsergebnisse mit empirisch aufgestellten Gleichungen für ganz bestimmte Düsenkonstruktionen. Eine allgemeine Auswertung und Übertragung der Ergebnisse auf andere Zerstäubungssysteme mit anderen Flüssigkeiten ist deshalb nicht möglich.

In einer neueren Arbeit befaßt sich Troesch [1] eingehend mit diesen Problemen. Auf Grund von Überlegungen hat er zwei grundsätzliche Annahmen getroffen,

- 1.) daß der größte Tropfen mit dem Durchmesser d_{\max} eines Tropfengemisches durch ein Stabilitätsgesetz bestimmt wird und
- 2.) daß alle anderen kleineren Tropfen nach einer statistischen Gesetzmäßigkeit entstehen.

Diese Erkenntnis ist sehr bedeutungsvoll, da damit die Güte eines Zerstäubers wesentlich nach dem größten Tropfen beurteilt werden kann. Sie liegt den weiteren Überlegungen zugrunde.

Gebhardt [2] versuchte, aus anderen Überlegungen heraus zu einem größten Durchmesser d_{\max} zu kommen. Er führte dabei Ähnlichkeitsbetrachtungen durch und verglich diese mit Ergebnissen aus praktischen Versuchen. Aus diesen Ähnlichkeitsbetrachtungen und aus umfangreichen Versuchsergebnissen erhielt Gebhardt für die Berechnung des größten Tropfendurchmessers die Beziehung:

$$d_{\max} = \frac{3,72 \cdot R^{0.56} \cdot A^{0.11}}{\left(\frac{\sqrt{b} \cdot p}{\sigma}\right)^{0.33}} \quad (7)$$

mit

$$A = \frac{10^6 \cdot \eta^2}{2 \cdot \sigma \cdot \rho} \quad \text{und}$$
$$b = \left(\frac{r_i}{R}\right)^2$$

Hierin ist η die dynamische Zähigkeit und σ die Oberflächenspannung. In dieser Gleichung stecken nicht nur die physikalischen Eigenschaften der zu zerstäubenden Flüssigkeiten, sondern durch den Ausdruck $b = (r_i/R)^2$ auch die Konstruktion der Versprüheinrichtung. Je stärker der Drall in der Strömung ist, um so größer wird der innere Durchmesser r_i . Andererseits wird dadurch der maximale Tropfendurchmesser d_{\max} um so kleiner.

Durch diese Überlegungen ist es gelungen, aus dem Wasserdurchfluß Q und dem Rückdruck $Rü$ an der Düse ohne sonstige Versuchswerte den größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfen zu bestimmen, wenn die physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit und der Durchmesser R der Düsenmündung bekannt sind.

Troesch [1] hat die Verteilung der Tropfen hinsichtlich ihrer Durchmessergröße nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmt und ist von der Annahme ausgegangen, daß die Gesamtoberfläche des Tropfengemisches während des Austauschvorganges konstant sein soll. Unter dem Austauschraum versteht man denjenigen Teil eines Sprühstrahles, in dem die aus dem Flüssigkeitsstrahl losgerissenen Teilmassen in Tropfen zerfallen. Die Aufteilung der Tropfen wurde von Troesch in einzelne Durchmesserbereiche vorgenommen. Seine Untersuchungen ergaben, daß die beste Übereinstimmung mit dem Experiment vorliegt, wenn der Durchmesser d von Bereich zu Bereich um einen konstanten Betrag vergrößert wird, statt wie es auch möglich wäre, die Bereiche immer um einen konstanten Betrag des Volumens oder der Oberflächen der Tropfen zu verändern. So ergibt sich folgende Funktion für die Tropfenzahl-Häufigkeit:

$$\frac{dn/n_0}{dx} = \frac{e^{-\beta/x} / x^3}{\int_0^1 e^{-\beta/x} dx / x^3} \quad (8)$$

Die Integration ergibt die dazugehörige Funktion der Summenkurve wie folgt:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{e^{-\alpha} (1-\alpha)}{e^{-\beta} (1+\beta)} \quad (9)$$

mit

$$\alpha = \frac{\beta}{x} \quad \text{und} \quad x = \frac{d}{d_{\max}}$$

Bedingung ist somit $0 \leq x \leq 1$. Der Parameter β ist als einzige Größe frei wählbar und muß für bestimmte Zerstäuberkonstruktionen experimentell bestimmt werden. Für die Mehrzweckstrahlrohre kann man diesen Parameter zu $\beta \approx 0,3$ annehmen.

Aus den vielen Tropfen uneinheitlicher Größe in einem Gemisch bildet man üblicherweise einen sogenannten mittleren Tropfendurchmesser, der den allgemeinen Zerstäubungsgrad einer Düse kennzeichnet. Dieser Mittelwert läßt sich verschieden definieren [3] und kann sich zahlenmäßig erheblich unterscheiden. Es sind mehrere Ansätze zur Festlegung eines mittleren Tropfendurchmessers vorgeschlagen worden. Am häufigsten wird er in der Literatur so definiert, daß aus dem Tropfen einheitlicher Größe bestehende Ersatzgemisch dasselbe Verhältnis von Volumen und Oberfläche aufweisen soll wie das zu definierende Gemisch.

$$d_m = \frac{\sum i_n d_n^3}{\sum i_n d_n^2} = \frac{\int_0^{d_{\max}} d^3 du}{\int_0^{d_{\max}} d^2 du} = d_{\max} \frac{\int_0^1 x^3 du}{\int_0^1 x^2 du} \quad (10)$$

Diese Definition erscheint für die Sprühstrahlen in der Feuerlöschtechnik günstig, weil einerseits die zugeführte Wassermenge und andererseits die Tropfenoberfläche berücksichtigt werden. Herterich [3] hat diesen Ansatz erstmals für das Löschwesen eingeführt.

Setzt man für d_n den Wert aus Gleichung (8) in Gleichung (10) ein und integriert, so ergibt sich der mittlere Tropfendurchmesser zu:

$$d_m = d_{\max} \cdot \beta \cdot \frac{-e^{-\beta}}{\beta \cdot \text{Ei}(-\beta)} - 1 \quad (11)$$

$\text{Ei}(-\beta)$ ist eine allgemein gebräuchliche Bezeichnung für die Integralexponentialfunktion. Die Funktion für d_m enthält nur noch den frei wählbaren Parameter β , der bei der Bestimmung der Tropfenzahl-Häufigkeitskurve bereits auftrat.

Damit ist es auf Grund einer Rückdruck- und Wasserdurchflußmessung an einem Drallzerstäuberstrahlrohr möglich, nicht nur den größtmöglichen in einem Gemisch vorkommenden Tropfen zu ermitteln, sondern auch nach einer statistischen Wahrscheinlichkeitsrechnung die Verteilung aller übrigen Tropfengrößen festzulegen und den "mittleren Tropfendurchmesser" zu bestimmen. Eine wesentlich leichtere Beurteilung des Zerstäubungsgrades eines Strahlrohres ist dadurch möglich.

Je stärker ein dem Wasser aufgezwungener Drall ist, um so größer wird die rotierende Drehgeschwindigkeit. Mit der Drehkomponente wächst gleichzeitig der Öffnungswinkel 2α des Sprühstrahls. Diesen kann man deshalb zur Beurteilung der Zerstäubung heranziehen. Mit dieser Überlegung ergibt sich: Je größer der Strahlwinkel 2α ist, um so feiner sind die Wassertropfen. Im folgenden soll deshalb eine Beziehung zwischen dem Strahlwinkel α und dem dem Wasser aufgezwungenen Drall hergestellt werden.

Bei den Betrachtungen soll von der Grundidee von Söhngen und Grigull [4] ausgegangen werden, daß der Strahlwinkel α aus der Umfangsgeschwindigkeit U des am Düsenrand austretenden Wassers und der Axialgeschwindigkeit v_a gebildet werden kann, was mit Hilfe einiger Annahmen zu folgender Beziehung für den Strahlwinkel α führt:

$$\text{tg } \alpha = \frac{R \cdot R_1 \cdot \pi \cdot \cos \gamma}{F_1} \quad (1 - b) \quad (12)$$

Hierin ist R_1 der Radius der exzentrischen Einströmung, F_1 der Gesamtquerschnitt der Drallbohrungen und γ der Steigungswinkel der Schraubenlinie der Wasserströmung.

Mit dieser Gleichung hat man eine Beziehung zwischen dem Strahlwinkel α des Sprühstrahles und den konstruktiven Eigenschaften des Rohres geschaffen. Durch Veränderungen in der Versprüheinrichtung kann der Sprühwinkel in gewünschter Art beeinflusst werden. Es ist ebenfalls leicht zu übersehen, daß bei Voraussetzung der Reibungsfreiheit für jeden Wasserdurchsatz und damit auch für jeden Druck am Strahlrohr sich der gleiche Strahlwinkel α einstellt. Die physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten beeinflussen den Strahlwinkel nicht.

Die Auflösung dieser Beziehung nach dem Halbmesser r_i des rotationssymmetrisch wasserfreien Raumes in der Düse ergibt folgende Gleichung:

$$r_i^2 = R^2 - \frac{R \cdot F_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot R_1 \cdot \cos \gamma} \quad (13)$$

Man hat damit eine weitere Möglichkeit geschaffen, den Tropfen mit dem größten Durchmesser d_{\max} in einem Gemisch nach Gleichung (7) zu bestimmen. Dazu braucht nur der Strahlwinkel α gemessen zu werden. Die Wasserdurchflußmessung und die Rückdruckmessung an einem Strahlrohr fallen fort, wie sie zur Bestimmung von r_i nach Gleichung (6) erforderlich waren. Die Werte für R , R_1 , F_1 und γ sind bauartmäßig festgelegt.

VERGLEICH DER THEORETISCHEN ERKENNTNISSE MIT VERSUCHSERGEBNISSEN AN MEHRZWECKSTRAHLROHREN

Um festzustellen, ob die bisher gewonnenen theoretischen Erkenntnisse mit den Sprühstrahlen der derzeitigen Strahlrohre übereinstimmen, wurden vier Mehrzweckstrahlrohre verschiedener Konstruktionen untersucht, die hauptsächlich bei den Feuerwehren verwendet werden. Die Versprüheinrichtung ist bei allen Rohren im Schaltgehäuse eingebaut, entweder im Küken selbst oder in dem dem Küken

umgrenzenden Bereich. Zur besseren Beurteilung der Sprühstrahlen wurden die Untersuchungen auf Wasserdrücke von 40 bis 250 m WS am Strahlrohr ausgedehnt.

Die Aufnahmen von den Tropfengemischen wurden in 5 m Entfernung vor der Düsenmündung gemacht. Mit einem selbst gebauten Kurzzeitblitzgerät konnten fotografische Aufnahmen von den fliegenden Tropfen im Strahl aufgenommen werden, so daß sie als Kreisgebilde auf dem Filmmaterial erkenntlich wurden. Die Aufnahmetechnik ist in der Arbeit [5] näher beschrieben. Für die Auszählung wurden jeweils mehrere zeitlich und im Sprühstrahl selbst verschieden gelegene Aufnahmen genommen und im allgemeinen mindestens 1000 Tropfen vermessen.

Die zahlenmäßige Verteilung der Tropfen in den einzelnen Durchmesserbereichen wächst zunächst von den Bereichen mit kleinen zu denen mit größeren Durchmessern, um recht bald wieder abzusinken. Bemerkenswert ist dabei, daß in den letzten Bereichen mit größeren Durchmessern immer noch einzelne Tropfen auftauchen oder in einer Zelle bei größer werdendem Tropfendurchmesser mehr Tropfen gemessen wurden als in der vorhergehenden. Nach den vorliegenden Erfahrungen liegt hier eine Verfälschung der wirklichen Verteilung der Tropfen im Sprühstrahl vor. Diese Verfälschung ist einmal durch die Aufnahmetechnik bedingt. An der Vorderkante des in den Sprühstrahl hineinragenden Rohres setzt sich Wasser ab und wird durch die Windbewegungen in die Fotografierebene mitgerissen. Diese an der Rohrkante abgerissenen Tropfen sind wesentlich größer als diejenigen des eigentlichen Sprühstrahles. Zum anderen wurde bei den vorhergehenden theoretischen Überlegungen die Voraussetzung gemacht, daß kein Zusammenfließen von Tropfen nach ihrer Entstehung und keine weitere Aufteilung außerhalb des Entstehungsraumes stattfindet. Durch das in den Sprühstrahl hineinragende Rohr wird das strömende Tropfen-Luft-Gemisch jedoch in nicht definierbarer Weise beeinflusst. Es ist deshalb möglich, daß auch durch diese Strömungsveränderungen einzelne Tropfen zusammentreffen und eine Verfälschung erbringen.

In der Gesamtzahl der ausgezählten Tropfen des Gemisches machen diese nicht regulären Tropfen nur einen geringen Prozentsatz aus.

Sie wirken sich bei der Aufstellung der Verteilungskurve über der dimensionslosen Ziffer d/d_{\max} und bei der Ermittlung des mittleren Tropfendurchmessers jedoch stark aus, weil die Durchmesser zur dritten bzw. zweiten Potenz eingehen. Zur besseren Beurteilung des ausgewerteten Tropfenbildes wurden deshalb Korrekturen vorgenommen und die offensichtlich durch äußere Einflüsse entstandenen, im Sprühbild mit fotografierten Tropfen gestrichen.

Unter Berücksichtigung dieser Korrektur wurden die ausgezählten Tropfenbilder ausgewertet. Als Beispiel sollen ein Teil der Ergebnisse der Messungen an einem der vier Strahlrohre wiedergegeben werden. Die prozentuale Tropfenverteilung in den einzelnen Durchmesserbereichen ist durch die Summenkurve in Bild 1 dargestellt. Die Meßpunkte fallen eng mit der eingezeichneten Tropfenanzahlsummenkurve nach Gleichung (9) mit dem Parameter $\beta = 0,25$ zusammen. Für die vier vermessenen Rohre wurden bei den insgesamt 24 aufgestellten Tropfenverteilungen folgende Parameter β ermittelt:

$$\begin{aligned}\beta &= 0,25 && \text{bei } 16 \text{ Tropfengemischen,} \\ \beta &= 0,3 && \text{bei } 6 \text{ Tropfengemischen,} \\ \beta &= 0,35 && \text{bei } 2 \text{ Tropfengemischen.}\end{aligned}$$

Man kann aus diesen Untersuchungen daher folgern, daß für die derzeitigen Strahlrohre mit den Versprüheinrichtungen im Schaltgehäuse der für die Aufstellung der Tropfenverteilung nach Gleichung (8) empirisch zu ermittelnde Parameter β zwischen 0,25 und 0,3 liegt. Wird der größere Wert $\beta = 0,3$ genommen, so erfolgt damit eine ungünstigere Beurteilung in bezug auf die Tropfenverteilung und den mittleren Tropfendurchmesser d_m . Der Verfasser schlägt deshalb vor, für die derzeit gebräuchlichen Strahlrohrarten mit $\beta = 0,3$ zu rechnen. Unter dieser Voraussetzung liegt man auf der sicheren Seite der Beurteilung, und zwar finden sich im Tropfenspektrum eher mehr solche mit kleinerem als mit größerem Durchmesser.

In Bild 2 ist die effektive Verteilung der Tropfen in den Gemischen für zwei der sechs verschiedenen Druckstufen wiedergegeben. In diesem Bild gilt der gleiche Durchmesser d_{\max} für die beiden empirisch ermittelten Kurven, während der Parameter $\beta = 0,25 =$ konstant gesetzt ist, wie er aus Bild 1 gewonnen wurde. Man stellt

im wesentlichen eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und der theoretisch nach Gleichung (8) ermittelten Kurve fest. Bei der Darstellung fällt jedoch auf, was auch die Messungen im Fall der anderen vier Druckstufen bestätigten, daß jeweils eine der empirischen Kurven mit der theoretischen ungefähr zusammenfällt, die zweite dagegen eine gewisse Abweichung zeigt. Diese Abweichung kann allein aus der Auswertung der Tropfenbilder und vor allem der Einteilung in Durchmesserbereiche herrühren.

Der mittlere Durchmesser der Tropfengemische wurde nach Gleichung (10) unter Berücksichtigung der angeführten Korrektur bestimmt. Für die Tropfengemische in den Sprühstrahlen eines der vier Strahlrohre ergaben sich folgende Werte für die mittleren Durchmesser d_m :

Wasserdruck am Strahlrohr [m WS]	40	80	120	160	200	250
d_m [mm]	0,95	0,91	0,90	0,84	0,70	0,60

Bei 2 der übrigen 4 vermessenen Rohre lagen die mittleren Tropfendurchmesser bei den Druckbereichen bis 250 m WS ebenfalls zwischen 0,6 und 1 mm, bei dem vierten dagegen bei 1,15 bis 1,48 mm.

Das Verhältnis d_m/d_{max} schwankt für die vermessenen Rohre zwischen 0,4 bis 0,6, doch liegt das Verhältnis im allgemeinen zwischen 0,45 und 0,5. Über das Durchmesser Verhältnis d/d_{max} kann man mit Hilfe der Gleichung (11) zu dem empirisch zu ermittelnden Parameter β gelangen. Für die vermessenen Rohre finden wir dabei mit den oben angegebenen Werten für d/d_{max} den Parameter β zu $0,25 \leq \beta \leq 0,35$; in der Mehrzahl liegt β etwas unter 0,3. Damit wird bestätigt, daß der aus den Tropfenanzahlsummenkurven gewonnene Parameter β richtig ermittelt wurde.

Zur Bestimmung eines maximalen Durchmessers in einem Tropfengemisch nach den Gleichungen (6) und (7) müssen die Wasserdurchflußmenge Q und der Rückdruck $Rü$ bestimmt werden. Dazu ist es

erforderlich, den Wasserdruck H konstant zu halten, was durch entsprechende Regelorgane mit ausreichender Genauigkeit erreicht werden kann. Die Meßwerte Q und $Rü$ müssen dagegen sehr exakt bestimmt werden, um eine Berechnung von d_{max} in zulässigen Toleranzbereichen zu gewährleisten. Wie sich aus den vorhergehenden Betrachtungen ergeben hat, liegt der maximale Durchmesser d_{max} nach Messungen im Bereich von 2 mm.

Die Wassermengenmessung erfolgt am sichersten und zuverlässigsten nach den VDI-Durchflußmeßregeln DIN 1952. Eine genauere Messung als $\pm 1\%$ ist bei diesen Verfahren mit genormten Düsen oder Blenden nicht möglich. Bei den rechnerisch zu erwartenden Rückdrücken ist eine Messung auf $\pm 0,01$ kp nur mit erheblichem meßtechnischem Aufwand zu erzielen, d.h. ebenfalls bis zu 1% des Absolutbetrages. Bei diesen möglichen Abweichungen verändert sich der maximale Durchmesser in nicht mehr zulässigen Grenzen und liegt für das erwähnte Beispiel zwischen 1 und 3 mm. Mit den heutigen Meßmethoden ist es nicht möglich, den Rückdruck $Rü$ und die Wasserdurchflußmenge Q so genau zu bestimmen, daß man durch Rechnung einen maximalen Durchmesser ermitteln und damit eine Aussage über die Güte der Versprühung machen kann.

Mit der Gleichung (13) hat man eine weitere Möglichkeit, den Radius r_i des wasserfreien Raumes im Strahl innerhalb der Düse zu bestimmen und damit d_{max} zu erhalten. Statt der Durchflußmenge Q und des Rückdruckes $Rü$ müssen nunmehr einige konstruktive Daten des Drallzerstäubungsorgans bekannt sein und es ist der Strahlwinkel α zu messen.

Die konstruktiven Daten lassen sich an den Strahlrohren ausmessen bzw. sind aus den Zeichnungsunterlagen zu entnehmen. Der Strahlwinkel ist leider nur sehr ungenau zu bestimmen. Über die Messung des Strahlwinkels an Sprühstrahlrohren berichtet Hinrichs [6] und zeigt die dabei entstehenden Schwierigkeiten auf. Diese Schwierigkeiten liegen darin, daß der Sprühstrahl schon kurz nach dem Austritt aus der Düse keine scharfe äußere Abgrenzung hat und von einem sogenannten Mantelstrahl umgeben wird, in dem sich noch viele kleine Tropfen befinden. Die äußere Kontur des Mantelstrahls läßt sich ebensowenig exakt ermitteln wie die des Kernstrahls,

weil der Übergang vom Mantel- zum Kernstrahl kontinuierlich erfolgt. Weiterhin wird von dem Sprühstrahl Luft in den Strahl hineingezogen, wodurch die hyperbolische Form der äußeren Strahlkontur weitgehend verwischt wird. Der in der Gleichung (13) eingesetzte Strahlwinkel ergibt sich aber aus der Neigung der Hyperbelasymptoten gegen die Strahlachse. Da sich die Hyperbel infolge der Windeinflüsse durch die in den Sprühstrahl eintretende Luft nicht voll ausbilden kann, läßt sich der Winkel α auch aus diesem Grunde nicht eindeutig bestimmen. Da aber Abweichungen in der Messung von einigen Grad en erhebliche Veränderungen beim Radius r_1 ergeben, wirken sich diese damit auch auf den maximalen Durchmesser d_{\max} aus. Man gelangt also auf diesem einfachen Wege über die Messung des Strahlwinkels nicht zu einer eindeutigen Tropfenanalyse des Sprühstrahls.

Bei allen bisherigen strömungstechnischen Betrachtungen wurde Reibungsfreiheit innerhalb des Strahlrohres vorausgesetzt. Diese Voraussetzung trifft in der Praxis nicht zu. Der dem Wasser aufgezwungene Drall wird durch Reibung innerhalb der Strömung und vor allem durch Gleiten entlang der Wand abgebaut und es stellt sich nach Durchlaufen einer "Beruhigungsstrecke" eine rein translatorische Bewegung ein, wobei das Profil der Geschwindigkeit die aus der Hydrodynamik bekannte Form einnimmt. Da es sich um eine turbulente Strömung handelt, ist die Geschwindigkeit nach völliger "Beruhigung" über dem Rohrquerschnitt nahezu gleichmäßig groß. Die Beruhigungsstrecke kann nach Literaturangaben, die jedoch stark schwankende Werte enthalten, bis zu dem 400-fachen des Innendurchmessers des Rohres betragen.

Bei einem Strahlrohr nach DIN 14365 erfährt die Drallströmung durch das der Versprüheinrichtung nachfolgende Zwischenrohr von rund $5 d$ Länge ($d =$ Innendurchmesser dieses Rohres) und dem Verjüngungsstück, das die allmähliche Einengung zur Düse bewirkt, eine gewisse Beruhigung. Das wurde durch Versuche bestätigt. Für ein handelsübliches Strahlrohr wurde das Zwischenrohr von $1 d$ bis $40 d$ variiert. Dabei verkleinerte sich der Strahlwinkel bei sonst gleichen Versuchsbedingungen mit zunehmender Beruhigungsstrecke erheblich. Der Strahlwinkel 2α sank von ungefähr 40 Grad

für die Beruhigungsstrecke von 1 d auf rund 15 Grad bei 40 d ab. Der dem Wasser aufgezwungene Drall wird also erheblich verringert. Bei kurzen Zwischenrohren war eine Beruhigung am deutlichsten feststellbar. Der nach Gleichung (12) sich theoretisch ergebende Winkel kann sich somit nicht einstellen, d.h. er ist um den Betrag kleiner, der durch die Reibung in dem Zwischenrohr und dem Verjüngungsteil auftritt.

Wenn also durch Verlängerung des Zwischenrohrs von 1 d auf 5 d eine Winkeländerung um rund 5 Grad festzustellen ist, so müssen das Zwischenrohr von 1 d selbst und das Verjüngungsteil von rund 3 d Länge ebenfalls durch die in diesen Teilen auftretende Reibung eine beträchtliche Winkelveränderung zur Folge haben. Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn bei den Mehrzweckstrahlrohren erheblich kleinere Strahlwinkel gemessen werden als wie sie die theoretische Ermittlung ergibt.

Die Reibung innerhalb der "Beruhigungsstrecke" wird bei jedem Rohr infolge unterschiedlicher Konstruktionen und durch die unterschiedliche Rauigkeit an den Wänden andere Werte annehmen. Man wird sie deshalb nicht durch einen einfachen Faktor berücksichtigen können, da dieser für alle Rohrkonstruktionen verschieden ausfallen wird. Es bleibt deshalb für spätere Untersuchungen noch die Frage zu klären, welchen Einfluß die Reibung auf die Ausbildung des Strahlwinkels hat.

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden die strömungstechnischen Vorgänge beim Durchfluß des Wassers durch das Mehrzweckstrahlrohr sowohl für den Voll- als auch für den Sprühstrahl behandelt. Um die Zusammenhänge beleuchten zu können, müssen die Geschwindigkeitsrichtungen des Wassers bekannt sein, weil sie primär die Aufteilung bewirken.

Die meisten Mehrzweckstrahlrohre bewirken eine Versprühung des Wassers nach dem Prinzip der Drallzerstäubung. Bei drehungsfreier Kreisbewegung stellt sich in der Düsenachse ein flüssigkeitsfreier,

zylinderförmiger Raum mit einem Radius r_1 ein, der nach bekannten Gesetzen der Hydrodynamik aus dem Rückdruck an dem Strahlrohr, der durchströmenden Wassermenge und einigen konstruktiven Daten des Rohres berechnet werden kann.

Für die Beurteilung der Güte einer Zerstäubung wurden Überlegungen anderer Wissenschaftler zugrunde gelegt, nach denen der größte Tropfen eines Gemisches durch ein Stabilitätsgesetz bestimmt würde und alle anderen kleineren Tropfen nach einer statistischen Gesetzmäßigkeit entstehen. Für Mehrzweckstrahlrohre wurden unter Annahme der Reibungsfreiheit Gleichungen zur Ermittlung des größten in einem Gemisch vorkommenden Tropfens mit dem Durchmesser d_{\max} aufgestellt und der Grad der Versprühung durch Definition eines mittleren Tropfendurchmessers, der sich als Tropfen einheitlicher Größe eines Ersatzgemisches mit demselben Verhältnis von Volumen- und Oberfläche wie das zu definierende Gemisch ergeben soll, unter Einbeziehung von d_{\max} und des Radius r_1 bestimmt. Aufgrund weiterer Überlegungen konnte eine Abhängigkeit zwischen dem Zerstäubungsgrad und dem Strahlwinkel festgestellt werden. Damit ist es möglich, entweder durch Messung des Rückdruckes am Strahlrohr und der durchfließenden Wassermenge oder durch Ermittlung des Sprühstrahlwinkels zusammen mit einigen konstruktiven Daten des Mehrzweckstrahlrohres und mit Hilfe einiger physikalischer Daten der Flüssigkeit eine theoretische Aussage über die Feinheit der Zerstäubung zu machen. Späteren Untersuchungen muß es vorbehalten bleiben, die innerhalb des Strahlrohres auftretende Reibung, die nach den vorliegenden Untersuchungen nicht vernachlässigt werden darf, in die Berechnungen mit einzubeziehen.

ANHANG

MESSVERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON WURFBILDERN FÜR MEHRZWECKSTRAHLROHRE

Die in dem vergangenen Jahrzehnt auf den Markt gekommenen Mehrzweckstrahlrohre mit verschiedenen Zerstäuber-Konstruktionen zur Erzielung einer günstigen Wasserversprühung haben erkennen lassen, daß es notwendig ist, die verschiedenen Ausführungen in Bezug auf eine gute und gleichmäßige Versprühung und einer Mindestwurfweite zu überprüfen. Verschiedene Rohrkonstruktionen zeigen eine ungleichmäßige Wasserverteilung im Sprühstrahl, d.h. entweder befinden sich noch einzelne Vollstrahlen im Wasserkegel oder es handelt sich um eine ausgesprochene Wasseranhäufung im Sprühstrahl. Solche Zerstäuberkonstruktionen sind für eine Brandbekämpfung nicht sonderlich geeignet und sollen durch entsprechende Prüfungen von der Erteilung einer Zulassung ausgeschieden werden.

Über entsprechende Untersuchungen an Mehrzweckstrahlrohren der Größe C berichtet Hinrichs [6], [7]. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wurde das sogenannte Wurfbild-Verfahren als günstig zur Beurteilung eines Sprühstrahles angesehen und dieses im Normblatt DIN 14365, Blatt 2, zur Prüfung aufgenommen. Das Wurfbild wird durch ein Querschnittsbild ergänzt. Diese Verfahren wurden bisher nur bei M-Strahlrohren der Größe C angewendet. Sie sollen nunmehr ebenfalls auf solche der Größe B und D ausgeweitet werden. Die Untersuchungen wurden mit den derzeit auf dem Markt befindlichen M-Strahlrohren angestellt.

Der Versuchsaufbau wurde wie in dem Bericht [6] beschrieben vorgenommen. In einer entsprechend geräumigen Halle mit den Grundmaßen von 15 x 40 m und einer Hallenhöhe von 4,5 m erfolgte die Vermessung ohne äußere Störeinflüsse und bei stationärem Strömungszustand bei einem Wasserdruck von $H = 50$ m WS vor dem Strahlrohr. Die Meßdauer betrug bei den BM-Strahlrohren im allgemeinen 3 bis 4 min, bei den DM-Strahlrohren bis 20 min.

Der Mittenabstand der runden Auffangbehälter mit einem Öffnungsquerschnitt von 100 cm^2 (Blechdosen Größe 7 nach DIN 2011) betrug 500 mm. Das Fassungsvermögen der Dosen war für die Vermessung der BM-Strahlrohre ausreichend. Die Einspannhöhe der Rohrmündung wurde für alle Messungen einheitlich auf 1 m oberhalb der Gefäßoberkanten gehalten.

Die Meßdurchführung kann unverändert nach den Ausführungen in DIN 14365, Blatt 2, Abschnitt 4.2.1 auch für BM- und DM-Strahlrohre erfolgen. Bei BM-Strahlrohren ist es jedoch unbedingt erforderlich, die Dosen gegen Verschieben infolge des Aufpralls der Tropfen auf die Dosenwandungen zu sichern. Infolge des geringen Wasseranfalles am Boden bei den DM-Strahlrohren ist bei diesen eine längere Meßdauer unbedingt notwendig, um Ungenauigkeiten in der Mengenbestimmung auszuschließen. Der Dosenmittenabstand von 500 mm reicht noch aus, um einen echten Überblick über die Wasserverteilung im Sprühstrahl zu erhalten.

Die Aufzeichnung der Wurfbilder erfolgt nach DIN 14365, Blatt 2, bzw. wie in [6] und [7] beschrieben. Die mittlere Wurfweite ist derjenige Abstand von der Strahlrohrmündung, den 50 % des aus dem Strahlrohr austretenden Wassers erreichen und errechnet sich aus den in einem Raster eingetragenen Niederschlagsmengen. Die Ermittlung kann bei den BM- und DM-Strahlrohren wie bei denen der Größe C erfolgen, ebenso die Bestimmung der Wurfweite, die senkrecht zur Strahlrohrachse in Höhe der mittleren Wurfweite zu messen ist. Bei den BM-Strahlrohren ist diese wie bei den CM-Strahlrohren diejenige Breite, innerhalb der die Niederschlagsmenge den Wert von 2 mm/min nicht unterschreitet.

Bei den DM-Strahlrohren wird als äußere Begrenzungslinie des Sprühstrahl-Wurfbildes eine Niederschlagsmenge von 1 mm/min vorgeschlagen, weil der Wasseranfall am Boden bei diesen Rohren mit relativ wenig Wasserlieferung gering ist. Ebenso wird vorgeschlagen, die Wurfbreite als diejenige Breite anzusehen, innerhalb der die Niederschlagsmenge den Wert 1 mm/min nicht unterschreitet. Es ergibt sich dadurch ein Unterschied zu den C- und B-Rohren, aber es wird wohl selten ein Vergleich zwischen D und C bzw. B-Rohren angestellt werden.

Der Anstellwinkel der Rohre wurde bei allen Rohren einheitlich bei 15° belassen. Die seinerzeit bei den CM-Strahlrohren festgestellte Tatsache, daß die maximale Wurfweite der Sprühstrahlen nicht bei einem für alle Rohre gleichen Anstellwinkel des Strahlrohres erzielt sondern durch die Rohrkonstruktion beeinflusst wird, wurde bei den jetzt vermessenen Rohren wieder festgestellt.

Von den mehr als 20 vermessenen Rohren ist in Bild 3 das Wurfbild eines BM-Strahlrohres als typisches Beispiel der zur Zeit auf dem Markt befindlichen M-Strahlrohre wiedergegeben. Alle Strahlrohre zeigten mehr oder weniger einen schlanken, d.h. relativ weit werfenden Sprühstrahl mit mittlerer Wurfweite.

Zur Ergänzung und besseren Beurteilung des Strahles wird ein Querschnittsbild aufgenommen. Zu diesem Zweck ist das Rohr in bestimmter Höhe über den aufgestellten Dosen angeordnet, so daß der Sprühstrahl senkrecht nach unten fällt. Die für die Aufnahme des Wurfbildes verwendeten Dosen stellt man zweckmäßig mit einem Mittenabstand von 167 mm auf, um durch diese enge Anordnung der Dosen ein ausreichend genaues Bild über die Wasserverteilung im Sprühstrahl zu erhalten. Der Abstand der Strahlrohrmündung von der Oberkante der Dosen betrug 4 m. Bei dieser Entfernung ergibt sich ungefähr die maximale Ausbreitung des Sprühstrahls.

Aus der Vielzahl der untersuchten Strahlrohre sollen Bild 4 und Bild 5 als charakteristische Beispiele für die gemessenen Querschnittsbilder dienen. Man hat es heute praktisch nur noch mit zwei Arten von Querschnittsverteilungen zu tun. Einmal fällt die Wasserverteilung kontinuierlich zum Rand ab (Bild 4) oder aber es liegt ein leichter Hohlstrahl vor, wie dies auf Bild 5 ersichtlich ist. Im letzten Fall ist in der Mitte des Sprühstrahles ein geringerer Wasseranfall als in dem ihn umgebenden Ringzonen. Bei allen M-Strahlrohren wurde ansonsten eine gleichmäßige Wasserverteilung festgestellt.

Die Versuche haben bestätigt, daß das bei CM-Strahlrohren angewandte Aufnahmeverfahren zur Bestimmung des Querschnittsbildes auch für die übrigen Strahlrohrgrößen angewendet werden kann.

Bei den BM-Strahlrohren ist die Meßdauer jedoch auf 20 bis 30 s zu verkürzen, um ein Querschnittsbild mit entsprechender Aussagefähigkeit über die Wasserverteilung im Strahlquerschnitt zu erhalten.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H.A.Troesch Die Zerstäubung von Flüssigkeiten.
Chemie-Ing. Techn. 26 (1954) S.311/320
- [2] H. Gebhardt Die Tropfengrößen bei Drallzerstäubung
BWK Bd. 10 (1958) S.361/366
- [3] O. Herterich Wasser als Löschmittel.
Dr.A.Hüthig-Verlag GmbH Heidelberg 1960
- [4] E.Söhngen Der Strahlwinkel von Brennstoff-
U.Grigull Dralldüsen bei kontinuierlicher
Einspritzung.
Forschung Ing.-Wesen 17 (1951) S.77-82
- [5] B.R.Hinrichs Ermittlung des Tropfenspektrums von
Sprühdüsen auf fotografischem Wege.
Sonderheft der VFDB. Zeitschrift 9
(1960) Nr.3, S.61
- [6] B.R.Hinrichs Vergleichende Untersuchungen an
Sprühstrahlrohren.
VFDB-Zeitschrift 7 (1958) H.2, S.29
- [7] B.R.Hinrichs Untersuchung an Sprühstrahlrohren.
VFDB-Zeitschrift, 8 (1959), Nr.2,S.32

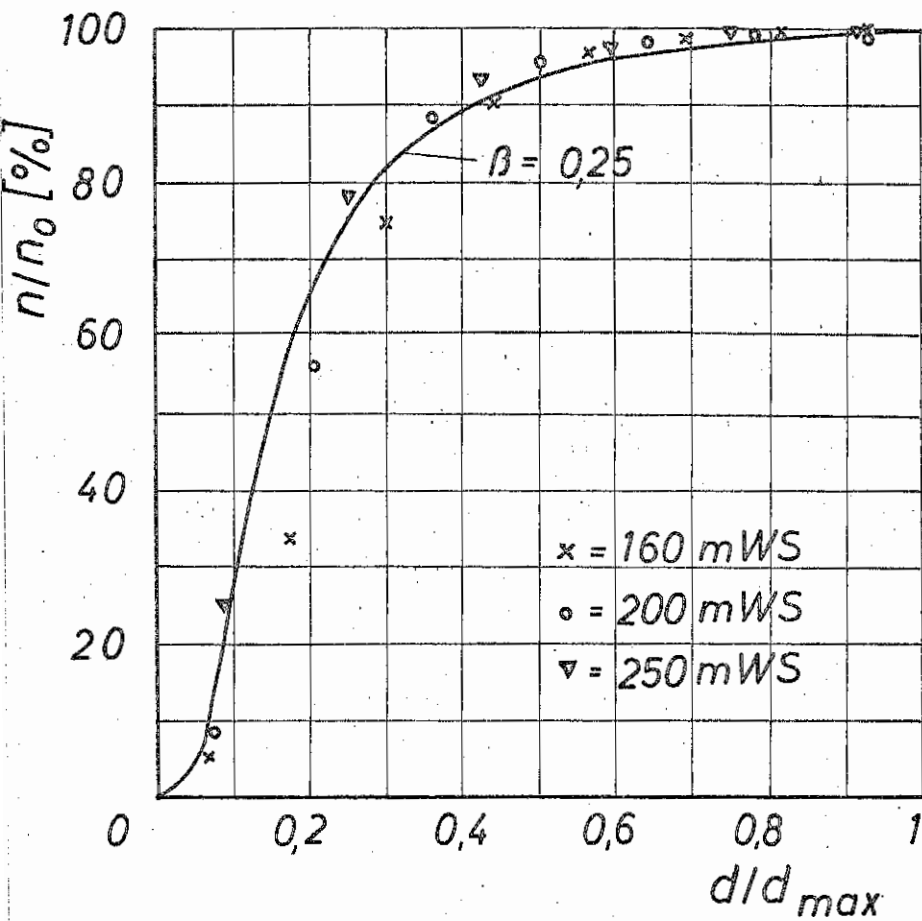


Bild 1. Tropfenverteilung im Sprühstrahl für das als Beispiel verwendete Rohr bei Wasserdrücken am Strahlrohr von 40, 80 und 120 m WS. Die Meßwerte gruppieren sich um die Tropfenzahlsummenkurve mit $\beta = 0,25$.

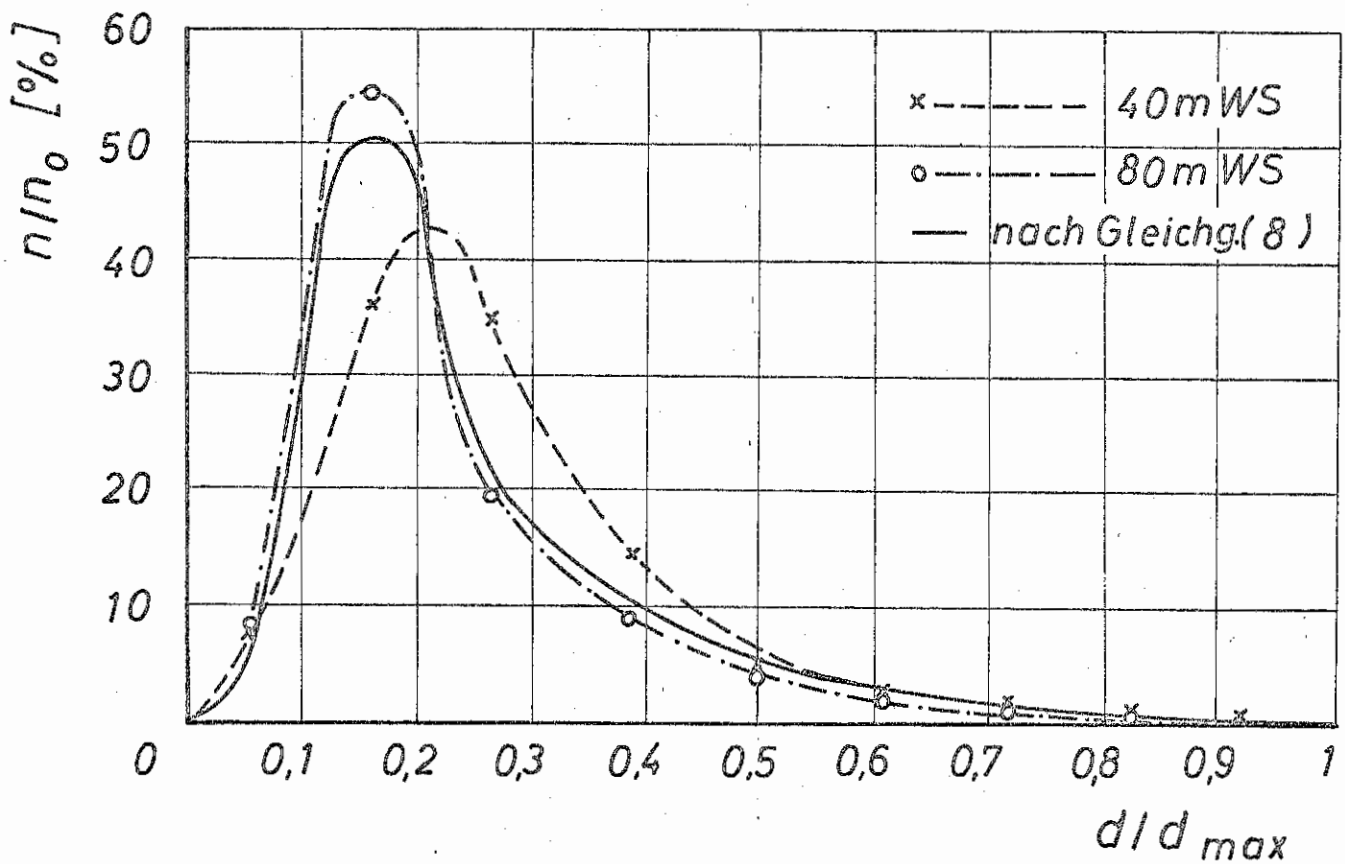


Bild 2. Verteilung der Tropfen im Sprühlstrahl, einmal nach Gleichung (8) errechnet (durchgehende Linie) und zum anderen aus Messungen ermittelt (gestrichelte Linie für 40 m WS, strichpunktierte Linie für 80 m WS).

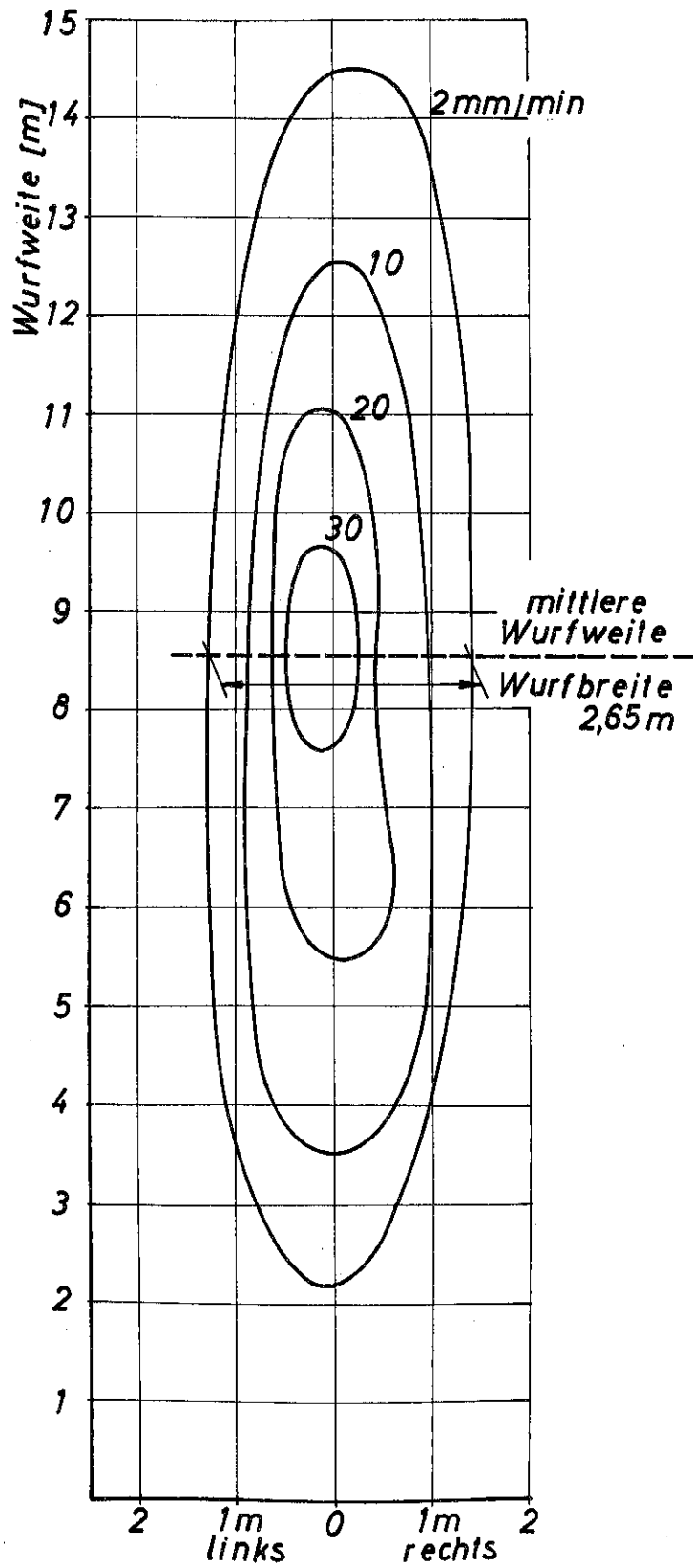


Bild 3. Wurfbild eines BM-Strahlrohres.

Strahlrohranordnung:

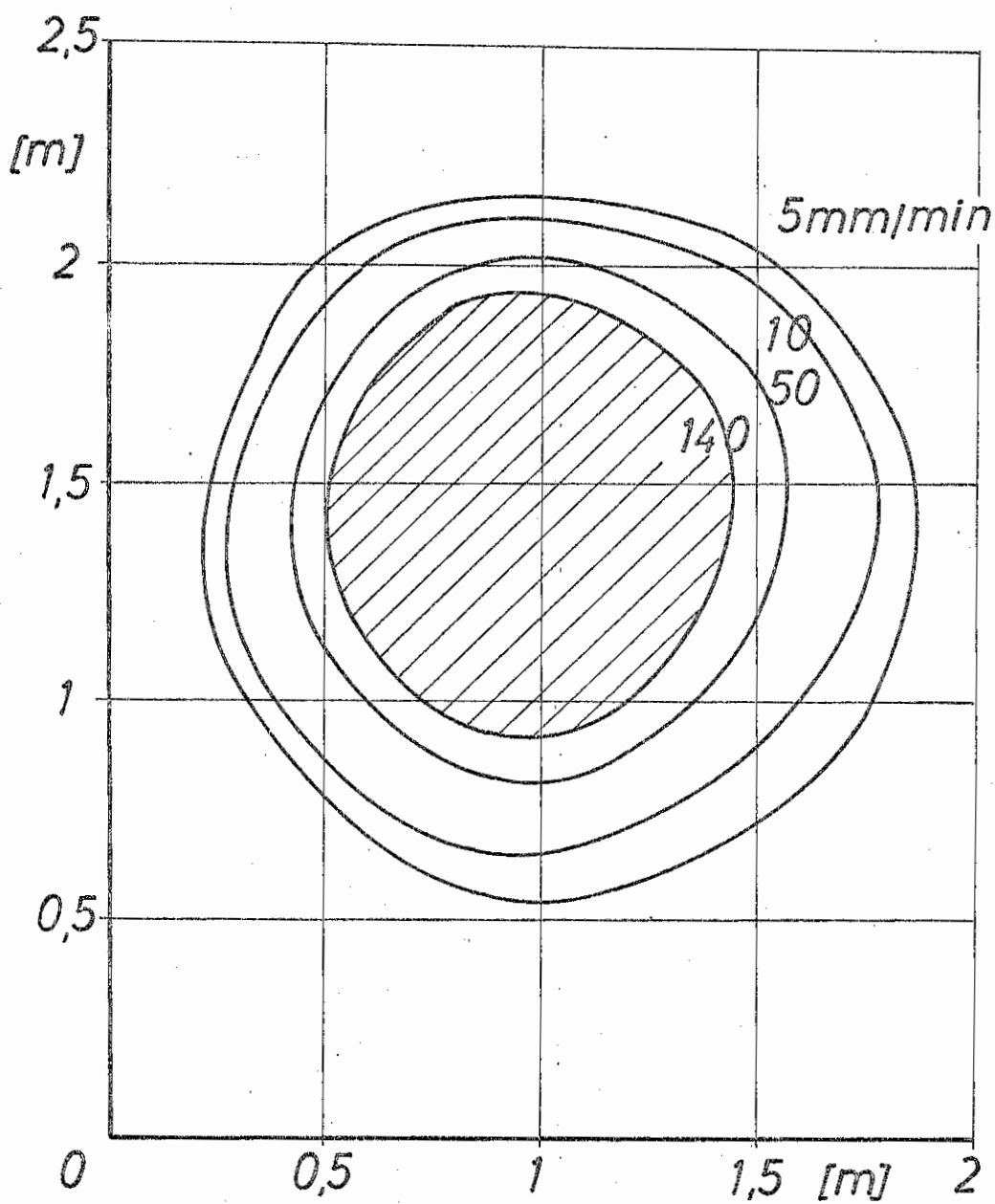
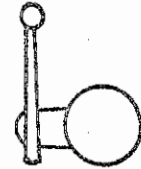


Bild 4. Querschnittsbild eines BM-Strahlrohres

Strahlrohranordnung:



5 mm/min

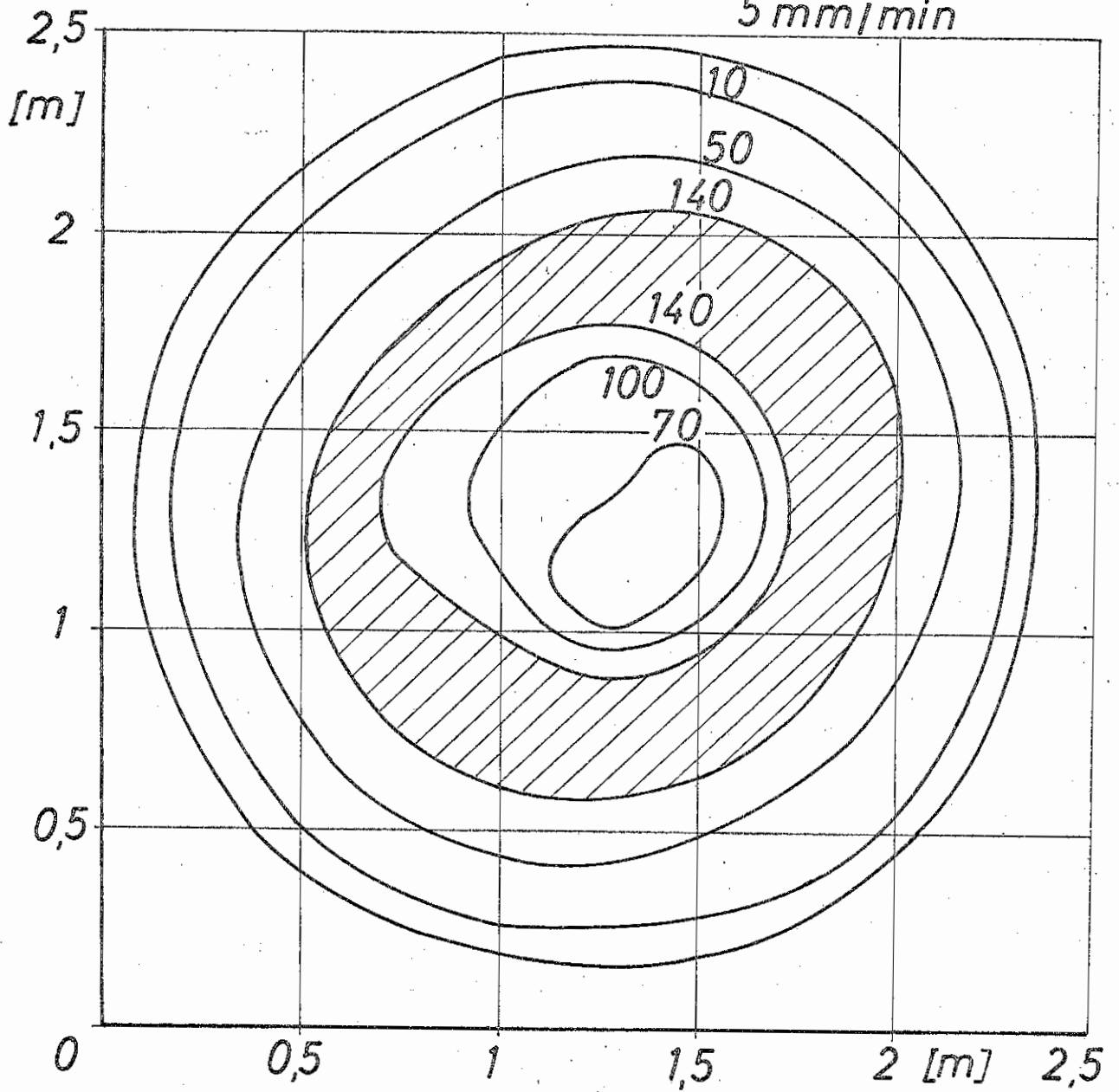


Bild 5. Querschnittsbild eines BM-Strahlrohres